

BUKU AJAR



SISTEM PENDUKUNG KEPUTUSAN BERBASIS MODEL DINAMIK

Natalia Magdalena R. Mamulak, S.T., M.M.

BUKU AJAR

SISTEM PENDUKUNG

KEPUTUSAN BERBASIS MODEL DINAMIK

Natalia Magdalena R. Mamulak, S.T., M.M.



BUKU AJAR SISTEM PENDUKUNG KEPUTUSAN BERBASIS MODEL DINAMIK

Ditulis oleh:

Natalia Magdalena R. Mamulak, S.T., M.M.

Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang. Dilarang keras memperbanyak, menerjemahkan atau mengutip baik sebagian ataupun keseluruhan isi buku tanpa izin tertulis dari penerbit.



ISBN: 978-634-7184-02-3
XII + 239 hlm; 18,2 x 25,7 cm.
Cetakan I, Maret 2025

Desain Cover dan Tata Letak:
Melvin Mirsal

Diterbitkan, dicetak, dan didistribusikan oleh
PT Media Penerbit Indonesia
Royal Suite No. 6C, Jalan Sedap Malam IX, Sempakata
Kecamatan Medan Selayang, Kota Medan 20131
Telp: 081362150605
Email: ptmediapenerbitindonesia@gmail.com
Web: <https://mediapenerbitindonesia.com>
Anggota IKAPI No.088/SUT/2024

KATA PENGANTAR

Sistem Pendukung Keputusan telah menjadi salah satu elemen penting dalam pengambilan keputusan di berbagai bidang, baik itu di dunia bisnis, pemerintahan, pendidikan, maupun kesehatan. Penggunaan model dinamik dalam SPK memungkinkan analisis yang lebih mendalam dan prediksi yang lebih akurat terhadap berbagai variabel dan faktor yang saling berinteraksi dalam suatu sistem.

Buku ajar ini membahas konsep, teknik, dan aplikasi SPK berbasis model dinamik. Pembahasan dimulai dari dasar-dasar sistem dinamik, teknik pemodelan, hingga aplikasi praktis di berbagai bidang seperti perencanaan kebijakan, manajemen bisnis, dan kesehatan. Buku ajar ini juga membahas studi kasus dan contoh simulasi untuk membantu memahami implementasi nyata dari sistem dinamik dalam pengambilan keputusan.

Semoga buku ajar ini dapat menjadi referensi yang bermanfaat dalam mendukung proses pembelajaran dan pengembangan keilmuan di bidang sistem pendukung keputusan berbasis model dinamik.

Salam hangat

PENULIS

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
ANALISIS INSTRUKSIONAL	vii

BAB I	PENDAHULUAN SISTEM PENDUKUNG	
	KEPUTUSAN (SPK)	1
A.	Pengertian Sistem Pendukung Keputusan	1
B.	Sejarah dan Perkembangan SPK	2
C.	Sistem Dinamik dalam Konteks SPK	10
D.	Manfaat dan Aplikasi SPK Berbasis Sistem Dinamik.....	12
E.	Soal Latihan	14

BAB II	DASAR-DASAR PEMODELAN DAN SIMULASI... 15	
A.	Proses Pembuatan Model Dinamik.....	15
B.	Pengertian dan Manfaat Simulasi dalam Sistem Dinamik	20
C.	Proses Pengerjaan Simulasi	23
D.	Kelebihan dan Kekurangan Model Simulasi Dinamik	30
E.	Klasifikasi Model Simulasi.....	35
F.	Soal Latihan	42

BAB III	KONSEP DASAR SISTEM DINAMIK	44
A.	Sejarah Sistem Dinamik	44
B.	Prinsip Utama Sistem Dinamik	50
C.	Struktur Dasar Model Sistem Dinamik.....	54
D.	Langkah-Langkah Pemodelan Sistem Dinamik	56
E.	Contoh Diagram Dasar Sistem Dinamik	62
F.	Soal Latihan	66

BAB IV	MODELLING DECISION SITUATION DALAM SISTEM DINAMIK	68
A.	Pengertian dan Tujuan Pemodelan Keputusan	68

B.	Elemen-Elemen Utama Model Sistem Dinamik.....	72
C.	Tahapan Pengembangan Model Sistem Dinamik.....	75
D.	Flow Diagram dalam Sistem Dinamik	79
E.	Soal Latihan	83
BAB V	DINAMIKA PROYEK (<i>PROJECT DYNAMICS</i>)	84
A.	Konsep Dinamika Proyek dalam Sistem Dinamik	84
B.	Aplikasi Model Sistem Dinamik di Berbagai Bidang	87
C.	Soal Latihan	95
BAB VI	VALIDASI DAN VERIFIKASI MODEL SISTEM DINAMIK.....	97
A.	Konsep Validasi dalam Sistem Dinamik	97
B.	Jenis-Jenis Validasi Model Dinamik	98
C.	Langkah-Langkah Validasi dan Verifikasi Model	101
D.	Teknik Evaluasi Kinerja Model.....	110
E.	Soal Latihan	114
BAB VII	ANALISIS SENSITIVITAS DAN SKENARIO MODEL	115
A.	Skenario Struktur dan Parameter dalam Sistem Dinamik	115
B.	Analisis Sensitivitas pada Model Dinamik.....	119
C.	<i>Decision Analysis Model</i>	123
D.	<i>Performance of Decision Alternatives</i>	129
E.	<i>Prediction Model</i> dalam Sistem Dinamik.....	135
F.	Soal Latihan	142
BAB VIII	IMPLEMENTASI MODEL SISTEM DINAMIK....	143
A.	Strategi Implementasi Model Sistem Dinamik.....	143
B.	Pemilihan Alternatif Skenario untuk Pengambilan Keputusan	147
C.	Evaluasi Efektivitas dan Efisiensi Model Implementasi	151
D.	Soal Latihan	156

BAB IX	SISTEMATIS <i>LITERATUR REVIEW</i> DALAM SISTEM DINAMIK	157
A.	Pengertian <i>Literatur Review</i> dalam Sistem Dinamik	157
B.	Pentingnya <i>Literatur Review</i> untuk Validasi dalam Sistem Dinamik	160
C.	Tahapan Sistematis <i>Literatur Review</i>	163
D.	Soal Latihan	170
BAB X	INTEGRASI DATA KE DALAM SISTEM DINAMIK.....	171
A.	Pengumpulan Data untuk Model Sistem Dinamik	171
B.	Teknik Pemrosesan Data	174
C.	Validasi Data untuk Simulasi Dinamik	181
D.	Soal Latihan	185
BAB XI	PERANGKAT LUNAK UNTUK SISTEM DINAMIK.....	187
A.	Pengantar ke Perangkat Lunak Simulasi Sistem Dinamik	187
B.	Ventana Simulation dan Alternatifnya	189
C.	Pemilihan Perangkat Lunak Berdasarkan Kebutuhan ...	193
D.	Contoh: Membuat Model Dinamik Menggunakan Ventana Simulation.....	195
E.	Soal Latihan	197
BAB XII	STUDI EVALUASI KINERJA SISTEM DINAMIK.....	199
A.	Indikator Kinerja Model Sistem Dinamik	199
B.	Teknik Evaluasi Hasil Simulasi.....	205
C.	Soal Latihan	212
BAB XIII	TANTANGAN DAN MASA DEPAN SISTEM DINAMIK DALAM SPK.....	213
A.	Tantangan dalam Implementasi Sistem Dinamik	213
B.	Tren Masa Depan Sistem Dinamik untuk SPK	216
C.	Integrasi Sistem Dinamik dengan AI dan Big Data.....	219
D.	Soal Latihan	224

BAB XIV KESIMPULAN.....	226
DAFTAR PUSTAKA	228
GLOSARIUM	234
INDEKS	236
BIOGRAFI PENULIS.....	240
SINOPSIS	242

ANALISIS INSTRUKSIONAL

No	Kemampuan Akhir yang Diharapkan	Indikator
1	Mampu memahami terkait dengan pengertian sistem pendukung keputusan, memahami sejarah dan perkembangan SPK, memahami sistem dinamik dalam konteks SPK, serta memahami manfaat dan aplikasi spk berbasis sistem dinamik, sehingga pembaca dapat mampu menerapkan konsep yang dipelajari dalam analisis dan pengembangan solusi yang mendukung pengambilan keputusan secara efektif.	• Pengertian Sistem Pendukung Keputusan • Sejarah dan Perkembangan SPK • Sistem Dinamik dalam Konteks SPK • Manfaat dan Aplikasi SPK Berbasis Sistem Dinamik
2	Mampu memahami terkait dengan proses pembuatan model dinamik, memahami pengertian dan manfaat simulasi dalam sistem dinamik, memahami proses pengerjaan simulasi, memahami kelebihan dan kekurangan model simulasi dinamik, memahami klasifikasi model simulasi, sehingga pembaca dapat mampu menerapkan konsep yang dipelajari dalam analisis dan pengembangan solusi yang mendukung pengambilan keputusan secara efektif.	• Proses Pembuatan Model Dinamik • Pengertian dan Manfaat Simulasi dalam Sistem Dinamik • Proses Pengerjaan Simulasi • Kelebihan dan Kekurangan Model Simulasi Dinamik • Klasifikasi Model Simulasi
3	Mampu memahami terkait dengan sejarah sistem dinamik, memahami prinsip utama sistem dinamik, memahami struktur	• Sejarah Sistem Dinamik • Prinsip Utama Sistem Dinamik

	dasar model sistem dinamik, memahami langkah-langkah pemodelan sistem dinamik, serta memahami contoh diagram dasar sistem dinamik, sehingga pembaca dapat mampu menerapkan konsep yang dipelajari dalam analisis dan pengembangan solusi yang mendukung pengambilan keputusan secara efektif.	• Struktur Dasar Model Sistem Dinamik • Langkah-Langkah Pemodelan Sistem Dinamik • Contoh Diagram Dasar Sistem Dinamik
4	Mampu memahami terkait dengan pengertian dan tujuan pemodelan keputusan, memahami elemen-elemen utama model sistem dinamik, memahami tahapan pengembangan model sistem dinamik, serta memahami flow diagram dalam sistem dinamik, sehingga pembaca dapat pemahaman yang mendalam dan keterampilan praktis dalam menerapkan konsep-konsep tersebut dalam berbagai konteks.	• Pengertian dan Tujuan Pemodelan Keputusan • Elemen-Elemen Utama Model Sistem Dinamik • Tahapan Pengembangan Model Sistem Dinamik • Flow Diagram dalam Sistem Dinamik
5	Mampu memahami terkait dengan konsep dinamika proyek dalam sistem dinamik, serta memahami aplikasi model sistem dinamik di berbagai bidang, sehingga pembaca dapat memberikan pemahaman konseptual dan praktik praktis kepada pembaca, sehingga mampu menggunakan pendekatan sistem dinamis untuk mengatasi permasalahan nyata secara holistik.	• Konsep Dinamika Proyek dalam Sistem Dinamik • Aplikasi Model Sistem Dinamik di Berbagai Bidang
6	Mampu memahami terkait dengan konsep validasi dalam sistem dinamik, memahami jenis-jenis validasi model dinamik, memahami langkah-	• Konsep Validasi dalam Sistem Dinamik • Jenis-Jenis Validasi Model Dinamik

	langkah validasi dan verifikasi model, serta memahami teknik evaluasi kinerja model, sehingga pembaca dapat memahami konsep dan keterampilan teknis yang memungkinkan pembaca mengembangkan, memvalidasi, dan menyebarkan model sistem dinamis secara profesional dan efektif.	• Langkah-Langkah Validasi dan Verifikasi Model • Teknik Evaluasi Kinerja Model
7	Mampu memahami terkait dengan skenario struktur dan parameter dalam sistem dinamik, memahami analisis sensitivitas pada model dinamik, memahami <i>decision analysis model</i>, memahami <i>performance of decision alternatives</i>, serta memahami <i>prediction model</i> dalam sistem dinamik, sehingga pembaca dapat pemahaman mendalam kepada pembaca serta keterampilan praktis untuk menerapkan teknik sistem dinamika dalam analisis keputusan, evaluasi alternatif, dan prediksi, sehingga dapat memberikan solusi strategi dan inovatif di berbagai bidang.	• Skenario Struktur dan Parameter dalam Sistem Dinamik • Analisis Sensitivitas pada Model Dinamik • <i>Decision Analysis Model</i> • <i>Performance of Decision Alternatives</i> • <i>Prediction Model</i> dalam Sistem Dinamik
8	Mampu memahami terkait dengan strategi implementasi model sistem dinamik, memahami pemilihan alternatif skenario untuk pengambilan keputusan, serta memahami evaluasi efektivitas dan efisiensi model implementasi, sehingga pembaca dapat pemahaman yang lebih mendalam dan keterampilan praktis dalam merancang, mengimplementasikan, dan menyebarkan model sistem	• Strategi Implementasi Model Sistem Dinamik • Pemilihan Alternatif Skenario untuk Pengambilan Keputusan • Evaluasi Efektivitas dan Efisiensi Model Implementasi

	dinamis, sehingga dapat digunakan untuk pengambilan keputusan yang lebih baik dan solusi yang lebih efisien dalam berbagai situasi dan konteks.	
9	Mampu memahami terkait dengan pengertian <i>literatur review</i> dalam sistem dinamik, memahami pentingnya <i>literatur review</i> untuk validasi dalam sistem dinamik, serta memahami tahapan sistematis <i>literatur review</i> , sehingga pembaca dapat melakukan tinjauan pustaka secara efektif dan sistematis, yang tidak hanya meningkatkan pemahaman teori dalam sistem dinamik tetapi juga berperan dalam validasi dan pengembangan model-model sistem dinamik yang lebih solid.	• Pengertian <i>Literatur Review</i> dalam Sistem Dinamik • Pentingnya <i>Literatur Review</i> untuk Validasi dalam Sistem Dinamik • Tahapan Sistematis <i>Literatur Review</i>
10	Mampu memahami terkait dengan pengumpulan data untuk model sistem dinamik, memahami teknik pemrosesan data, serta memahami validasi data untuk simulasi dinamik, sehingga pembaca dapat mengumpulkan, memproses, dan memvalidasi data secara efektif, yang sangat penting dalam memastikan bahwa model sistem dinamik yang dikembangkan dapat memberikan analisis yang akurat dan dapat diandalkan untuk pengambilan keputusan yang berbasis data.	• Pengumpulan Data untuk Model Sistem Dinamik • Teknik Pemrosesan Data • Validasi Data untuk Simulasi Dinamik
11	Mampu memahami terkait dengan pengantar ke perangkat lunak simulasi sistem dinamik, memahami ventana simulation dan alternatifnya, memahami pemilihan perangkat lunak	• Pengantar ke Perangkat Lunak Simulasi Sistem Dinamik • Ventana Simulation dan Alternatifnya

	berdasarkan kebutuhan, serta memahami contoh: membuat model dinamik menggunakan ventana simulation, sehingga pembaca dapat memanfaatkan perangkat lunak ini untuk menganalisis sistem yang lebih efektif dan efisien.	• Pemilihan Perangkat Lunak Berdasarkan Kebutuhan • Contoh: Membuat Model Dinamik Menggunakan Ventana Simulation
12	Mampu memahami terkait dengan indikator kinerja model sistem dinamik, serta memahami teknik evaluasi hasil simulasi, sehingga pembaca dapat memiliki keterampilan dalam memancarkan kinerja model sistem dinamis dan menganalisis hasil simulasi dengan berbagai teknik yang memungkinkan untuk memperbaiki model dan memastikan bahwa hasil simulasi mendukung tujuan pengambilan keputusan yang lebih baik.	• Indikator Kinerja Model Sistem Dinamik • Teknik Evaluasi Hasil Simulasi
13	Mampu memahami terkait dengan tantangan dalam implementasi sistem dinamik, memahami tren masa depan sistem dinamik untuk SPK, serta memahami integrasi sistem dinamik dengan AI dan big data, sehingga pembaca dapat mengatasi tantangan implementasi sistem dinamis, mengenali tren masa depan dalam aplikasi sistem pendukung keputusan, dan memanfaatkan integrasi dengan teknologi terkini seperti AI dan big data untuk meningkatkan efektivitas dan analisis yang cermat serta pengambilan keputusan.	• Tantangan dalam Implementasi Sistem Dinamik • Tren Masa Depan Sistem Dinamik untuk SPK • Integrasi Sistem Dinamik dengan AI dan Big Data

BAB I

PENDAHULUAN SISTEM PENDUKUNG KEPUTUSAN (SPK)

Kemampuan Akhir yang Diharapkan

Mampu memahami terkait dengan pengertian sistem pendukung keputusan, memahami sejarah dan perkembangan SPK, memahami sistem dinamik dalam konteks SPK, serta memahami manfaat dan aplikasi spk berbasis sistem dinamik, sehingga pembaca dapat mampu menerapkan konsep yang dipelajari dalam analisis dan pengembangan solusi yang mendukung pengambilan keputusan secara efektif.

Materi Pembelajaran

- Pengertian Sistem Pendukung Keputusan
- Sejarah dan Perkembangan SPK
- Sistem Dinamik dalam Konteks SPK
- Manfaat dan Aplikasi SPK Berbasis Sistem Dinamik
- Soal Latihan

A. Pengertian Sistem Pendukung Keputusan

Sistem Pendukung Keputusan (SPK), atau *Decision Support System* (DSS), adalah suatu sistem berbasis komputer yang dirancang untuk mendukung proses pengambilan keputusan yang kompleks, semi-terstruktur, atau tidak terstruktur. SPK tidak dimaksudkan untuk menggantikan pengambil keputusan manusia, tetapi untuk memberikan dukungan berbasis data, model, atau analitik yang dapat meningkatkan kualitas keputusan. Menurut Power dan Heavin (2017), SPK adalah sistem informasi berbasis komputer yang memanfaatkan data, model, atau pengetahuan untuk membantu manajer dalam pengambilan keputusan yang spesifik dan mendalam. Dari perspektif pengembangan teknologi, SPK mencakup tiga komponen utama:

1. Basis Data: Menyediakan informasi untuk mendukung analisis keputusan.
2. Basis Model: Mencakup algoritma dan simulasi untuk menghasilkan skenario dan solusi alternatif.
3. Antarmuka Pengguna (*User Interface*): Memungkinkan pengguna untuk berinteraksi dengan sistem secara intuitif dan efisien.

SPK memiliki sejumlah karakteristik yang membedakannya dari sistem informasi lain, antara lain:

- a. Mendukung Keputusan Semi-Terstruktur atau Tidak Terstruktur: SPK dapat digunakan untuk skenario di mana tidak semua parameter keputusan diketahui secara pasti.
- b. Interaktif: Pengguna dapat secara langsung memanipulasi data atau model untuk melihat berbagai hasil simulasi.
- c. Berorientasi pada Dukungan, Bukan Otomatisasi: Fokus SPK adalah mendukung pengguna dalam memahami permasalahan dan alternatif solusi, bukan menggantikan peran manusia.
- d. Mengintegrasikan Data dan Model: Kombinasi data historis dengan model prediktif atau deskriptif memungkinkan pendekatan holistik terhadap pengambilan keputusan.

B. Sejarah dan Perkembangan SPK

Sistem Pendukung Keputusan (SPK) telah menjadi salah satu inovasi teknologi yang mendukung pengambilan keputusan di berbagai sektor. Perkembangannya tidak hanya dipengaruhi oleh kemajuan teknologi informasi, tetapi juga oleh kebutuhan bisnis dan organisasi untuk mengelola informasi dalam proses pengambilan keputusan yang kompleks dan dinamis. Perjalanan SPK dimulai sejak era komputer pertama kali digunakan untuk mendukung pengelolaan data, yang kemudian berkembang menjadi sistem berbasis model dan teknologi cerdas seperti kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*).

1. Fase Awal (1960-an-1970-an): Konseptualisasi dan Eksperimen

Fase awal pengembangan Sistem Pendukung Keputusan (SPK) dimulai pada 1960-an sebagai hasil dari kemajuan penelitian di bidang sains manajemen dan sistem informasi. Pada masa ini, organisasi menghadapi tantangan dalam menyelesaikan masalah yang semakin kompleks akibat pertumbuhan bisnis dan perkembangan teknologi.

2 Sistem Pendukung Keputusan Berbasis Model Dinamik

Konsep awal SPK berakar dari kebutuhan untuk mendukung pengambilan keputusan dengan memanfaatkan teknologi komputer, yang pada saat itu mulai digunakan secara luas di sektor bisnis dan pemerintahan. Sistem ini dirancang untuk membantu manajer dalam mengolah informasi yang relevan untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih efektif.

Gambar 1. *Management Information Systems*



McCarthy (1960) menjadi salah satu pionir yang memperkenalkan konsep *Management Information Systems* (MIS), yaitu sistem informasi yang dirancang untuk menyediakan data dan laporan terstruktur bagi manajer. Meskipun berguna, MIS memiliki keterbatasan karena hanya mampu menangani keputusan yang sepenuhnya terstruktur. Keputusan semacam ini, seperti pengendalian inventori atau pelaporan keuangan, tidak mencakup aspek-aspek yang membutuhkan analisis dinamis atau pertimbangan subjektif. Keterbatasan inilah yang mendorong pengembangan sistem yang lebih fleksibel, yang dapat menangani keputusan semi-terstruktur atau tidak terstruktur.

Pada 1970-an, istilah *Decision Support System* (DSS) mulai digunakan secara luas setelah diadopsi oleh Herbert Simon (1977), yang dikenal sebagai salah satu tokoh utama dalam bidang pengambilan keputusan. Simon mengemukakan bahwa teknologi komputer dapat berfungsi sebagai alat pendukung untuk proses pengambilan keputusan yang kompleks. Ia juga memperkenalkan kerangka keputusan yang melibatkan tiga tahapan utama: intelijen, desain, dan pilihan. Kerangka ini menjadi dasar untuk pengembangan sistem pendukung yang mampu menangani keputusan semi-terstruktur.

2. Fase Pertumbuhan (1980-an): Integrasi Model dan Data

Pada 1980-an, Sistem Pendukung Keputusan (SPK) mengalami kemajuan signifikan, didorong oleh pesatnya perkembangan teknologi komputasi dan perangkat lunak. Periode ini ditandai dengan upaya mengintegrasikan data dan model untuk menciptakan sistem yang mampu memberikan dukungan keputusan yang lebih kompleks dan terinformasi. Salah satu terobosan besar adalah pengembangan arsitektur SPK berbasis tiga komponen utama. Struktur ini menjadi landasan bagi banyak sistem pendukung keputusan modern, memungkinkan pengguna untuk memanfaatkan data, model, dan antarmuka pengguna dalam satu kesatuan sistem.

Komponen pertama, basis data, berfungsi sebagai penyimpanan informasi yang relevan dan terorganisir, yang dapat diakses untuk mendukung analisis. Basis data ini memudahkan pengambilan informasi yang terstruktur dan sistematis, yang merupakan langkah awal dalam proses pengambilan keputusan. Komponen kedua, basis model, memungkinkan sistem untuk mendukung analisis berbasis algoritma, simulasi, dan pemodelan matematis. Melalui basis model ini, pengguna dapat melakukan simulasi skenario, menjalankan algoritma optimasi, dan mengevaluasi berbagai pilihan keputusan berdasarkan data yang tersedia.

Komponen ketiga adalah antarmuka pengguna (*user interface*), yang berperan sebagai penghubung antara pengguna dan sistem. Dengan adanya antarmuka yang intuitif, pengguna non-teknis dapat dengan mudah berinteraksi dengan sistem, memasukkan data, menjalankan simulasi, dan menginterpretasikan hasil analisis. Pengembangan antarmuka yang user-friendly menjadi prioritas pada masa ini, dengan perangkat lunak seperti Lotus 1-2-3 yang mendukung

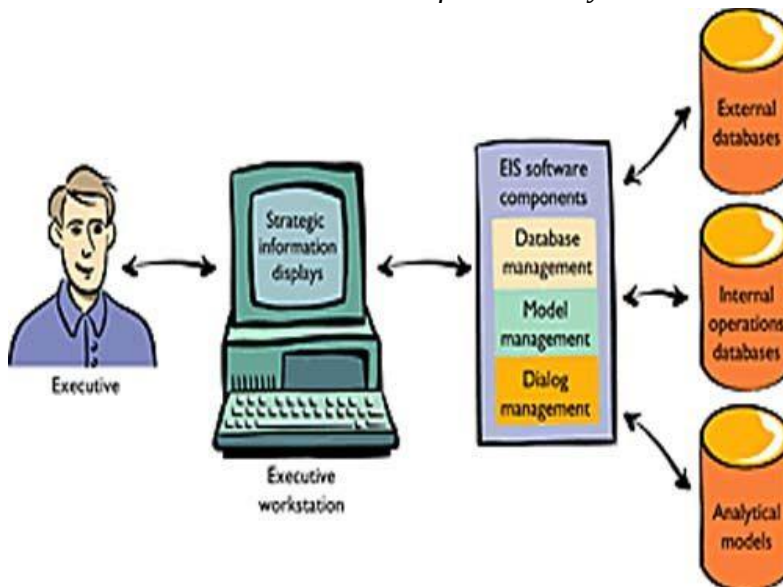
pembuatan keputusan berbasis spreadsheet. Lotus 1-2-3 menjadi alat populer di berbagai sektor, seperti keuangan, manufaktur, dan pemasaran, karena kemampuannya dalam memvisualisasikan data dan mendukung pengolahan angka secara cepat dan fleksibel.

3. Fase Modernisasi (1990-an): Integrasi Teknologi Jaringan dan Web

Pada era 1990-an, Sistem Pendukung Keputusan (SPK) mengalami transformasi besar dengan adopsi teknologi jaringan dan web. Transformasi ini memanfaatkan kemajuan internet yang memungkinkan akses data secara global dan real-time. Sistem yang sebelumnya terpusat pada perangkat keras lokal kini menjadi lebih terdesentralisasi, memungkinkan pengambilan keputusan dilakukan secara fleksibel di berbagai lokasi geografis. Era ini menandai langkah maju dalam kemampuan SPK untuk mendukung organisasi yang semakin terhubung secara global dan membutuhkan aksesibilitas yang tinggi.

Pengembangan *Group Decision Support Systems* (GDSS) pada 1990-an menambahkan dimensi kolaborasi ke dalam proses pengambilan keputusan. GDSS memungkinkan sekelompok individu atau tim untuk berkomunikasi secara digital, berbagi data, dan berkolaborasi dalam menyusun solusi terhadap masalah kompleks. Fitur-fitur seperti forum diskusi, voting elektronik, dan simulasi kelompok menjadi elemen kunci GDSS, yang membuatnya ideal untuk pengambilan keputusan strategis dalam organisasi besar. Sistem ini juga mendorong efisiensi melalui koordinasi yang lebih baik antara berbagai pihak yang terlibat.

Gambar 2. *Executive Information System*



Sumber: *Pin Page*

Contoh aplikasi SPK yang populer pada masa ini adalah *Executive Information System* (EIS). EIS dirancang khusus untuk memenuhi kebutuhan manajer senior dalam memantau kinerja organisasi secara real-time. Sistem ini memberikan informasi strategis dalam format yang mudah diinterpretasikan, seperti dashboard interaktif, grafik, dan laporan kinerja. Dengan dukungan EIS, manajer dapat mengidentifikasi masalah, menganalisis tren, dan membuat keputusan berbasis data dengan lebih cepat dan akurat.

4. Fase Transformasi Digital (2000-an): Big Data dan Kecerdasan Buatan

Memasuki era 2000-an, Sistem Pendukung Keputusan (SPK) mengalami perubahan signifikan dengan adopsi teknologi *big data* dan kecerdasan buatan (AI). Perkembangan ini memungkinkan SPK untuk menangani data dalam jumlah besar dan kompleks, yang sebelumnya sulit diolah dengan teknologi konvensional. Perusahaan besar seperti IBM dan Oracle menjadi pelopor dalam mengembangkan platform SPK berbasis big data dan AI, menawarkan kemampuan analitik yang lebih kuat untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih strategis.

Salah satu fitur utama yang mendefinisikan SPK pada era ini adalah analitik prediktif. Dengan menggunakan algoritma *machine learning*, SPK mampu memproses data historis untuk memprediksi

hasil potensial dari berbagai skenario keputusan. Sebagai contoh, dalam sektor bisnis, SPK dapat digunakan untuk menganalisis pola pembelian konsumen dan memprediksi tren pasar, sehingga memungkinkan perusahaan untuk mengambil keputusan yang lebih tepat dan proaktif. Teknologi ini memberikan nilai tambah dalam mengurangi risiko dan meningkatkan akurasi dalam pengambilan keputusan strategis.

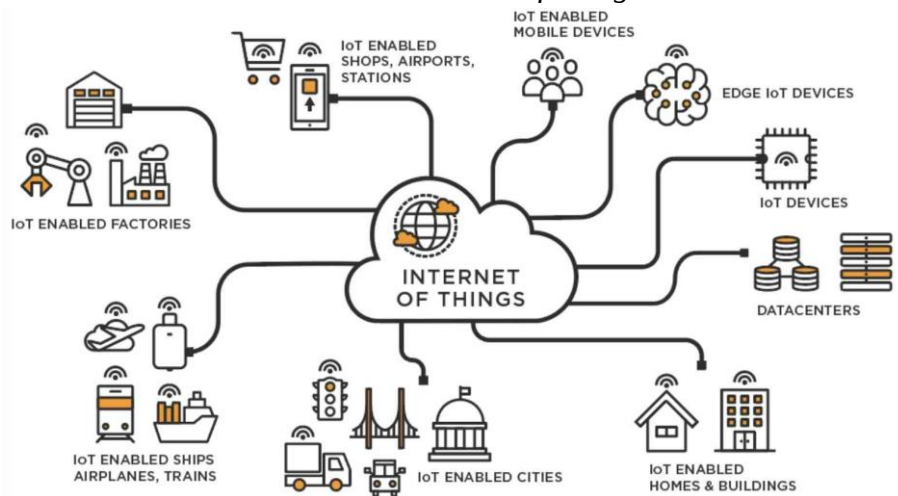
Visualisasi data menjadi elemen penting dalam SPK pada fase transformasi digital ini. Dengan teknologi yang lebih maju, SPK mampu menyajikan data dalam format visual interaktif, seperti grafik, dashboard, dan laporan visual lainnya. Hal ini memudahkan pengguna untuk memahami pola dan hubungan dalam data yang kompleks, sehingga proses pengambilan keputusan menjadi lebih intuitif. Kemampuan visualisasi ini sangat relevan di berbagai sektor, termasuk kesehatan, keuangan, dan logistik, di mana data yang dihasilkan sering kali sangat besar dan rumit.

Fitur penting lainnya adalah kemampuan integrasi sistem. SPK modern dapat dihubungkan dengan sistem lain seperti *Enterprise Resource Planning* (ERP), *Customer Relationship Management* (CRM), dan sistem informasi lainnya untuk menciptakan alur kerja yang lebih terpadu. Dengan integrasi ini, data dari berbagai sumber dapat digabungkan dan dianalisis secara holistik, memberikan pandangan yang lebih komprehensif kepada pengambil keputusan. Kemampuan ini memungkinkan organisasi untuk mengoptimalkan proses operasional dan mencapai efisiensi yang lebih tinggi.

5. Era SPK Canggih (2010–Sekarang): Kecerdasan Buatan dan Komputasi Awan

Memasuki era 2010-an, Sistem Pendukung Keputusan (SPK) mencapai tingkat kecanggihan baru berkat kemajuan teknologi seperti kecerdasan buatan (AI), *Internet of Things* (IoT), dan komputasi awan (*cloud computing*). SPK modern dirancang untuk menjawab tantangan era digital yang penuh dengan ketidakpastian pasar dan kebutuhan pengambilan keputusan yang cepat serta akurat. Kemampuan ini menjadikan SPK alat yang sangat diperlukan dalam berbagai sektor, mulai dari bisnis, pemerintahan, hingga kesehatan.

Gambar 3. *Internet of Things*

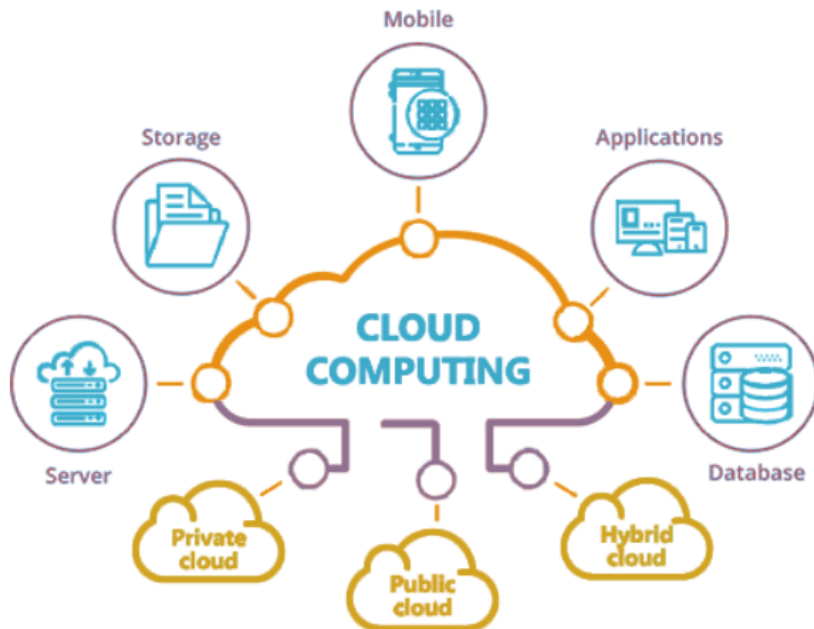


Sumber: *Visiniaga System Integrator*

Salah satu inovasi utama dalam SPK modern adalah penerapan kecerdasan buatan. Dengan menggunakan pembelajaran mesin (*machine learning*) dan algoritma berbasis data, AI meningkatkan kemampuan SPK untuk memahami pola, menganalisis data, dan memberikan rekomendasi keputusan dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi. Sebagai contoh, AI memungkinkan SPK untuk melakukan analisis prediktif yang lebih canggih dalam mengidentifikasi peluang pasar atau mendeteksi risiko operasional. Penelitian oleh Brynjolfsson dan McAfee (2017) menunjukkan bahwa adopsi AI dalam SPK dapat meningkatkan produktivitas dan efisiensi pengambilan keputusan di seluruh organisasi.

Komputasi awan (*cloud computing*) juga berperan penting dalam transformasi SPK. Teknologi ini memungkinkan pengguna untuk mengakses sistem dari berbagai perangkat dan lokasi, memberikan fleksibilitas yang sangat diperlukan di era kerja jarak jauh. Selain itu, cloud computing menawarkan kapasitas pemrosesan data yang besar dan waktu analisis yang cepat, memungkinkan SPK untuk menangani data dalam jumlah besar secara efisien. Layanan berbasis cloud seperti *Amazon Web Services (AWS)* dan *Microsoft Azure* memungkinkan organisasi untuk menjalankan analisis data besar tanpa investasi infrastruktur yang mahal.

Gambar 4. *Cloud Computing*



Sumber: *Nbf Soft Edukasi*

Integrasi *Internet of Things* (IoT) ke dalam SPK semakin memperluas fungsionalitas sistem. IoT menghubungkan perangkat pintar seperti sensor dan mesin ke sistem SPK, memungkinkan pengumpulan data waktu nyata yang dapat digunakan untuk mendukung pengambilan keputusan lebih cepat dan tepat. Sebagai contoh, dalam sektor manufaktur, data IoT dari mesin produksi dapat digunakan untuk memprediksi kegagalan alat sebelum terjadi, sehingga meningkatkan efisiensi operasional.

6. Arah Perkembangan Masa Depan

Sistem Pendukung Keputusan (SPK) terus mengalami evolusi untuk menghadapi tantangan masa depan yang semakin kompleks. Tren global seperti transformasi digital, kebutuhan akan transparansi data, dan kesadaran akan keberlanjutan sosial dan lingkungan menjadi pendorong utama dalam pengembangan teknologi SPK. Arah perkembangan SPK di masa depan akan ditandai oleh integrasi teknologi canggih seperti blockchain, *augmented reality* (AR), dan fokus pada pendekatan berbasis etika. Integrasi blockchain menjadi salah satu inovasi utama yang diharapkan dapat meningkatkan keamanan dan transparansi data dalam SPK. Teknologi blockchain

menawarkan mekanisme penyimpanan data yang desentralisasi, sehingga mencegah manipulasi data oleh pihak tertentu.

Gambar 5. *Augmented Reality*



Sumber: *Ice Institute*

Penggunaan *Augmented Reality* (AR) juga diperkirakan akan menjadi bagian penting dari SPK di masa depan. Teknologi ini memungkinkan pengguna untuk memvisualisasikan skenario keputusan dalam lingkungan virtual yang interaktif. Sebagai contoh, dalam sektor perencanaan kota, AR dapat digunakan untuk mensimulasikan dampak keputusan tata ruang terhadap lingkungan fisik secara real-time. Dengan kemampuan ini, pengambil keputusan dapat lebih memahami konsekuensi dari berbagai opsi sebelum menerapkannya di dunia nyata.

C. Sistem Dinamik dalam Konteks SPK

Sistem dinamik diperkenalkan pertama kali oleh Jay W. Forrester pada 1961 dalam buku *Industrial Dynamics*. Sistem ini mengacu pada pendekatan berbasis simulasi yang digunakan untuk memodelkan, memahami, dan mengelola sistem yang kompleks. Karakteristik utama sistem dinamik meliputi:

1. Interdependensi Variabel: Hubungan antara variabel yang saling memengaruhi.

2. Loop Umpan Balik (*Feedback Loops*): Interaksi antara elemen sistem yang memengaruhi perilaku keseluruhan.
3. Evolusi Waktu: Analisis perubahan sistem secara dinamis berdasarkan waktu.

Penggunaan sistem dinamik dalam SPK menjadi penting karena:

- a. Kompleksitas Sistem

Sistem modern semakin ditandai oleh kompleksitas yang tinggi, terutama dalam pengelolaan berbagai sektor seperti rantai pasok, manajemen sumber daya manusia, dan kebijakan publik. Kompleksitas ini muncul karena adanya banyak elemen yang saling berinteraksi secara dinamis, baik di tingkat lokal maupun global. Misalnya, dalam pengelolaan rantai pasok, perusahaan harus mempertimbangkan berbagai faktor seperti fluktuasi permintaan pasar, keterbatasan pasokan bahan baku, perubahan kebijakan perdagangan internasional, dan risiko geopolitik. Interaksi faktor-faktor ini menjadikan sistem sulit diprediksi dan memerlukan pendekatan yang adaptif.

- b. Kebutuhan untuk Prediksi

Di dunia yang serba cepat dan penuh ketidakpastian, prediksi menjadi sangat penting untuk merencanakan keputusan yang tepat. Sistem dinamik, dengan kemampuannya untuk mensimulasikan skenario "what-if", memungkinkan para pengambil keputusan untuk mengantisipasi dampak dari berbagai tindakan dalam jangka panjang. Dengan menggunakan model matematika yang menggambarkan hubungan antar elemen dalam sebuah sistem, sistem dinamik dapat mensimulasikan berbagai kondisi yang berbeda dan mengevaluasi hasil yang mungkin terjadi, sehingga memberikan gambaran yang lebih jelas tentang potensi konsekuensi dari berbagai pilihan kebijakan atau strategi.

- c. Pengaruh Waktu

Salah satu karakteristik utama dalam sistem dinamik adalah kemampuannya untuk menangani keputusan yang melibatkan variabel yang berubah seiring waktu. Dalam banyak kasus, keputusan yang diambil hari ini dapat memiliki dampak jangka panjang yang bervariasi tergantung pada bagaimana variabel-

variabel tersebut berkembang di masa depan. Sebagai contoh, tren pasar yang fluktuatif atau perubahan iklim yang berkelanjutan bisa memengaruhi hasil keputusan secara dinamis. Dengan menggunakan model sistem dinamik, kita dapat mensimulasikan bagaimana perubahan dalam variabel tersebut akan berlanjut seiring waktu, memberikan wawasan yang lebih baik tentang bagaimana keputusan yang diambil sekarang akan berdampak di masa depan.

D. Manfaat dan Aplikasi SPK Berbasis Sistem Dinamik

Sistem Pendukung Keputusan (SPK) berbasis sistem dinamik merupakan pendekatan yang mengintegrasikan simulasi, prediksi, dan analisis kompleks untuk mendukung pengambilan keputusan di berbagai sektor. Dengan pendekatan ini, pengambil keputusan dapat mengantisipasi dampak jangka panjang dari kebijakan, mengelola risiko, dan memaksimalkan efisiensi sumber daya dalam situasi dinamis dan penuh ketidakpastian (Stermann, 2002). Manfaat utama SPK berbasis sistem dinamik meliputi peningkatan akurasi prediksi, kemampuan untuk membahas skenario "*what-if*," dan pengelolaan sistem yang kompleks. Aplikasi sistem ini sangat luas, termasuk di bidang manajemen rantai pasok, kebijakan publik, pengelolaan lingkungan, dan industri kesehatan.

1. Manfaat SPK Berbasis Sistem Dinamik

- a. Meningkatkan Akurasi dalam Pengambilan Keputusan
SPK berbasis sistem dinamik memungkinkan pengambil keputusan untuk:
 - 1) Menganalisis pola sebab-akibat dalam sistem yang kompleks.
 - 2) Mengidentifikasi potensi dampak jangka panjang dari berbagai keputusan.
 - 3) Mengelola ketidakpastian melalui simulasi skenario yang beragam.

Sebagai contoh dalam pengelolaan risiko keuangan, SPK berbasis sistem dinamik memungkinkan bank untuk memprediksi dampak perubahan suku bunga terhadap portofolio investasi.

- b. **Pemahaman Mendalam terhadap Dinamika Sistem**
Sistem dinamik memodelkan hubungan kompleks antarvariabel dalam sistem. Hal ini memberikan pemahaman mendalam mengenai:
 - 1) Interaksi antara elemen-elemen dalam sistem.
 - 2) Dampak dari umpan balik (*feedback loops*) pada stabilitas dan perubahan sistem.Kemampuan ini sangat berguna dalam bidang seperti perencanaan kota cerdas (*smart cities*), di mana keputusan seperti alokasi transportasi publik memengaruhi banyak aspek masyarakat.
- c. **Simulasi Skenario “What-If”**
Salah satu fitur unggulan dari SPK berbasis sistem dinamik adalah kemampuan untuk mensimulasikan berbagai skenario. Pengguna dapat membahas dampak keputusan yang berbeda dalam berbagai kondisi, memungkinkan untuk memilih opsi terbaik. Misalnya:
 - 1) Pada sektor energi, model simulasi dapat digunakan untuk mengevaluasi dampak kebijakan energi terbarukan terhadap emisi karbon.
- d. **Pengelolaan Risiko yang Lebih Baik**
SPK berbasis sistem dinamik memungkinkan organisasi untuk mengidentifikasi dan mengelola risiko secara proaktif. Dengan memodelkan berbagai skenario, organisasi dapat mempersiapkan langkah mitigasi sebelum risiko menjadi masalah nyata.

2. Aplikasi SPK Berbasis Sistem Dinamik di Berbagai Bidang

- a. **Manajemen Rantai Pasok (*Supply Chain Management*)**
Sistem dinamik membantu perusahaan mengelola rantai pasok dengan lebih efisien melalui:
 - 1) Simulasi fluktuasi permintaan dan penawaran.
 - 2) Identifikasi efek “*bullwhip*” dalam rantai pasok.
 - 3) Optimalisasi tingkat inventaris.
- b. **Kebijakan Publik dan Pemerintahan**
SPK berbasis sistem dinamik digunakan untuk memodelkan dampak kebijakan publik. Aplikasi ini mencakup:
 - 1) Analisis dampak kebijakan pajak terhadap perekonomian.

- 2) Prediksi dampak kebijakan lingkungan terhadap emisi karbon.
- c. Pengelolaan Lingkungan
SPK berbasis sistem dinamik digunakan untuk memodelkan sistem ekologi yang kompleks, seperti:
 - 1) Dampak perubahan iklim terhadap keanekaragaman hayati.
 - 2) Manajemen sumber daya air di wilayah yang rentan kekeringan.
- d. Industri Kesehatan
Pada industri kesehatan, SPK berbasis sistem dinamik digunakan untuk:
 - 1) Mengelola distribusi obat selama krisis kesehatan.
 - 2) Memodelkan dampak kebijakan kesehatan terhadap aksesibilitas layanan.
- e. Energi dan Sumber Daya
SPK berbasis sistem dinamik sering digunakan untuk memodelkan kebijakan energi dan pengelolaan sumber daya, termasuk:
 - 1) Evaluasi dampak kebijakan energi terbarukan.
 - 2) Simulasi konsumsi energi dan emisi karbon dalam jangka panjang.

E. Soal Latihan

1. Jelaskan definisi Sistem Pendukung Keputusan (SPK) dan sebutkan tiga komponen utamanya. Berikan contoh penerapannya dalam bidang bisnis.
2. Jelaskan manfaat utama SPK berbasis sistem dinamik dalam mendukung pengambilan keputusan strategis.
3. Mengapa analisis skenario (*“what-if analysis”*) penting dalam SPK?
4. Bagaimana sistem dinamik membantu mengatasi kompleksitas dalam proses pengambilan keputusan?
5. Berdasarkan perkembangan teknologi saat ini, bagaimana integrasi antara SPK dan kecerdasan buatan dapat meningkatkan kualitas pengambilan keputusan di organisasi?

BAB II

DASAR-DASAR PEMODELAN DAN SIMULASI

Kemampuan Akhir yang Diharapkan

Mampu memahami terkait dengan proses pembuatan model dinamik, memahami pengertian dan manfaat simulasi dalam sistem dinamik, memahami proses pengerjaan simulasi, memahami kelebihan dan kekurangan model simulasi dinamik, memahami klasifikasi model simulasi, sehingga pembaca dapat mampu menerapkan konsep yang dipelajari dalam analisis dan pengembangan solusi yang mendukung pengambilan keputusan secara efektif.

Materi Pembelajaran

- Proses Pembuatan Model Dinamik
- Pengertian dan Manfaat Simulasi dalam Sistem Dinamik
- Proses Pengerjaan Simulasi
- Kelebihan dan Kekurangan Model Simulasi Dinamik
- Klasifikasi Model Simulasi
- Soal Latihan

A. Proses Pembuatan Model Dinamik

Pemodelan dinamik adalah suatu pendekatan untuk menggambarkan bagaimana berbagai elemen dalam sebuah sistem saling berinteraksi dan mempengaruhi satu sama lain selama waktu tertentu. Dalam konteks SPK, pemodelan dinamik digunakan untuk memahami fenomena yang melibatkan umpan balik, interaksi antar komponen, dan perilaku sistem yang berubah seiring waktu (Stermann, 2002). Proses ini berfokus pada identifikasi dan pemodelan hubungan kausal antara berbagai variabel dalam suatu sistem yang mempengaruhi keputusan dan hasilnya.

Tujuan utama dari pembuatan model dinamik adalah untuk memahami bagaimana perubahan dalam satu elemen dapat

mempengaruhi keseluruhan sistem, serta untuk mengidentifikasi pola dan tren yang mungkin tidak terlihat dengan analisis statis. Hal ini penting terutama untuk sistem yang kompleks, seperti manajemen rantai pasok, kebijakan energi, dan pengelolaan lingkungan, di mana perubahan dalam satu bagian sistem dapat menyebabkan dampak yang tidak terduga pada bagian lainnya (Forrester, 1997). Proses pembuatan model dinamik dapat dibagi menjadi beberapa langkah yang sistematis. Berikut adalah langkah-langkah utama yang perlu diikuti dalam pembuatan model dinamik:

1. Identifikasi Masalah dan Tujuan Pemodelan

Langkah pertama yang sangat penting dalam pembuatan model dinamik adalah mengidentifikasi masalah yang akan dimodelkan dan menetapkan tujuan pemodelan yang jelas. Tanpa pemahaman yang baik mengenai masalah yang ingin diselesaikan, proses pemodelan akan kehilangan arah dan relevansi. Dalam konteks manajemen rantai pasok, misalnya, identifikasi masalah dapat berkisar pada permasalahan seperti keterlambatan pengiriman, biaya tinggi, atau ketidakmampuan memenuhi permintaan pasar dengan efisien. Memahami masalah ini memungkinkan pemodel untuk merancang model yang tepat yang mencerminkan dinamika kompleks dalam rantai pasok dan faktor-faktor yang mempengaruhinya (Simchi-Levi *et al.*, 1999).

Setelah masalah teridentifikasi, tujuan pemodelan harus dirumuskan secara spesifik. Dalam hal manajemen rantai pasok, tujuan pemodelan bisa berkisar pada mengurangi biaya logistik, meningkatkan kecepatan pengiriman, atau meminimalkan ketidakseimbangan antara pasokan dan permintaan. Misalnya, sebuah perusahaan mungkin ingin menggunakan model dinamik untuk membahas bagaimana perubahan dalam strategi persediaan dapat mempengaruhi biaya dan kepuasan pelanggan. Tujuan yang jelas akan memberikan fokus yang diperlukan untuk memastikan bahwa model tersebut dirancang untuk menyelesaikan masalah yang paling mendesak dan memberikan hasil yang dapat diukur.

2. Pemilihan Variabel dan Pengidentifikasian Hubungan Kausal

Langkah kedua dalam pembuatan model dinamik adalah pemilihan variabel-variabel yang relevan dan pengidentifikasian hubungan kausal di antara variabel-variabel tersebut. Proses ini dimulai

dengan analisis mendalam terhadap masalah yang ingin diselesaikan dan tujuan yang telah ditetapkan pada tahap sebelumnya. Pemilihan variabel yang tepat sangat krusial, karena variabel-variabel tersebut akan menjadi dasar dalam membangun model dinamik yang mencerminkan realitas sistem yang kompleks. Misalnya, dalam model ekonomi, variabel seperti konsumsi, investasi, tingkat pengangguran, dan inflasi adalah elemen penting yang saling berhubungan (Stermann, 2002).

Hubungan antara variabel-variabel ini harus digambarkan dengan jelas untuk menunjukkan bagaimana perubahan dalam satu variabel dapat memengaruhi variabel lainnya. Ini dilakukan melalui pembuatan diagram sebab-akibat (*causal loop diagram*), yang menggambarkan hubungan dinamis antara elemen-elemen dalam sistem. Dalam diagram ini, tanda panah menunjukkan arah pengaruh antar variabel, sedangkan simbol positif atau negatif menunjukkan jenis hubungan (positif atau negatif). Sebagai contoh, peningkatan investasi dapat menyebabkan peningkatan konsumsi, yang kemudian mendorong pertumbuhan ekonomi dan mengurangi tingkat pengangguran. Sebaliknya, pengangguran yang tinggi dapat menurunkan tingkat konsumsi, menciptakan siklus negatif.

3. Pengembangan Model Dinamik

Setelah hubungan kausal antar variabel dalam sistem berhasil diidentifikasi, langkah berikutnya dalam proses pemodelan dinamik adalah mengembangkan model matematis yang menggambarkan interaksi antar elemen-elemen sistem tersebut. Model ini bertujuan untuk memetakan bagaimana perubahan dalam satu variabel dapat mempengaruhi variabel lainnya sepanjang waktu. Model matematis ini biasanya berupa persamaan diferensial atau persamaan aljabar yang menggambarkan dinamika sistem. Misalnya, dalam model ekonomi, hubungan antara tingkat pengangguran dan inflasi dapat dipahami melalui persamaan yang menggambarkan bagaimana perubahan dalam satu elemen, seperti permintaan pasar, mempengaruhi variabel lainnya (Rahmandad & Sterman, 2008).

Pengembangan model matematis juga melibatkan pemilihan teknik pemodelan yang sesuai dengan karakteristik sistem yang sedang dianalisis. Terdapat dua jenis model utama yang sering digunakan dalam sistem dinamik: model deterministik dan model stokastik. Model

deterministik mengasumsikan bahwa variabel-variabel dalam sistem dapat diprediksi secara pasti berdasarkan nilai-nilai awal dan persamaan yang ada, tanpa adanya elemen ketidakpastian. Sebaliknya, model stokastik memperhitungkan ketidakpastian dalam sistem dengan memperkenalkan variabel acak, yang berguna untuk memodelkan sistem dengan fluktuasi yang tidak dapat diprediksi dengan pasti, seperti perubahan cuaca atau krisis ekonomi.

Pemilihan antara model deterministik dan stokastik sangat bergantung pada sifat sistem yang akan dimodelkan. Untuk sistem yang lebih stabil dan dapat diprediksi, model deterministik sering lebih sesuai, karena memberikan pemahaman yang jelas tentang bagaimana variabel-variabel terkait akan berubah seiring waktu. Di sisi lain, untuk sistem yang lebih kompleks dan dipengaruhi oleh banyak faktor eksternal yang tidak dapat diprediksi, model stokastik lebih efektif karena mampu menangkap ketidakpastian yang ada.

4. Validasi dan Verifikasi Model

Setelah model dinamik dikembangkan, langkah selanjutnya yang sangat penting adalah melakukan verifikasi dan validasi model. Verifikasi adalah proses untuk memastikan bahwa model dibangun dengan benar sesuai dengan desain yang direncanakan dan tidak mengandung kesalahan dalam implementasi matematis atau logika. Proses verifikasi melibatkan pemeriksaan internal model, seperti memastikan bahwa persamaan yang digunakan dalam model sesuai dengan teori atau prinsip yang mendasarinya. Hal ini juga mencakup memastikan bahwa struktur model telah diimplementasikan dengan cara yang tepat dan tidak ada kesalahan dalam perhitungan atau pengkodean algoritma yang digunakan (Pahl *et al.*, 2013).

Sementara verifikasi berfokus pada pemeriksaan apakah model dibangun dengan benar, validasi lebih menitikberatkan pada apakah model tersebut dapat merepresentasikan dunia nyata dengan akurat. Validasi bertujuan untuk memastikan bahwa model yang dikembangkan dapat memberikan hasil yang sesuai dengan realitas atau data historis yang tersedia. Proses ini sering kali melibatkan perbandingan antara hasil simulasi model dengan data empiris atau pengamatan nyata yang telah tercatat. Dengan membandingkan prediksi model dengan hasil yang ada di dunia nyata, kita dapat

mengevaluasi sejauh mana model tersebut dapat dipercaya dalam menggambarkan dinamika sistem yang dimodelkan.

Untuk melakukan validasi, data historis dari sistem yang sedang dianalisis sering digunakan sebagai tolok ukur. Misalnya, jika model yang dikembangkan adalah model ekonomi, maka data ekonomi dari tahun-tahun sebelumnya bisa digunakan untuk menguji apakah model tersebut dapat memprediksi variabel seperti tingkat pengangguran, inflasi, atau GDP dengan tepat. Jika hasil simulasi model mendekati data historis, maka model tersebut dianggap valid. Namun, jika terdapat perbedaan yang signifikan, maka model mungkin perlu disesuaikan untuk mencocokkan realitas yang ada.

5. Simulasi dan Analisis Sensitivitas

Langkah berikutnya adalah menjalankan simulasi untuk mengevaluasi bagaimana sistem akan bereaksi terhadap perubahan dalam parameter-parameter yang ada. Simulasi ini memberikan wawasan tentang bagaimana berbagai faktor dalam sistem berinteraksi satu sama lain dan mempengaruhi hasil akhir. Dalam proses ini, model digunakan untuk menjalankan serangkaian eksperimen yang mencakup perubahan pada variabel-variabel kunci. Misalnya, dalam model ekonomi, perubahan suku bunga, tingkat investasi, atau kebijakan pemerintah dapat dianalisis untuk melihat dampaknya terhadap pertumbuhan ekonomi, pengangguran, atau inflasi. Simulasi memungkinkan pemahaman yang lebih mendalam tentang bagaimana sistem berfungsi dalam berbagai kondisi dan bagaimana kebijakan atau intervensi dapat memengaruhi hasil jangka panjang (Stermann, 2002).

Selama simulasi, berbagai skenario dapat diuji untuk melihat dampaknya terhadap sistem. Setiap skenario mewakili perubahan dalam parameter atau kondisi awal yang berbeda, yang memberikan gambaran yang lebih luas tentang perilaku sistem dalam kondisi yang berbeda. Misalnya, dalam manajemen rantai pasok, berbagai skenario seperti peningkatan permintaan, gangguan pasokan, atau perubahan harga bahan baku dapat diuji untuk menentukan strategi terbaik yang harus diambil. Dengan simulasi ini, pengambil keputusan dapat memahami potensi hasil dari kebijakan atau perubahan yang diusulkan tanpa perlu menunggu kejadian nyata yang sering kali mahal atau sulit diprediksi.

Analisis sensitivitas adalah bagian penting dari proses ini, yang digunakan untuk mengidentifikasi variabel mana yang memiliki pengaruh terbesar terhadap hasil model. Dalam analisis sensitivitas, perubahan kecil pada nilai parameter tertentu diuji untuk melihat bagaimana hal tersebut memengaruhi output model. Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi elemen-elemen sistem yang paling kritis dan menentukan di mana perhatian dan sumber daya harus difokuskan. Misalnya, dalam model dinamik sistem manufaktur, analisis sensitivitas dapat menunjukkan apakah variabel seperti waktu pengiriman atau biaya tenaga kerja memiliki dampak lebih besar terhadap biaya produksi dibandingkan dengan faktor lainnya.

6. Pengambilan Keputusan dan Penerapan Model

Langkah terakhir dalam pemodelan dinamik adalah menggunakan hasil simulasi untuk mendukung pengambilan keputusan. Model yang telah dikembangkan dan disimulasikan memberikan wawasan yang sangat berharga bagi pengambil keputusan dengan mengungkapkan dampak jangka panjang dari berbagai tindakan yang diambil dalam sistem. Dalam konteks sistem pendukung keputusan (SPK), model dinamik memberikan informasi yang memungkinkan pengambil keputusan untuk mengantisipasi berbagai skenario yang mungkin terjadi berdasarkan parameter yang telah dianalisis. Hal ini sangat berguna ketika keputusan yang diambil memiliki dampak yang luas dan kompleks, seperti dalam kebijakan ekonomi, manajemen risiko, atau perencanaan sumber daya.

Pengambilan keputusan yang berbasis model dinamik memungkinkan pengambil keputusan untuk melihat implikasi dari setiap pilihan kebijakan atau strategi dalam jangka panjang, bukan hanya dampak langsung yang terlihat. Sebagai contoh, dalam sektor manufaktur, keputusan terkait perubahan dalam rantai pasok atau investasi dalam teknologi baru dapat dianalisis melalui model dinamik untuk memahami bagaimana hal tersebut akan memengaruhi biaya, waktu produksi, dan tingkat persediaan seiring berjalannya waktu. Dengan demikian, model dinamik membantu pengambil keputusan untuk mengidentifikasi strategi yang paling efisien dan efektif berdasarkan hasil simulasi.

Simulasi dalam sistem dinamik merujuk pada penggunaan model untuk mempelajari bagaimana suatu sistem yang kompleks berfungsi dalam berbagai skenario. Sistem dinamik itu sendiri adalah pendekatan untuk menganalisis sistem yang melibatkan interaksi yang kompleks antara berbagai komponen yang berubah seiring waktu. Komponen-komponen ini saling berinteraksi melalui hubungan sebab-akibat yang menghasilkan pola atau perilaku yang dinamis.

Simulasi berfungsi sebagai alat untuk mereplikasi atau memodelkan dinamika yang ada dalam sistem dunia nyata. Dalam model dinamik, sistem ini terdiri dari stok (nilai yang terakumulasi) dan aliran (perubahan dalam stok) yang saling berinteraksi dalam jangka waktu tertentu. Simulasi dilakukan dengan menjalankan model dalam jangka waktu tertentu untuk mempelajari bagaimana sistem merespons terhadap perubahan parameter dan kebijakan yang diterapkan (Forrester, 1997).

Simulasi memungkinkan untuk melakukan eksperimen "apa-jika" (*what-if analysis*), yang memungkinkan kita untuk menguji bagaimana perubahan dalam satu bagian sistem dapat memengaruhi keseluruhan sistem. Sebagai contoh, dalam model dinamik untuk manajemen rantai pasok, simulasi dapat digunakan untuk menguji dampak perubahan dalam strategi persediaan terhadap biaya dan waktu pengiriman (Sternan, 2002). Simulasi dalam sistem dinamik menawarkan berbagai manfaat yang sangat penting dalam analisis keputusan dan pemodelan. Manfaat-manfaat ini dapat digambarkan sebagai berikut:

1. Pemahaman yang Lebih Baik terhadap Sistem yang Kompleks

Salah satu manfaat utama dari simulasi dalam sistem dinamik adalah kemampuannya untuk membantu memahami sistem yang kompleks. Sistem yang melibatkan banyak elemen dan hubungan antar elemen sering kali sulit untuk dipahami hanya dengan analisis statis atau teori. Simulasi memungkinkan para peneliti dan pengambil keputusan untuk melihat bagaimana sistem berfungsi sebagai kesatuan yang saling terhubung dan berubah dari waktu ke waktu (Rahmandad & Sternan, 2008). Misalnya, dalam model dinamik untuk kebijakan energi, berbagai variabel seperti konsumsi energi, biaya produksi, dan emisi gas rumah kaca saling berinteraksi. Dengan menggunakan

simulasi, kita dapat melihat bagaimana kebijakan tertentu akan memengaruhi masing-masing variabel tersebut, serta bagaimana efek-efek ini akan berkembang dalam jangka panjang.

2. Mengidentifikasi Pola dan Tren dalam Sistem

Simulasi juga sangat berguna untuk mengidentifikasi pola dan tren yang mungkin tidak langsung terlihat dari data historis. Dalam banyak sistem dinamik, perubahan dalam satu bagian sistem dapat menghasilkan dampak yang berkelanjutan atau bahkan memunculkan pola yang tidak terduga. Dengan menjalankan simulasi, kita dapat mengamati bagaimana sistem berperilaku dalam berbagai skenario dan memperoleh wawasan tentang pola atau tren yang mungkin sulit dilihat melalui analisis data biasa (Stermann, 2002). Misalnya, dalam analisis kebijakan ekonomi, simulasi dapat digunakan untuk mempelajari bagaimana kebijakan fiskal atau moneter dapat memengaruhi tingkat pengangguran, inflasi, atau pertumbuhan ekonomi dalam jangka panjang. Melalui simulasi, pengambil keputusan dapat memahami pola dampak kebijakan yang sebelumnya mungkin tidak terlihat.

3. Evaluasi Kebijakan dan Pengambilan Keputusan yang Lebih Baik

Simulasi memungkinkan pengambil keputusan untuk mengevaluasi berbagai kebijakan dan pilihan tindakan yang mungkin diterapkan dalam sistem. Dalam sistem dinamik, perubahan dalam satu elemen sistem dapat memengaruhi elemen lainnya dalam cara yang sangat kompleks. Dengan melakukan simulasi "apa-jika," kita dapat mengevaluasi bagaimana berbagai kebijakan atau keputusan akan mempengaruhi sistem secara keseluruhan, yang membantu pengambil keputusan untuk memilih kebijakan terbaik. Misalnya, dalam konteks manajemen sumber daya alam, simulasi dapat digunakan untuk menilai dampak dari kebijakan pengelolaan yang berbeda terhadap kelangsungan jangka panjang dari suatu ekosistem. Hal ini memungkinkan para pembuat kebijakan untuk memahami implikasi jangka panjang dari keputusannya, dan memilih kebijakan yang paling menguntungkan atau paling berkelanjutan.

4. Pengurangan Ketidakpastian dan Risiko

Salah satu tantangan utama dalam pengambilan keputusan adalah ketidakpastian dan risiko. Dalam banyak sistem dinamik,

parameter dan variabel yang terlibat dapat sangat berubah-ubah dan sulit diprediksi. Namun, dengan menggunakan simulasi, kita dapat mengurangi ketidakpastian ini dengan memodelkan berbagai kemungkinan skenario dan mengevaluasi dampaknya terhadap hasil sistem (Simchi-Levi *et al.*, 1999). Sebagai contoh, dalam analisis kebijakan fiskal, simulasi dapat digunakan untuk memodelkan dampak dari perubahan pajak atau pengeluaran pemerintah dalam berbagai kondisi ekonomi. Dengan cara ini, pengambil keputusan dapat mengidentifikasi potensi risiko dan merencanakan langkah-langkah mitigasi untuk mengurangi dampak buruk yang mungkin terjadi.

5. Pemodelan dan Pengujian Skenario Masa Depan

Simulasi memungkinkan untuk memodelkan dan menguji skenario masa depan yang beragam, yang sangat penting dalam pengambilan keputusan strategis. Dengan menggunakan simulasi, pengambil keputusan dapat menguji berbagai opsi dan strategi yang berbeda dalam menghadapi ketidakpastian masa depan, serta memahami bagaimana sistem akan bereaksi terhadap perubahan-perubahan tersebut. Misalnya, dalam analisis risiko keuangan, simulasi dapat digunakan untuk menguji berbagai skenario investasi dan bagaimana akan memengaruhi kestabilan keuangan perusahaan dalam kondisi pasar yang berubah-ubah. Simulasi juga dapat digunakan untuk mengevaluasi dampak perubahan iklim terhadap sektor-sektor industri tertentu, serta merencanakan langkah-langkah mitigasi yang diperlukan.

C. Proses Pengerjaan Simulasi

Proses pengerjaan simulasi adalah langkah-langkah yang dilakukan untuk membangun dan menjalankan model simulasi dengan tujuan untuk memperoleh informasi atau wawasan terkait perilaku suatu sistem dalam kondisi tertentu. Dalam konteks pemodelan sistem dinamik, pengerjaan simulasi melibatkan beberapa tahapan yang dimulai dengan pemahaman tentang sistem yang akan dimodelkan, kemudian pengumpulan data, pembuatan model, simulasi eksperimen, hingga analisis hasil simulasi untuk mengambil keputusan yang lebih baik. Setiap tahapan ini memiliki peran penting dalam memastikan bahwa simulasi yang dijalankan dapat memberikan hasil yang valid dan

bermanfaat. Proses pengerjaan simulasi dapat dibagi menjadi beberapa tahapan utama yang mencakup perencanaan, pemodelan, verifikasi dan validasi model, eksekusi simulasi, dan analisis hasil. Setiap tahapan memiliki tujuan tertentu untuk memastikan bahwa model simulasi yang dibangun dapat menggambarkan sistem yang sesungguhnya dengan tepat.

1. Perencanaan Simulasi

Perencanaan simulasi adalah langkah pertama yang sangat penting dalam pengerjaan simulasi. Pada tahap ini, tujuan dan ruang lingkup simulasi ditentukan secara jelas. Beberapa pertanyaan yang harus dijawab pada tahap ini antara lain:

- a. Apa tujuan utama simulasi? Tujuan bisa beragam, mulai dari memprediksi perilaku sistem di masa depan, mengevaluasi kebijakan yang diterapkan, hingga mengoptimalkan operasi sistem.
- b. Apa saja variabel dan parameter yang relevan? Dalam pemodelan dinamik, penting untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi perilaku sistem.
- c. Apa batasan dari simulasi ini? Pada tahap perencanaan, juga penting untuk menetapkan batasan mengenai ruang lingkup model, seperti area atau proses yang akan dimasukkan dalam simulasi dan mana yang akan dikesampingkan.

Pada perencanaan ini, para pemangku kepentingan (misalnya, manajer, analis, atau ilmuwan) bekerja sama untuk merumuskan model yang akan dikembangkan. Keputusan yang dibuat pada tahap perencanaan akan mempengaruhi keakuratan dan kegunaan hasil simulasi (Stermann, 2002).

2. Pemodelan Sistem

Tahap selanjutnya adalah pemodelan sistem itu sendiri. Pemodelan sistem adalah proses untuk menggambarkan sistem nyata dalam bentuk model matematika atau logika. Dalam simulasi sistem dinamik, model biasanya mencakup komponen stok (akumulasi) dan aliran (perubahan stok), serta hubungan antar komponen tersebut. Proses pemodelan ini melibatkan beberapa langkah:

- a. Identifikasi Variabel Utama

Identifikasi variabel utama dalam pemodelan sistem dinamik adalah langkah pertama yang sangat penting karena akan menentukan fondasi untuk seluruh analisis. Variabel utama ini biasanya terbagi menjadi dua kategori besar: stok dan aliran. Stok merujuk pada komponen yang menyimpan atau menampung nilai dalam sistem, seperti jumlah produk yang tersedia di gudang, jumlah uang yang ada di sistem ekonomi, atau populasi dalam suatu populasi biologis. Aliran, di sisi lain, menggambarkan perubahan atau pergerakan nilai stok tersebut, seperti jumlah barang yang diproduksi atau dipindahkan, aliran uang dalam transaksi ekonomi, atau tingkat kelahiran dan kematian dalam suatu populasi.

Variabel utama dalam sistem dinamik juga mencakup parameter-parameter yang mempengaruhi hubungan antar komponen, seperti laju pertumbuhan, kecepatan pergerakan aliran, dan faktor eksternal lainnya. Misalnya, dalam model ekonomi, faktor seperti tingkat suku bunga, kebijakan fiskal, dan konsumsi masyarakat dapat mempengaruhi aliran uang dalam sistem. Oleh karena itu, identifikasi variabel utama ini harus dilakukan dengan hati-hati untuk memastikan bahwa semua elemen penting dalam sistem telah tercakup.

b. Definisi Hubungan Antar Komponen

Setelah variabel utama dalam sistem dinamik diidentifikasi, langkah berikutnya adalah mendefinisikan hubungan antar komponen tersebut. Hubungan ini menggambarkan bagaimana variabel-variabel saling berinteraksi dan mempengaruhi satu sama lain. Dalam pemodelan sistem dinamik, hubungan ini sering kali berupa hubungan sebab-akibat yang menggambarkan bagaimana perubahan dalam satu variabel dapat menyebabkan perubahan pada variabel lainnya. Sebagai contoh, dalam model ekonomi, peningkatan konsumsi dapat meningkatkan permintaan barang, yang pada gilirannya meningkatkan produksi dan pasokan barang dalam sistem.

Proses mendefinisikan hubungan antar komponen melibatkan pemahaman yang mendalam tentang dinamika sistem tersebut. Ini termasuk mengenali bagaimana suatu variabel dapat mempengaruhi variabel lainnya secara langsung atau tidak langsung, serta memahami adanya *feedback loop* (umpan balik).

Feedback ini dapat berupa penguatan (*positive feedback*) atau penyeimbang (*negative feedback*). Misalnya, dalam sistem ekologi, peningkatan populasi predator dapat mengurangi populasi mangsa, yang kemudian mempengaruhi kelangsungan hidup predator itu sendiri. Hal ini menunjukkan pentingnya menggambarkan hubungan secara cermat untuk mencerminkan realitas sistem yang lebih akurat.

c. Pengembangan Persamaan Dinamik

Langkah berikutnya adalah mengembangkan persamaan dinamik yang menggambarkan bagaimana perubahan dalam satu variabel mempengaruhi variabel lainnya seiring waktu. Persamaan dinamik ini umumnya berupa persamaan diferensial atau aljabar yang menggambarkan hubungan perubahan variabel secara kuantitatif. Dalam pemodelan sistem dinamik, persamaan ini tidak hanya mencakup hubungan linier, tetapi juga dapat mencakup hubungan non-linier yang lebih kompleks, tergantung pada sifat interaksi antar variabel yang ada dalam sistem.

Sebagai contoh dalam model ekonomi yang melibatkan permintaan dan penawaran, perubahan harga dapat memengaruhi jumlah barang yang diminta, yang pada gilirannya mempengaruhi tingkat produksi dan pasokan barang. Persamaan dinamik untuk menggambarkan hubungan ini mungkin melibatkan perubahan dalam waktu tertentu yang bergantung pada nilai variabel lainnya, seperti harga, jumlah barang yang tersedia, dan tingkat konsumsi. Dalam model tersebut, persamaan akan menggambarkan bagaimana harga atau permintaan berubah sebagai respons terhadap variasi dalam stok atau aliran.

3. Verifikasi dan Validasi Model

Verifikasi dan validasi model adalah dua proses yang sangat penting untuk memastikan bahwa model yang dibangun dapat dipercaya dan mencerminkan kenyataan sistem yang dimodelkan.

a. Verifikasi

Verifikasi adalah langkah pertama dalam memastikan bahwa model yang dibangun sesuai dengan tujuan yang telah

ditetapkan. Proses ini bertujuan untuk memeriksa apakah struktur dan logika model telah diterapkan dengan benar. Dalam konteks sistem dinamik, verifikasi melibatkan pengecekan apakah hubungan antar variabel sudah sesuai dengan yang diinginkan dan apakah persamaan dinamik yang digunakan mencerminkan sistem yang dimodelkan. Selain itu, verifikasi juga memastikan bahwa model tidak mengandung kesalahan teknis yang dapat mempengaruhi hasil analisis. Hal ini mencakup pemeriksaan kesalahan dalam kode atau pemrograman, serta memastikan bahwa input dan output model konsisten.

Pada tahap verifikasi, berbagai teknik dapat digunakan untuk memeriksa kesalahan dalam model, seperti analisis sensitivitas terhadap perubahan kecil pada variabel input untuk melihat apakah model tetap memberikan hasil yang konsisten. Proses ini juga mencakup uji unit dan uji integrasi untuk memeriksa bagian-bagian model secara terpisah dan secara keseluruhan. Selain itu, verifikasi sering melibatkan perbandingan hasil model dengan skenario yang lebih sederhana atau dengan model lain yang sudah teruji untuk memastikan bahwa model yang dibangun tidak menghasilkan output yang bertentangan dengan ekspektasi atau teori yang ada.

b. Validasi

Validasi adalah langkah krusial dalam memastikan bahwa model yang telah dikembangkan benar-benar mencerminkan dinamika dunia nyata yang ingin dianalisis. Pada tahap ini, fokus utama adalah membandingkan hasil simulasi dari model dengan data nyata atau observasi yang ada untuk mengevaluasi sejauh mana model dapat merepresentasikan sistem yang dimodelkan. Jika model menghasilkan prediksi atau perilaku yang tidak sesuai dengan data aktual, ini menunjukkan bahwa model mungkin perlu diperbaiki atau dikembangkan lebih lanjut untuk mencocokkan realitas.

Proses validasi dapat dilakukan dengan beberapa pendekatan, salah satunya adalah dengan menggunakan data historis untuk memverifikasi bahwa model dapat menghasilkan hasil yang serupa dengan kejadian-kejadian yang telah tercatat. Misalnya, dalam model ekonomi, hasil simulasi mengenai fluktuasi pasar

atau pengangguran harus dibandingkan dengan data ekonomi historis untuk memastikan akurasi model. Validasi ini juga dapat melibatkan pengujian model dalam kondisi yang berbeda, dengan tujuan memastikan bahwa model dapat bekerja di berbagai situasi dan kondisi dunia nyata yang bervariasi.

4. Eksekusi Simulasi

Tahap berikutnya adalah eksekusi simulasi. Pada tahap ini, model yang telah dibangun akan dijalankan untuk mempelajari perilaku sistem berdasarkan input yang diberikan. Eksekusi simulasi biasanya dilakukan dalam beberapa iterasi untuk menggali berbagai skenario yang berbeda. Beberapa langkah yang dilakukan pada tahap ini antara lain:

a. Pemilihan Parameter Input

Pemilihan parameter input merupakan tahap awal yang sangat penting dalam eksekusi simulasi sistem dinamik. Sebelum menjalankan simulasi, perlu ditentukan sejumlah parameter yang akan digunakan sebagai input dalam model. Parameter-parameter ini meliputi waktu simulasi, yang menentukan durasi eksperimen, serta kondisi awal dari setiap variabel yang terlibat dalam sistem. Misalnya, dalam model ekonomi, kondisi awal bisa berupa tingkat inflasi, tingkat pengangguran, atau volume investasi yang ada di awal periode. Penetapan kondisi awal yang akurat penting untuk memastikan bahwa hasil simulasi mencerminkan keadaan dunia nyata dengan baik.

Pemilihan nilai-nilai lainnya, seperti parameter model yang mengatur laju perubahan variabel, juga perlu diperhatikan. Dalam banyak kasus, nilai-nilai ini dapat didasarkan pada data historis atau perkiraan yang dilakukan oleh ahli di bidang terkait. Misalnya, dalam model pertumbuhan populasi, parameter seperti laju kelahiran dan kematian harus ditentukan berdasarkan data empiris atau estimasi yang valid. Keputusan tentang nilai parameter ini sangat mempengaruhi hasil simulasi dan, pada gilirannya, keakuratan prediksi yang dihasilkan oleh model.

b. Menjalankan Simulasi

Menjalankan simulasi adalah tahap penting dalam eksekusi model dinamik, di mana komputer mengimplementasikan

persamaan matematika yang telah dikembangkan untuk menghitung dan menghasilkan output berdasarkan parameter yang telah ditentukan. Pada tahap ini, model sistem dinamik yang sudah dikembangkan akan diuji dalam berbagai kondisi dan skenario. Proses ini memungkinkan pengamat untuk melihat bagaimana sistem bereaksi terhadap perubahan variabel dan untuk mengidentifikasi pola atau tren yang muncul selama periode waktu tertentu. Dengan menjalankan simulasi, kita dapat mendapatkan wawasan lebih mendalam mengenai dinamika sistem dan menguji asumsi yang digunakan dalam model.

Simulasi biasanya dijalankan dengan mempertimbangkan berbagai skenario yang relevan, yang mencakup perubahan dalam variabel input atau kondisi sistem. Misalnya, dalam model ekonomi, simulasi dapat dilakukan dengan mengganti tingkat pengeluaran pemerintah, suku bunga, atau variabel makroekonomi lainnya. Hasil dari simulasi ini dapat menggambarkan bagaimana sistem akan berkembang dalam jangka panjang berdasarkan kebijakan atau perubahan yang diterapkan. Melalui proses ini, pengambil keputusan dapat memperoleh gambaran yang lebih jelas tentang potensi dampak dari keputusan atau tindakan yang diambil, sebelum mengimplementasikannya di dunia nyata.

c. Eksperimen "apa-jika"

Eksperimen "apa-jika" adalah salah satu aspek penting dalam eksekusi simulasi yang memungkinkan pengambil keputusan untuk mengevaluasi bagaimana perubahan tertentu dalam variabel input mempengaruhi sistem secara keseluruhan. Dalam eksperimen ini, berbagai nilai parameter atau kondisi sistem diuji untuk melihat potensi dampak dari perubahan tersebut. Misalnya, dalam model bisnis, eksperimen ini bisa mencakup perubahan tingkat permintaan produk, biaya produksi, atau kebijakan harga. Tujuan dari eksperimen "apa-jika" adalah untuk memahami bagaimana variasi dalam satu atau beberapa parameter dapat memengaruhi hasil dan untuk mengidentifikasi kebijakan terbaik yang dapat diterapkan.

Dengan eksperimen "apa-jika", pengambil keputusan dapat mengevaluasi beberapa skenario tanpa harus melakukan

eksperimen langsung di dunia nyata yang memerlukan sumber daya besar dan waktu yang lama. Contohnya, perusahaan dapat menguji bagaimana perubahan dalam biaya bahan baku atau kenaikan harga akan mempengaruhi keuntungan atau permintaan pasar. Dengan menjalankan simulasi untuk berbagai skenario, pengambil keputusan mendapatkan informasi yang lebih kaya dan lebih mendalam, yang membantu dalam perencanaan dan pengambilan keputusan yang lebih informasional dan berbasis data.

5. Analisis Hasil Simulasi

Setelah simulasi dijalankan, hasilnya perlu dianalisis untuk menarik kesimpulan dan membuat rekomendasi. Analisis hasil melibatkan beberapa kegiatan penting:

- a. Interpretasi data: Hasil simulasi biasanya berupa data yang sangat besar dan kompleks. Oleh karena itu, penting untuk mengolah dan menganalisis data tersebut untuk menemukan pola atau tren yang signifikan.
- b. Evaluasi hasil simulasi: Evaluasi ini bertujuan untuk menentukan apakah hasil simulasi memberikan wawasan yang berguna untuk pengambilan keputusan atau perbaikan sistem.
- c. Rekomendasi kebijakan: Berdasarkan hasil simulasi, pengambil keputusan dapat merumuskan rekomendasi kebijakan atau tindakan untuk meningkatkan kinerja sistem.

Analisis hasil sangat bergantung pada keterampilan dalam mengolah data dan kemampuan untuk menginterpretasikan dampak dari perubahan dalam sistem terhadap hasil yang diinginkan.

D. Kelebihan dan Kekurangan Model Simulasi Dinamik

Simulasi dinamik, terutama dalam konteks sistem dinamik, merupakan alat yang sangat berharga dalam memodelkan dan menganalisis perilaku sistem yang kompleks dan dinamis. Model simulasi dinamik digunakan untuk memahami interaksi antar berbagai komponen dalam sistem, serta untuk memprediksi bagaimana sistem tersebut akan berkembang seiring waktu di bawah berbagai skenario dan kebijakan. Meskipun metode ini menawarkan banyak keuntungan,

ada juga keterbatasan yang perlu dipahami agar penggunaannya dapat dioptimalkan.

1. Kelebihan Model Simulasi Dinamik

Simulasi dinamik memiliki banyak kelebihan yang membuatnya sangat berguna dalam berbagai bidang, mulai dari perencanaan kebijakan hingga pengelolaan sumber daya. Beberapa keuntungan utama dari model simulasi dinamik antara lain:

a. Kemampuan untuk Menangani Kompleksitas Sistem

Salah satu keuntungan terbesar dari model simulasi dinamik adalah kemampuannya untuk menangani sistem yang sangat kompleks. Sistem dinamik sering kali melibatkan banyak komponen yang saling berinteraksi dalam cara yang non-linear, sehingga sulit untuk dianalisis menggunakan metode analitik tradisional. Simulasi dinamik memungkinkan peneliti dan praktisi untuk menggambarkan dan menganalisis interaksi kompleks ini dengan cara yang lebih intuitif dan terperinci.

Misalnya, dalam konteks ekonomi, simulasi dinamik digunakan untuk memodelkan hubungan antara faktor-faktor ekonomi seperti inflasi, pengangguran, dan investasi, yang semuanya saling memengaruhi dalam cara yang kompleks. Dengan simulasi, kita dapat melihat bagaimana perubahan dalam satu faktor dapat mempengaruhi keseluruhan sistem seiring waktu.

b. Prediksi Perilaku Sistem dalam Jangka Panjang

Model simulasi dinamik memungkinkan kita untuk memprediksi perilaku suatu sistem dalam jangka panjang. Hal ini sangat berguna dalam perencanaan strategis, seperti perencanaan kebijakan publik, pengelolaan lingkungan, dan perencanaan sumber daya alam. Misalnya, dalam pengelolaan perubahan iklim, simulasi dinamik digunakan untuk memodelkan dampak dari kebijakan pengurangan emisi gas rumah kaca dan bagaimana kebijakan tersebut dapat mempengaruhi suhu global dalam jangka waktu beberapa dekade.

c. Eksperimen "What-If" dan Analisis Sensitivitas

Simulasi dinamik memungkinkan eksperimen "what-if" (apa jika) yang berguna untuk mengevaluasi dampak dari perubahan tertentu dalam sistem. Para pengambil keputusan dapat mengubah variabel input, seperti tingkat permintaan atau kebijakan harga, dan melihat bagaimana sistem bereaksi terhadap perubahan tersebut. Ini memberikan wawasan yang

lebih dalam tentang cara-cara yang dapat diambil untuk mencapai hasil yang diinginkan. Analisis sensitivitas juga merupakan aspek penting dari simulasi dinamik. Dengan menganalisis bagaimana perubahan kecil dalam input dapat memengaruhi output, model ini membantu pengambil keputusan untuk memahami risiko dan ketidakpastian dalam keputusan yang dibuat (Rahmandad & Sterman, 2008).

d. Pengujian dan Evaluasi Kebijakan atau Proses

Simulasi dinamik memberikan alat yang efektif untuk menguji kebijakan atau strategi baru sebelum diimplementasikan. Hal ini sangat berguna dalam kebijakan publik, pengelolaan sumber daya, dan perencanaan strategis. Misalnya, pemerintah dapat menggunakan simulasi untuk mengevaluasi dampak dari kebijakan fiskal atau kebijakan lingkungan sebelum menerapkannya dalam dunia nyata. Simulasi juga memungkinkan evaluasi kebijakan yang sudah ada untuk mengidentifikasi area-area yang perlu diperbaiki. Dengan menguji berbagai skenario dan parameter dalam model, para pengambil keputusan dapat menilai berbagai kemungkinan hasil dan memilih kebijakan yang paling efektif (Sterman, 2002).

e. Visualisasi dan Pemahaman Sistem yang Lebih Baik

Simulasi dinamik sering kali dilengkapi dengan alat visualisasi yang memungkinkan pengguna untuk melihat bagaimana sistem berkembang dari waktu ke waktu. Ini sangat berguna dalam memahami perilaku sistem yang sulit dijelaskan secara verbal atau matematis. Misalnya, grafik atau diagram yang menunjukkan hubungan antara stok dan aliran dalam sistem dapat membantu para pembuat keputusan untuk memvisualisasikan bagaimana perubahan dalam satu bagian sistem dapat mempengaruhi bagian lainnya. Visualisasi ini tidak hanya memudahkan pemahaman konsep-konsep yang kompleks, tetapi juga membantu dalam komunikasi hasil simulasi kepada berbagai pemangku kepentingan, termasuk pembuat kebijakan, manajer, dan publik (Forrester, 1997).

2. Kekurangan Model Simulasi Dinamik

Meskipun model simulasi dinamik menawarkan banyak keuntungan, ada beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan

ketika menggunakan model ini. Kekurangan utama dari simulasi dinamik antara lain:

a. Ketergantungan pada Data yang Akurat dan Relevan

Model simulasi dinamik sangat bergantung pada data yang akurat dan relevan untuk menghasilkan hasil yang valid. Jika data yang digunakan untuk membangun model tidak lengkap, tidak akurat, atau tidak relevan dengan sistem yang sedang dianalisis, hasil simulasi bisa menjadi bias atau tidak dapat diandalkan. Misalnya, dalam simulasi yang digunakan untuk perencanaan sumber daya alam, data yang tidak akurat mengenai jumlah sumber daya yang tersedia dapat menghasilkan prediksi yang salah mengenai kelangkaan atau kelebihan sumber daya tersebut. Pengumpulan data yang tepat waktu dan relevan sering kali menjadi tantangan dalam banyak aplikasi simulasi dinamik, terutama untuk sistem yang sangat kompleks dan dinamis (Altiok & Melamed, 2010).

b. Kompleksitas Model yang Tinggi

Pembuatan model simulasi dinamik yang akurat dapat sangat kompleks, terutama untuk sistem yang sangat besar atau memiliki banyak komponen yang saling berinteraksi. Model yang sangat kompleks bisa memerlukan banyak waktu dan sumber daya untuk dikembangkan, serta sulit untuk diinterpretasikan atau divalidasi. Selain itu, semakin kompleks model, semakin besar kemungkinan model tersebut menjadi tidak transparan atau sulit dipahami. Hal ini dapat menghambat penggunaannya oleh pengambil keputusan yang mungkin tidak memiliki latar belakang teknis yang mendalam.

c. Ketidakpastian dan Variabilitas Hasil

Meskipun simulasi dinamik dapat memberikan wawasan yang berharga, hasilnya sering kali disertai dengan ketidakpastian dan variabilitas. Faktor-faktor acak, seperti fluktuasi ekonomi atau perilaku manusia yang tidak terduga, dapat mempengaruhi hasil simulasi. Meskipun eksperimen "what-if" dan analisis sensitivitas dapat membantu untuk memahami ketidakpastian ini, hasil simulasi masih dapat bervariasi tergantung pada asumsi dan parameter yang digunakan. Keterbatasan ini memerlukan perhatian ekstra dalam interpretasi hasil simulasi,

terutama ketika mengambil keputusan yang berisiko tinggi atau melibatkan banyak pemangku kepentingan.

d. Waktu dan Biaya yang Dibutuhkan

Proses pembuatan model simulasi dinamik yang akurat dan relevan sering kali memerlukan waktu dan biaya yang cukup besar. Pemodelan yang melibatkan banyak komponen dan interaksi dapat menjadi sangat memakan waktu dan memerlukan perangkat lunak serta keahlian teknis yang khusus. Selain itu, dalam beberapa kasus, verifikasi dan validasi model juga bisa sangat memakan biaya, terutama jika melibatkan eksperimen lapangan atau pengumpulan data tambahan. Bagi banyak organisasi, biaya dan waktu yang diperlukan untuk menjalankan simulasi dinamik dapat menjadi hambatan yang signifikan, terutama jika hasil simulasi tidak dapat memberikan manfaat yang sebanding dengan investasi yang dikeluarkan.

e. Kesulitan dalam Verifikasi dan Validasi Model

Verifikasi dan validasi model adalah dua aspek yang sangat penting dalam simulasi dinamik, namun keduanya sering kali menjadi tantangan besar. Verifikasi berfokus pada keakuratan teknis model, sedangkan validasi memastikan bahwa model tersebut mencerminkan realitas sistem yang sedang dianalisis. Kedua proses ini sangat penting untuk memastikan bahwa hasil simulasi dapat dipercaya dan digunakan dalam pengambilan keputusan. Namun, dalam banyak kasus, sulit untuk memperoleh data yang cukup untuk melakukan validasi model yang tepat. Selain itu, dalam beberapa sistem yang sangat kompleks, mungkin tidak ada cara yang jelas untuk memverifikasi atau memvalidasi model secara sempurna, yang dapat menyebabkan ketidakpastian dalam hasil simulasi.

E. Klasifikasi Model Simulasi

Model simulasi adalah representasi dari sistem nyata yang digunakan untuk menganalisis perilaku sistem tersebut dalam kondisi yang berbeda. Dalam bidang ilmu komputer, rekayasa, ekonomi, dan ilmu sosial, pemodelan dan simulasi memiliki peran yang sangat penting dalam memahami dan mengelola sistem yang kompleks. Pemodelan simulasi membantu dalam pengambilan keputusan,

perencanaan, dan evaluasi kebijakan dengan memberikan gambaran tentang bagaimana suatu sistem berfungsi tanpa perlu menguji skenario secara langsung di dunia nyata.

1. Klasifikasi Berdasarkan Tipe Sistem

Simulasi dapat diklasifikasikan berdasarkan tipe sistem yang dimodelkan. Dalam hal ini, sistem dibedakan menjadi sistem deterministik dan sistem stokastik.

a. Model Simulasi Deterministik

Model simulasi deterministik adalah jenis model yang mengasumsikan bahwa semua variabel dalam sistem bersifat pasti dan tidak ada elemen ketidakpastian yang mempengaruhi hasil. Dalam model ini, jika parameter yang sama dimasukkan ke dalam sistem pada dua kesempatan yang berbeda, hasil yang diperoleh akan selalu identik. Hal ini membuat model deterministik sangat berguna ketika hubungan antar variabel dalam sistem sangat jelas dan tidak melibatkan variasi acak. Misalnya, dalam simulasi manufaktur atau aliran produksi, jika kondisi awalnya tidak berubah, maka jalannya proses produksi juga akan tetap konsisten dari waktu ke waktu.

Salah satu contoh aplikasi dari model simulasi deterministik adalah perencanaan logistik. Dalam hal ini, model dapat digunakan untuk mengoptimalkan aliran barang dari satu titik ke titik lainnya dalam jaringan distribusi. Variabel seperti waktu pengiriman, kapasitas penyimpanan, dan jumlah kendaraan yang digunakan dapat dimodelkan dengan menggunakan hubungan yang pasti dan terukur. Model ini sangat membantu dalam merencanakan pengiriman barang dan memastikan efisiensi operasional, karena hasilnya dapat diprediksi dengan akurat berdasarkan input yang telah ditentukan.

b. Model Simulasi Stokastik

Model simulasi stokastik berbeda dengan model deterministik dalam hal ketidakpastian yang terlibat dalam proses yang dimodelkan. Dalam model stokastik, sistem yang sedang dianalisis dipengaruhi oleh elemen acak atau variabel yang tidak dapat diprediksi dengan pasti, sehingga menghasilkan output yang bervariasi setiap kali simulasi dijalankan. Faktor-faktor acak ini, seperti fluktuasi harga atau perubahan dalam

permintaan konsumen, dapat memengaruhi perilaku sistem secara signifikan. Oleh karena itu, model stokastik digunakan untuk mensimulasikan situasi yang melibatkan ketidakpastian dan variabilitas, di mana hasil akhir tidak dapat diketahui secara pasti.

Contoh aplikasi model stokastik dapat ditemukan dalam simulasi pasar saham. Di pasar saham, harga saham dipengaruhi oleh berbagai faktor acak, seperti sentimen pasar, berita ekonomi, dan keputusan investasi individu. Karena adanya ketidakpastian dalam perilaku pasar, model stokastik digunakan untuk mensimulasikan perubahan harga saham yang dapat bervariasi tergantung pada faktor-faktor acak tersebut. Hasil simulasi tidak dapat diprediksi dengan pasti, tetapi dapat memberikan gambaran probabilistik tentang bagaimana harga saham dapat bergerak dalam rentang waktu tertentu.

2. Klasifikasi Berdasarkan Representasi Model

Model simulasi juga dapat diklasifikasikan berdasarkan cara sistem dan variabelnya diwakili dalam model tersebut.

a. Model Diskrit

Model simulasi diskrit digunakan untuk menggambarkan sistem yang bergerak dalam langkah-langkah terpisah atau diskrit, di mana perubahan dalam sistem terjadi pada titik waktu yang spesifik, bukan secara kontinu. Pada model ini, variabel-variabel yang dianalisis hanya dapat mengambil nilai-nilai pada titik tertentu dalam waktu atau ruang. Dengan kata lain, sistem hanya berubah pada interval waktu yang terjadwal dan peristiwa dalam sistem terjadi dalam bentuk langkah-langkah yang terpisah. Misalnya, dalam simulasi sistem antrian, setiap kali sebuah pelanggan tiba atau dilayani, perubahan terjadi pada waktu tertentu dan bukan secara berkelanjutan (Rossetti, 2015).

b. Model Kontinu

Model kontinu digunakan untuk menggambarkan sistem yang perubahan variabel-variabelnya terjadi secara berkelanjutan, tanpa ada langkah-langkah terpisah seperti yang terdapat pada model diskrit. Dalam model ini, perubahan dalam sistem berlangsung sepanjang waktu, yang berarti sistem dapat dipengaruhi oleh variabel yang terus-menerus berubah tanpa

batasan interval waktu tertentu. Model kontinu sangat cocok digunakan untuk menggambarkan sistem fisik atau biologis, di mana prosesnya berlangsung secara terus-menerus dan perubahan variabel tidak terputus-putus. Misalnya, dalam dinamika populasi, jumlah individu dalam suatu populasi bisa berubah secara kontinu berdasarkan faktor-faktor seperti kelahiran dan kematian (Forrester, 1997).

c. Model Gabungan (*Hybrid*)

Model gabungan (*Hybrid*) merupakan pendekatan yang mengintegrasikan elemen-elemen dari model diskrit dan kontinu untuk menciptakan simulasi yang lebih fleksibel dan realistis, terutama untuk sistem yang memiliki komponen-komponen yang berinteraksi atau berubah dengan cara yang berbeda. Dalam model gabungan, beberapa bagian dari sistem dimodelkan menggunakan pendekatan diskrit, sementara bagian lainnya menggunakan pendekatan kontinu. Pendekatan ini sangat berguna ketika sistem yang dimodelkan melibatkan komponen dengan sifat yang berbeda, di mana satu komponen lebih cocok dengan model diskrit dan lainnya dengan model kontinu (Rahmandad & Sterman, 2008).

3. Klasifikasi Berdasarkan Metode Simulasi

Model simulasi juga dapat diklasifikasikan berdasarkan metode yang digunakan dalam pemodelannya.

a. Simulasi Berbasis Agen

Simulasi berbasis agen (*Agent-Based Simulation*, ABS) merupakan pendekatan yang memodelkan sistem melalui agen-agen individu yang berinteraksi satu sama lain dalam lingkungan yang dinamis. Setiap agen dalam sistem memiliki sifat-sifat atau karakteristik tertentu, seperti tujuan, preferensi, dan aturan perilaku yang mendasari tindakannya. Agen-agen ini dapat beroperasi secara otonom, namun interaksi antara agen-agen tersebut dapat memengaruhi perilaku sistem secara keseluruhan. Pendekatan ini sangat efektif untuk memodelkan fenomena yang melibatkan perilaku kolektif atau interaksi antara banyak entitas dalam sistem yang kompleks, seperti

dalam simulasi sosial, ekonomi, atau ekologi (Macal & North, 2009).

Salah satu contoh aplikasi dari simulasi berbasis agen adalah dalam memodelkan penyebaran penyakit dalam populasi. Dalam simulasi ini, setiap individu dalam populasi dapat bertindak sebagai agen yang memiliki status kesehatan tertentu (seperti sehat, terinfeksi, atau sembuh) dan dapat berinteraksi dengan individu lain sesuai dengan aturan tertentu (misalnya, kontak fisik atau transmisi melalui udara). Interaksi ini mempengaruhi kecepatan penyebaran penyakit dalam populasi secara keseluruhan. Model semacam ini memberikan wawasan yang lebih dalam mengenai bagaimana faktor-faktor individu, seperti perilaku atau interaksi sosial, dapat mempengaruhi perkembangan epidemi dalam skala besar.

b. Simulasi Monte Carlo

Monte Carlo adalah pendekatan berbasis probabilitas yang digunakan untuk menganalisis sistem yang melibatkan ketidakpastian atau variasi acak. Dalam simulasi ini, variabel acak yang terlibat dalam sistem dipilih dari distribusi probabilitas yang relevan. Kemudian, sejumlah besar percobaan dilakukan untuk memperoleh estimasi mengenai perilaku sistem di bawah kondisi yang berbeda. Setiap percobaan atau iterasi menghasilkan hasil yang dapat bervariasi, tergantung pada nilai acak yang dipilih dari distribusi probabilitas. Dengan cara ini, simulasi Monte Carlo memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang bagaimana suatu sistem akan berfungsi dalam berbagai situasi, serta mengidentifikasi kemungkinan risiko dan ketidakpastian yang terlibat.

Aplikasi utama dari simulasi Monte Carlo adalah dalam pengelolaan risiko, terutama dalam industri yang menghadapi ketidakpastian besar, seperti keuangan dan asuransi. Misalnya, dalam analisis investasi, Monte Carlo digunakan untuk memperkirakan kemungkinan hasil dari portofolio investasi dengan mempertimbangkan variabilitas pasar yang tidak dapat diprediksi. Teknik ini memungkinkan investor untuk memahami distribusi potensi hasil, termasuk kemungkinan kerugian yang ekstrem atau keuntungan yang lebih tinggi. Dengan demikian, simulasi Monte Carlo memberikan wawasan

penting bagi pengambilan keputusan yang melibatkan ketidakpastian tinggi.

c. Simulasi Sistem Dinamik

Simulasi sistem dinamik adalah pendekatan untuk memodelkan dan menganalisis sistem yang terdiri dari berbagai variabel yang saling berinteraksi dan berubah seiring waktu. Berbeda dengan pendekatan lain, simulasi ini fokus pada perubahan jangka panjang dalam sistem yang dinamis dan kompleks, di mana variabel-variabelnya saling bergantung. Dalam model sistem dinamik, variabel-variabel ini dikelompokkan menjadi dua kategori utama, yaitu stok (variabel yang terakumulasi atau disimpan, seperti jumlah populasi atau volume persediaan) dan aliran (variabel yang menggambarkan laju perubahan stok, seperti tingkat kelahiran atau pengeluaran). Interaksi antara stok dan aliran ini memberikan gambaran mengenai dinamika sistem secara keseluruhan.

Simulasi sistem dinamik menggunakan persamaan diferensial untuk menggambarkan hubungan antara stok dan aliran, serta untuk menganalisis bagaimana perubahan dalam satu variabel dapat mempengaruhi variabel lain seiring waktu. Dengan pendekatan ini, model dapat menggambarkan bagaimana perilaku sistem berkembang dalam jangka panjang, sehingga dapat digunakan untuk memahami perubahan yang sulit diprediksi atau rumit, seperti dalam ekonomi atau lingkungan. Hal ini memungkinkan para pengambil keputusan untuk mengidentifikasi pola atau tren yang mungkin tidak tampak dalam data statis dan untuk menguji berbagai skenario kebijakan.

4. Klasifikasi Berdasarkan Aplikasi

Bergantung pada aplikasi, model simulasi dapat dikelompokkan berdasarkan bidang atau sektor di mana model tersebut diterapkan.

a. Simulasi dalam Manufaktur dan Logistik

Simulasi dalam manufaktur dan logistik adalah alat yang sangat berguna untuk mengoptimalkan operasi dalam kedua sektor ini, yang saling bergantung pada efisiensi aliran barang dan pengelolaan sumber daya. Dalam industri manufaktur, simulasi digunakan untuk merancang dan mengelola lini produksi,

memastikan bahwa setiap tahap produksi berjalan dengan lancar dan efisien. Model simulasi dapat memodelkan proses produksi secara keseluruhan, termasuk penjadwalan mesin, pengaturan sumber daya, dan pengendalian kualitas. Dengan simulasi ini, perusahaan dapat mengidentifikasi hambatan atau bottleneck dalam proses produksi, memungkinkan untuk melakukan perbaikan yang dapat mengurangi waktu siklus dan meningkatkan produktivitas (Rossetti, 2015).

Pada konteks logistik, simulasi digunakan untuk mengelola aliran barang dan pergerakan material dari satu titik ke titik lain. Aplikasi simulasi dalam logistik mencakup perancangan sistem distribusi, pengaturan persediaan, dan pengelolaan transportasi. Misalnya, perusahaan dapat menggunakan simulasi untuk menentukan rute pengiriman yang paling efisien atau untuk merancang gudang yang meminimalkan waktu dan biaya dalam proses penyimpanan dan pengambilan barang. Dengan menggunakan model simulasi, perusahaan dapat mengantisipasi berbagai masalah yang mungkin muncul dalam proses logistik, seperti kekurangan persediaan atau keterlambatan pengiriman, sehingga langkah-langkah preventif dapat diterapkan.

b. Simulasi dalam Kesehatan dan Epidemiologi

Simulasi dalam bidang kesehatan dan epidemiologi berperan penting dalam pemahaman dan pengelolaan penyakit menular serta perencanaan kebijakan kesehatan yang lebih efektif. Salah satu aplikasi utama simulasi di sektor ini adalah untuk memodelkan penyebaran penyakit. Dengan menggunakan model berbasis agen, setiap individu dalam populasi dapat diperlakukan sebagai agen yang memiliki sifat-sifat tertentu, seperti kemungkinan tertular penyakit atau kemampuan untuk menyebarkan penyakit. Simulasi ini memungkinkan peneliti untuk mengamati bagaimana penyakit menyebar dalam suatu populasi seiring waktu dan memprediksi dampaknya terhadap kesehatan masyarakat. Hal ini dapat membantu dalam merancang strategi pengendalian penyakit yang lebih efisien, seperti penutupan area yang terinfeksi atau penerapan kebijakan pembatasan sosial.

Simulasi juga digunakan untuk mengevaluasi kebijakan pengendalian penyakit, seperti vaksinasi atau pengobatan massal. Dengan memodelkan efek dari berbagai intervensi, para pembuat kebijakan dapat memprediksi seberapa besar dampak yang dapat ditimbulkan terhadap tingkat infeksi dan mortalitas. Misalnya, simulasi dapat memperkirakan jumlah orang yang perlu divaksinasi untuk mencapai kekebalan kelompok (*herd immunity*), serta dampak vaksinasi terhadap tingkat penularan. Ini memungkinkan pengambil keputusan untuk menentukan strategi yang paling efektif dan efisien dalam menghadapi wabah atau pandemi.

c. Simulasi dalam Keuangan dan Pengelolaan Risiko

Simulasi dalam sektor keuangan memiliki peran penting dalam memodelkan dinamika pasar saham, pengelolaan risiko, dan pengoptimalan portofolio investasi. Salah satu metode yang paling populer adalah simulasi Monte Carlo, yang digunakan untuk memperkirakan hasil investasi di bawah berbagai skenario pasar yang tidak pasti. Dalam simulasi ini, distribusi probabilitas digunakan untuk menggambarkan ketidakpastian dalam faktor-faktor pasar seperti harga saham, suku bunga, atau nilai tukar mata uang. Dengan mensimulasikan ribuan skenario pasar yang mungkin terjadi, investor dapat memperoleh pemahaman yang lebih baik tentang potensi risiko dan imbal hasil dari portofolionya (Pahl *et al.*, 2013).

Simulasi Monte Carlo juga membantu dalam analisis risiko dengan memberikan gambaran yang lebih realistis tentang kemungkinan kerugian atau keuntungan dalam jangka panjang. Misalnya, simulasi ini memungkinkan pengelola portofolio untuk mengevaluasi bagaimana perubahan dalam volatilitas pasar atau kebijakan ekonomi dapat mempengaruhi hasil investasi. Dengan cara ini, investor dapat merencanakan langkah-langkah mitigasi risiko dan membuat keputusan investasi yang lebih terinformasi. Selain itu, simulasi Monte Carlo juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi korelasi antara berbagai aset dalam portofolio, membantu dalam diversifikasi yang lebih efektif.

1. Jelaskan pengertian pemodelan simulasi dan apa tujuan utama dari pemodelan simulasi dalam konteks sistem yang dinamis. Bagaimana peran pemodelan simulasi dalam mendukung pengambilan keputusan dan perencanaan?
2. Jelaskan dua jenis utama model simulasi, yaitu model deterministik dan model stokastik.
3. Definisikan sistem dinamik dan jelaskan bagaimana simulasi sistem dinamik digunakan untuk memodelkan interaksi stok dan aliran dalam sistem.
4. Jelaskan konsep simulasi berbasis agen dan bagaimana model ini digunakan untuk menganalisis perilaku sistem yang kompleks.
5. Bandingkan model simulasi diskrit dan kontinu. Jelaskan karakteristik masing-masing jenis model.

BAB III

KONSEP DASAR SISTEM DINAMIK

Kemampuan Akhir yang Diharapkan

Mampu memahami terkait dengan sejarah sistem dinamik, memahami prinsip utama sistem dinamik, memahami struktur dasar model sistem dinamik, memahami langkah-langkah pemodelan sistem dinamik, serta memahami contoh diagram dasar sistem dinamik, sehingga pembaca dapat mampu menerapkan konsep yang dipelajari dalam analisis dan pengembangan solusi yang mendukung pengambilan keputusan secara efektif.

Materi Pembelajaran

- Sejarah Sistem Dinamik
- Prinsip Utama Sistem Dinamik
- Struktur Dasar Model Sistem Dinamik
- Langkah-Langkah Pemodelan Sistem Dinamik
- Contoh Diagram Dasar Sistem Dinamik
- Soal Latihan

A. Sejarah Sistem Dinamik

Sistem dinamik adalah pendekatan analisis dan pemodelan yang digunakan untuk memahami bagaimana berbagai elemen dalam suatu sistem saling berinteraksi dan berkembang seiring waktu. Konsep ini sangat penting dalam bidang ilmu sosial, ekonomi, lingkungan, dan teknik, karena sistem dinamik memungkinkan para peneliti dan pembuat kebijakan untuk membahas perilaku sistem yang kompleks dan tidak selalu dapat diprediksi.

1. Asal Usul Sistem Dinamik

Sistem dinamik, sebagai disiplin ilmiah yang terpisah, mulai berkembang pada pertengahan abad ke-20, beriringan dengan kemajuan ilmu komputer dan teori sistem. Meskipun prinsip-prinsip dasar mengenai dinamika sistem sudah ada dalam teori kontrol dan mekanika

klasik, pengembangan sistem dinamik yang lebih formal dan terstruktur baru dimulai pada awal 1960-an. Jay W. Forrester, seorang profesor di MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), merupakan tokoh utama di balik kelahiran teori ini. Pada saat itu, Forrester melihat adanya kebutuhan untuk memahami sistem yang sangat kompleks yang melibatkan hubungan timbal balik antar berbagai komponen yang saling mempengaruhi dan berkembang seiring waktu, seperti dalam konteks ekonomi dan ekologi.

Forrester memperkenalkan konsep sistem dinamik melalui bukunya yang sangat berpengaruh, *Industrial Dynamics* (1961), yang menawarkan metode baru dalam pemodelan dan analisis sistem yang berfokus pada interaksi antara elemen-elemen yang membentuk sistem tersebut. Salah satu aspek utama dari teori ini adalah pengakuan terhadap pentingnya umpan balik (*feedback*) dan keterlambatan waktu (*time delay*) dalam sistem yang kompleks. Konsep-konsep ini memungkinkan analis untuk memvisualisasikan bagaimana perubahan dalam satu bagian sistem dapat mempengaruhi seluruh sistem dalam jangka waktu yang lebih lama, baik secara langsung maupun tidak langsung.

Salah satu kontribusi terbesar Forrester terhadap perkembangan sistem dinamik adalah pengembangan perangkat lunak yang disebut DYNAMO. Perangkat lunak ini memungkinkan para peneliti dan praktisi untuk membangun model-model yang menggambarkan interaksi antara berbagai variabel dalam sistem dinamik dan mensimulasikan hasil dari perubahan variabel-variabel tersebut dalam waktu tertentu. DYNAMO menjadi alat yang sangat berharga bagi ilmuwan dan insinyur untuk menganalisis dan merancang sistem yang memiliki banyak komponen yang saling bergantung, seperti sistem produksi, ekonomi, dan ekologi.

2. Konsep Utama dalam Sistem Dinamik

Sistem dinamik, sebagaimana yang dipopulerkan oleh Forrester, mengandalkan dua komponen utama, yaitu stok dan aliran. Stok (atau akumulasi) menggambarkan variabel yang dapat menyimpan sesuatu, seperti jumlah uang di rekening bank atau jumlah populasi dalam suatu wilayah. Aliran menggambarkan laju perubahan stok, seperti pendapatan yang masuk ke rekening atau tingkat kelahiran dalam suatu populasi. Selain itu, sistem dinamik juga mengandalkan adanya

feedback loops (lingkaran umpan balik) yang bisa bersifat positif (memperkuat perubahan) atau negatif (mengurangi perubahan). *Feedback loops* inilah yang menjadi pusat dari analisis sistem dinamik, di mana interaksi antar komponen dalam sistem dapat menghasilkan perilaku yang sangat kompleks dan tidak selalu intuitif. Misalnya, dalam model ekonomi, perubahan dalam tingkat konsumsi dapat mempengaruhi produksi, yang kemudian akan mempengaruhi tingkat pendapatan dan pada gilirannya akan mempengaruhi konsumsi itu sendiri.

3. Pengembangan Sistem Dinamik dalam Berbagai Bidang

Penerapan konsep ini mulai meluas ke berbagai bidang. Pada awalnya, sistem dinamik banyak diterapkan dalam industri, terutama dalam manajemen produksi dan perencanaan ekonomi. Namun, seiring berjalannya waktu, pendekatan ini mulai diterapkan dalam banyak bidang lain, termasuk ekologi, kesehatan masyarakat, dan kebijakan publik.

a. Ekonomi

Sistem dinamik telah berperan penting dalam analisis ekonomi, terutama dalam memahami dan mengelola siklus ekonomi. Jay W. Forrester, sebagai pelopor sistem dinamik, menggunakan pendekatan ini untuk memodelkan interaksi antara produksi, konsumsi, dan kebijakan fiskal dalam suatu ekonomi. Melalui pemodelan ini, Forrester menunjukkan bagaimana kebijakan ekonomi dapat menciptakan dampak jangka panjang yang sering kali tidak terlihat secara langsung. Salah satu kontribusi utamanya adalah buku *World Dynamics* (1971), yang menggabungkan sistem dinamik dengan teori pertumbuhan ekonomi. Dalam karyanya, Forrester membahas bagaimana faktor-faktor seperti perkembangan teknologi, pertumbuhan populasi, dan konsumsi sumber daya saling berinteraksi dan memengaruhi keseimbangan ekonomi global. Model ini memberikan wawasan tentang potensi konsekuensi dari keputusan ekonomi pada masa depan.

Seiring perkembangan waktu, pendekatan sistem dinamik dalam ekonomi semakin matang dan telah digunakan secara luas untuk merancang model prediktif yang kompleks. Model ini memungkinkan para pembuat kebijakan untuk memahami

konsekuensi dari berbagai skenario ekonomi, seperti dampak perubahan suku bunga, kebijakan fiskal, dan inflasi terhadap keseimbangan pasar. Dengan memanfaatkan simulasi berbasis sistem dinamik, pembuat kebijakan dapat mengidentifikasi titik-titik kritis yang perlu diintervensi untuk mengurangi fluktuasi ekonomi dan mendorong pertumbuhan yang berkelanjutan. Hal ini sangat penting dalam perencanaan jangka panjang dan perumusan kebijakan moneter.

b. Ekologi

Pada bidang ekologi, sistem dinamik digunakan untuk memahami interaksi kompleks antara spesies dan faktor lingkungan yang memengaruhi keseimbangan ekosistem. Pendekatan ini memungkinkan para peneliti memodelkan dinamika populasi hewan, tumbuhan, dan sumber daya alam dalam suatu ekosistem. Misalnya, faktor-faktor seperti tingkat kelahiran, kematian, migrasi, dan predasi dapat diintegrasikan dalam sebuah model untuk memprediksi fluktuasi populasi spesies tertentu dari waktu ke waktu. Dengan pemodelan ini, ilmuwan dapat mengidentifikasi pola-pola populasi, seperti siklus kepunahan atau ledakan populasi, dan memahami bagaimana intervensi manusia atau perubahan lingkungan dapat memengaruhi dinamika ekosistem.

Model sistem dinamik juga berguna untuk mempelajari keseimbangan antara predator dan mangsa dalam ekosistem. Contoh klasik adalah model Lotka-Volterra, yang menggambarkan interaksi antara populasi predator dan mangsa, di mana perubahan jumlah satu spesies secara langsung memengaruhi populasi spesies lainnya. Selain itu, sistem dinamik membantu memproyeksikan dampak perubahan lingkungan, seperti deforestasi, polusi, atau perubahan iklim, terhadap stabilitas ekosistem. Dengan simulasi ini, peneliti dapat mengevaluasi skenario terbaik untuk upaya konservasi, seperti pemulihan habitat, pengelolaan populasi, atau pengendalian spesies invasif.

c. Kesehatan Masyarakat

Pada bidang kesehatan masyarakat, sistem dinamik berperan penting dalam memahami dan menganalisis penyebaran penyakit menular serta dampaknya terhadap populasi. Dengan

menggunakan pendekatan ini, peneliti dapat membangun model yang memetakan bagaimana penyakit menyebar dari individu ke individu dalam suatu populasi seiring waktu. Faktor-faktor seperti tingkat infeksi, tingkat pemulihan, efektivitas vaksin, dan mobilitas populasi dapat dimasukkan ke dalam model untuk memprediksi tren penyebaran penyakit. Salah satu contoh terkenal adalah model SIR (*Susceptible-Infectious-Recovered*), yang digunakan untuk mempelajari dinamika penyebaran penyakit dan memproyeksikan jumlah kasus dalam berbagai skenario.

Sistem dinamik juga digunakan untuk mengevaluasi dampak kebijakan kesehatan masyarakat, seperti vaksinasi massal, pembatasan sosial, atau intervensi medis. Dengan memodelkan intervensi ini, para ilmuwan dapat menguji efektivitasnya dalam mengendalikan wabah sebelum kebijakan diterapkan di dunia nyata. Misalnya, selama pandemi COVID-19, model sistem dinamik membantu memproyeksikan dampak langkah-langkah seperti lockdown, penggunaan masker, dan distribusi vaksin terhadap laju penyebaran virus. Simulasi ini memberikan dasar ilmiah bagi pengambil kebijakan untuk merancang strategi yang optimal dalam mengurangi angka penyebaran dan kematian akibat penyakit menular.

d. Kebijakan Publik

Sistem dinamik telah menjadi alat yang efektif dalam analisis kebijakan publik karena kemampuannya memodelkan interaksi kompleks antar variabel dalam suatu sistem. Pendekatan ini memungkinkan pembuat kebijakan untuk mengevaluasi dampak jangka panjang dari kebijakan yang diusulkan, baik di bidang ekonomi, lingkungan, maupun sosial. Dengan menggunakan model sistem dinamik, berbagai skenario kebijakan dapat disimulasikan untuk memahami konsekuensi langsung maupun tidak langsung yang mungkin terjadi. Misalnya, kebijakan untuk mengurangi polusi udara dapat dimodelkan dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti emisi industri, adopsi teknologi ramah lingkungan, dan pertumbuhan populasi, sehingga hasil kebijakan terhadap kualitas udara dan kesehatan masyarakat dapat diprediksi secara akurat.

Sistem dinamik sangat bermanfaat dalam merancang kebijakan sosial dan ekonomi yang lebih efektif. Kebijakan seperti program pengentasan kemiskinan atau reformasi pendidikan dapat dimodelkan untuk melihat bagaimana intervensi pemerintah memengaruhi tingkat pendapatan, akses terhadap layanan publik, serta kesejahteraan masyarakat dalam jangka panjang. Misalnya, simulasi kebijakan subsidi pendidikan dapat memperlihatkan dampak positifnya terhadap peningkatan akses pendidikan di kalangan masyarakat miskin, serta dampak lanjutan terhadap peningkatan produktivitas tenaga kerja dan pertumbuhan ekonomi secara berkelanjutan.

4. Perkembangan Sistem Dinamik di Era Komputer

Perkembangan sistem dinamik mengalami lonjakan signifikan dengan kemajuan teknologi komputer pada akhir abad ke-20. Sebelum era komputer, pembuatan model sistem dinamik terbatas pada kalkulasi manual yang memakan banyak waktu dan sering kali hanya dapat digunakan untuk sistem sederhana. Namun, dengan munculnya teknologi komputer, para peneliti dapat membangun model yang jauh lebih kompleks dan menyimulasikan dinamika sistem dalam berbagai skenario dengan cepat dan akurat. Hal ini membuka peluang untuk menganalisis masalah yang lebih realistis, seperti dinamika ekonomi global, perubahan iklim, dan manajemen sumber daya. Teknologi komputer menghilangkan hambatan perhitungan manual dan memungkinkan perhitungan numerik yang lebih efisien, bahkan untuk sistem dengan banyak variabel dan interaksi.

Kemajuan ini semakin pesat dengan hadirnya perangkat lunak khusus untuk simulasi sistem dinamik, seperti Vensim, Stella, dan Powersim. Perangkat lunak ini mempermudah proses pemodelan karena tidak lagi memerlukan keterampilan pemrograman yang mendalam. Dengan antarmuka grafis yang intuitif, pengguna dapat membuat diagram alur stok dan aliran, serta menetapkan hubungan antarvariabel secara visual. Hal ini memungkinkan lebih banyak kalangan, termasuk pembuat kebijakan, praktisi industri, dan mahasiswa, untuk memanfaatkan sistem dinamik dalam penelitian dan pengambilan keputusan. Simulasi dapat dilakukan berulang kali dengan parameter yang bervariasi, memberikan pemahaman yang lebih mendalam terhadap perilaku sistem dalam berbagai kondisi.

Salah satu kontribusi penting dari komputerisasi sistem dinamik adalah kemampuannya untuk menguji kebijakan dan keputusan dalam skenario "*what-if*". Para peneliti dan pengambil keputusan dapat membahas dampak dari kebijakan tertentu sebelum kebijakan tersebut diterapkan di dunia nyata. Misalnya, simulasi kebijakan lingkungan dapat menunjukkan dampak jangka panjang dari berbagai strategi pengurangan emisi karbon, seperti penerapan pajak karbon atau penggunaan teknologi ramah lingkungan. Kemampuan untuk melakukan eksperimen virtual ini membantu meminimalkan risiko dan meningkatkan efektivitas kebijakan.

B. Prinsip Utama Sistem Dinamik

Sistem dinamik adalah suatu pendekatan analisis yang digunakan untuk memahami perilaku sistem yang kompleks dan berubah seiring waktu. Sistem-sistem ini terdiri dari berbagai elemen yang saling berinteraksi dan dapat mempengaruhi satu sama lain, dengan dampak yang mungkin tidak langsung terlihat atau mudah diprediksi. Prinsip-prinsip dasar dalam sistem dinamik berfokus pada interaksi antar elemen-elemen tersebut, serta bagaimana mengubah keadaan sistem secara keseluruhan.

1. Pemahaman Sistem yang Kompleks

Sistem dinamik adalah pendekatan yang dirancang untuk memahami dan memodelkan sistem yang kompleks. Sistem ini terdiri dari berbagai elemen atau komponen yang saling berinteraksi dalam hubungan yang sering kali tidak bersifat linear atau sederhana. Elemen-elemen kunci dalam sistem dinamik meliputi stok (akumulasi atau jumlah suatu entitas, seperti populasi, uang, atau barang), aliran (laju perubahan stok dalam periode waktu tertentu), dan umpan balik (*feedback loops*) yang menjadi inti dari interaksi dalam sistem. Umpan balik dapat bersifat positif, yang memperkuat perubahan dalam sistem, atau negatif, yang menyeimbangkan dan menahan perubahan. Melalui hubungan-hubungan ini, sistem dinamik memungkinkan pemahaman tentang bagaimana perubahan dalam satu bagian sistem dapat memicu rangkaian perubahan di bagian lain (Dawson, 2014).

Pada sistem yang kompleks, hubungan antar elemen sering kali tidak mudah terlihat pada pandangan pertama. Hal ini disebabkan oleh

adanya keterlambatan waktu (*time delays*) dan interaksi yang bersifat sirkular. Misalnya, dalam ekosistem lingkungan, peningkatan jumlah populasi hewan pemangsa dapat mengurangi populasi hewan mangsa dalam jangka pendek. Namun, dalam jangka panjang, penurunan populasi mangsa akan menyebabkan berkurangnya sumber makanan bagi pemangsa, sehingga populasi pemangsa itu sendiri akan menurun. Dinamika semacam ini dapat dipahami dengan jelas melalui pendekatan sistem dinamik, yang memvisualisasikan hubungan kompleks dalam bentuk model yang dinamis dan berubah seiring waktu.

2. Stok dan Aliran: Elemen Dasar dalam Sistem Dinamik

Stok dan aliran adalah dua elemen dasar yang membentuk kerangka kerja dalam sistem dinamik. Stok atau akumulasi adalah variabel yang menunjukkan jumlah atau keadaan suatu entitas dalam sistem pada waktu tertentu. Stok bersifat statis dalam arti bahwa nilainya mencerminkan kondisi sistem di titik waktu tertentu. Misalnya, dalam ekonomi, stok dapat berupa jumlah uang dalam rekening bank, total persediaan barang di gudang, atau populasi penduduk di suatu wilayah. Dalam ekosistem, stok dapat mencerminkan jumlah spesies tertentu atau ketersediaan sumber daya alam. Nilai stok ini akan berubah seiring waktu karena adanya aliran yang mempengaruhinya.

Aliran atau fluks adalah variabel dinamis yang menggambarkan laju perubahan stok. Aliran masuk (*inflow*) menambah jumlah stok, sementara aliran keluar (*outflow*) mengurangi stok tersebut. Sebagai contoh, dalam sistem ekonomi, aliran bisa berupa pendapatan yang meningkatkan jumlah uang di rekening bank (stok), sementara pengeluaran akan menjadi aliran keluar yang mengurangi stok tersebut. Dalam konteks lingkungan, aliran masuk bisa berupa pertumbuhan vegetasi, sedangkan aliran keluar dapat berupa deforestasi atau konsumsi sumber daya oleh manusia. Dengan demikian, interaksi antara stok dan aliran menentukan bagaimana suatu sistem berkembang dan berubah seiring waktu.

3. Feedback Loops: Umpan Balik Positif dan Negatif

Salah satu prinsip paling mendasar dalam sistem dinamik adalah *feedback loops* atau umpan balik. Umpan balik merujuk pada siklus di mana hasil dari suatu proses kembali mempengaruhi proses itu sendiri,

baik secara positif maupun negatif. *Feedback* loops dapat dibedakan menjadi dua jenis utama:

a. *Feedback* Positif

Feedback positif atau umpan balik penguatan adalah mekanisme dalam sistem dinamik di mana perubahan pada satu elemen akan memperkuat perubahan berikutnya, menciptakan siklus yang semakin membesar. Umpan balik ini berperan sebagai pendorong pertumbuhan atau akselerasi dalam sistem. Misalnya, dalam konteks ekonomi, peningkatan konsumsi akan mendorong peningkatan produksi barang. Produksi yang lebih tinggi akan menciptakan lebih banyak lapangan kerja, meningkatkan pendapatan, dan akhirnya mendorong konsumsi yang lebih besar. Siklus ini terus berulang, menciptakan efek kumulatif yang mempercepat pertumbuhan ekonomi.

Meskipun *feedback* positif dapat menghasilkan pertumbuhan yang cepat, mekanisme ini juga dapat menyebabkan ketidakstabilan jika tidak dikendalikan. Dalam situasi yang tidak terkendali, peningkatan terus-menerus dalam satu variabel dapat memicu konsekuensi negatif. Contohnya adalah inflasi dalam ekonomi: kenaikan harga barang dapat menyebabkan tuntutan kenaikan upah, yang kemudian meningkatkan biaya produksi, dan akhirnya memicu kenaikan harga lebih lanjut. Hal ini dapat menciptakan lingkaran umpan balik positif yang berbahaya, dikenal sebagai spiral inflasi.

b. *Feedback* Negatif

Feedback negatif atau umpan balik penyeimbang adalah mekanisme dalam sistem dinamik yang berfungsi untuk menstabilkan sistem dengan mengurangi atau menghambat perubahan awal. Mekanisme ini bekerja secara berlawanan dengan *feedback* positif, di mana perubahan dalam satu elemen akan memicu reaksi yang bertujuan mengembalikan keseimbangan. *Feedback* negatif memastikan sistem tidak mengalami pertumbuhan yang tidak terkendali dan tetap berada dalam batas yang stabil. Contohnya dalam ekosistem, peningkatan populasi predator menyebabkan penurunan jumlah mangsa. Ketika jumlah mangsa berkurang, predator kekurangan makanan, sehingga populasi predator ikut menurun. Mekanisme

ini membantu menjaga keseimbangan antara predator dan mangsa dalam ekosistem.

Pada sistem ekonomi, *feedback* negatif juga berperan penting dalam mengatur pasar dan mencegah ketidakseimbangan. Misalnya, ketika harga suatu barang naik secara signifikan akibat tingginya permintaan, konsumen cenderung mengurangi pembelian. Penurunan permintaan ini secara bertahap akan menekan harga kembali turun menuju keseimbangan pasar. Mekanisme seperti ini dikenal sebagai mekanisme penyeimbang dalam ekonomi, di mana fluktuasi akan terus dikoreksi oleh reaksi pasar sehingga sistem ekonomi tetap stabil.

4. Nonlinearitas dalam Sistem Dinamik

Nonlinearitas adalah karakteristik mendasar dalam sistem dinamik yang membuat hubungan antar elemen dalam sistem menjadi tidak proporsional. Artinya, perubahan dalam satu variabel tidak selalu menyebabkan perubahan yang sebanding dalam variabel lainnya. Dalam sistem linear, hubungan antara input dan output bersifat sederhana dan mudah diprediksi; peningkatan input akan selalu menghasilkan peningkatan output dalam proporsi tertentu. Namun, dalam sistem nonlinear, hubungan ini jauh lebih kompleks karena adanya faktor interaksi yang saling memengaruhi. Nonlinearitas menciptakan dinamika sistem yang bervariasi, di mana respons sistem dapat berubah secara signifikan tergantung pada kondisi awal atau gangguan tertentu.

Sifat nonlinearitas sering kali menghasilkan perilaku emergen, yaitu pola atau fenomena kompleks yang muncul dari interaksi sederhana antar elemen dalam sistem. Contoh nyata dari fenomena ini adalah dalam model ekosistem. Hubungan antara predator dan mangsa terlihat sederhana predator memangsa mangsa, sementara populasi mangsa memengaruhi jumlah predator. Namun, interaksi ini bisa menghasilkan pola fluktuasi populasi yang sangat kompleks dan tidak dapat diprediksi secara intuitif. Bahkan perubahan kecil dalam faktor-faktor lingkungan, seperti ketersediaan makanan atau iklim, dapat menyebabkan perubahan drastis dalam dinamika populasi.

5. Model Sistem Dinamik dan Simulasi

Model sistem dinamik dan simulasi adalah alat utama untuk memahami dan menganalisis perilaku sistem yang kompleks. Dalam pendekatan ini, model menggambarkan interaksi antar elemen dalam suatu sistem dan bagaimana elemen-elemen tersebut berubah seiring waktu. Dengan menggunakan perangkat lunak simulasi seperti Vensim, Stella, atau AnyLogic, para peneliti dapat membangun representasi matematika dari sistem yang ingin dianalisis, mencakup stok, aliran, dan umpan balik antar elemen. Model-model ini dapat dirancang dengan berbagai tingkat kompleksitas, dari yang sederhana hingga yang sangat kompleks, tergantung pada kebutuhan analisis.

Simulasi sistem dinamik memungkinkan untuk membahas bagaimana sistem berperilaku di bawah berbagai kondisi dan skenario. Sebagai contoh, dalam konteks ekosistem, model simulasi dapat menggambarkan bagaimana interaksi antara predator dan mangsa dapat mempengaruhi populasi kedua spesies tersebut. Para peneliti dapat mengubah parameter seperti tingkat kelahiran, kematian, atau migrasi untuk melihat bagaimana perubahan kecil dapat memengaruhi keseimbangan populasi dalam jangka panjang. Melalui pendekatan ini, para ilmuwan dapat memprediksi hasil jangka panjang dari suatu fenomena, yang sangat penting dalam pengelolaan sumber daya alam atau konservasi spesies.

C. Struktur Dasar Model Sistem Dinamik

Model sistem dinamik adalah alat yang digunakan untuk menggambarkan dan menganalisis perilaku sistem yang kompleks seiring waktu, dengan fokus pada interaksi antara elemen-elemen yang membentuk sistem tersebut. Struktur dasar model sistem dinamik terdiri dari komponen-komponen yang saling berinteraksi melalui aliran, stok, dan *feedback loops*. Dengan memahami struktur dasar ini, dapat memodelkan berbagai jenis sistem yang dinamis, seperti sistem ekologi, ekonomi, dan sosial.

1. Penyusunan dan Penyederhanaan Model Sistem Dinamik

Penyusunan model sistem dinamik melibatkan identifikasi komponen-komponen sistem, hubungan antar elemen, serta menentukan variabel-variabel yang relevan untuk dimasukkan dalam

model. Proses ini biasanya dimulai dengan membuat diagram causal loop atau diagram aliran stok untuk menggambarkan hubungan antar elemen.

a. Diagram Causal Loop

Diagram causal loop adalah alat penting dalam penyusunan dan penyederhanaan model sistem dinamik. Diagram ini digunakan untuk menggambarkan hubungan sebab-akibat antar elemen dalam suatu sistem. Dengan menggunakan diagram ini, kita dapat memvisualisasikan bagaimana perubahan dalam satu elemen dapat mempengaruhi elemen-elemen lainnya dalam sistem secara langsung maupun tidak langsung. Sebuah panah yang menghubungkan dua elemen menggambarkan pengaruh dari satu elemen terhadap elemen lainnya, dengan tanda positif (+) menunjukkan hubungan yang memperkuat, dan tanda negatif (−) menunjukkan hubungan yang mengurangi.

Misalnya dalam konteks model populasi, kita dapat menggambarkan hubungan antara tingkat kelahiran dan jumlah individu dalam populasi. Sebuah panah yang mengarah dari tingkat kelahiran ke jumlah individu dengan tanda positif menunjukkan bahwa semakin tinggi tingkat kelahiran, semakin banyak individu yang ada dalam populasi. Sebaliknya, hubungan negatif dapat digambarkan jika ada faktor pengurang, seperti tingkat kematian yang mengarah ke jumlah individu dalam populasi. Dengan demikian, diagram ini menggambarkan dinamika saling terkait yang membentuk sistem tersebut.

b. Diagram Aliran Stok

Diagram aliran stok adalah alat penting dalam penyusunan dan penyederhanaan model sistem dinamik, yang digunakan untuk menggambarkan dinamika stok dan aliran dalam suatu sistem. Dalam diagram ini, stok digambarkan dengan kotak yang mewakili variabel yang mengukur jumlah suatu entitas dalam sistem, seperti populasi, uang, atau barang. Aliran digambarkan dengan panah yang mengarah ke stok, yang menunjukkan perubahan dalam stok tersebut akibat aliran masuk atau keluar. Aliran ini mencerminkan laju perubahan stok, seperti laju pertumbuhan penduduk atau laju produksi barang.

Diagram aliran stok membantu memvisualisasikan bagaimana perubahan dalam aliran dapat mempengaruhi stok dari waktu ke

waktu. Sebagai contoh, dalam model ekonomi, kotak dapat mewakili stok uang dalam perekonomian, sementara panah yang mengarah ke kotak tersebut menunjukkan aliran uang yang masuk (misalnya, dari pendapatan atau investasi). Sebaliknya, aliran yang keluar (seperti pengeluaran atau pajak) dapat mengurangi stok uang dalam perekonomian. Dengan cara ini, diagram aliran stok memungkinkan pemodel untuk melihat bagaimana perubahan dalam aliran mempengaruhi kondisi sistem secara keseluruhan.

2. Pengaruh Parameter dan Variabel dalam Model Sistem Dinamik

Setiap model sistem dinamik melibatkan berbagai parameter dan variabel yang mempengaruhi perilaku sistem. Beberapa parameter ini mungkin bersifat tetap, sementara yang lainnya dapat berubah seiring waktu. Variabel-variabel dalam sistem ini termasuk input (aliran masuk), output (aliran keluar), serta nilai stok yang menggambarkan keadaan sistem pada waktu tertentu. Pemilihan parameter yang tepat sangat penting dalam membangun model yang akurat. Misalnya, dalam model sistem dinamik untuk memprediksi perubahan iklim, parameter seperti tingkat emisi gas rumah kaca dan faktor pertumbuhan populasi manusia perlu dipertimbangkan untuk mengidentifikasi dampak jangka panjang terhadap suhu global (Meadows *et al.*, 2004).

Setelah model dibangun, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis sensitivitas, di mana kita mengevaluasi bagaimana perubahan dalam parameter-parameter tertentu mempengaruhi perilaku sistem secara keseluruhan. Hal ini dapat dilakukan dengan mengubah nilai parameter tertentu dan melihat bagaimana model merespons. Kalibrasi model adalah proses menyesuaikan parameter agar hasil simulasi model lebih sesuai dengan data nyata yang tersedia. Kalibrasi membantu meningkatkan akurasi prediksi model dan memastikan bahwa model dapat diandalkan untuk pengambilan keputusan.

D. Langkah-Langkah Pemodelan Sistem Dinamik

Pemodelan sistem dinamik adalah alat penting dalam analisis dan perencanaan berbagai jenis sistem yang kompleks, baik itu dalam bidang ekonomi, ekologi, teknik, maupun sosial. Tujuan utama dari

pemodelan sistem dinamik adalah untuk memahami interaksi antara elemen-elemen dalam suatu sistem serta bagaimana perubahan dalam satu bagian sistem dapat mempengaruhi bagian lainnya seiring waktu.

1. Pengenalan Masalah dan Definisi Tujuan

Langkah pertama dalam pemodelan sistem dinamik adalah pengenalan masalah, yang merupakan fondasi untuk membangun model yang efektif. Sebelum memulai proses pemodelan, penting untuk memahami dengan jelas masalah yang ingin dianalisis. Pengenalan masalah mencakup identifikasi tujuan pemodelan, yaitu apa yang ingin dicapai dari analisis sistem tersebut. Selain itu, penting juga untuk memahami konteks sistem yang akan dimodelkan, karena faktor-faktor eksternal dan internal dapat mempengaruhi cara model dikembangkan dan diterapkan.

Pada tahap ini, para pemodel perlu bekerja sama dengan para ahli atau stakeholder yang memiliki pengetahuan mendalam tentang sistem yang sedang dianalisis. Kolaborasi ini penting untuk menentukan elemen-elemen kunci dalam sistem, serta memahami interaksi antar elemen tersebut. Para pemodel harus mengidentifikasi variabel-variabel yang relevan yang akan dimasukkan dalam model, seperti faktor-faktor yang mempengaruhi populasi dalam suatu ekosistem atau variabel ekonomi dalam model perekonomian. Pengumpulan data awal yang akurat sangat penting, karena data ini akan digunakan untuk membangun dasar analisis dan memperkirakan perilaku sistem di masa depan.

Setelah memahami konteks dan variabel-variabel yang relevan, pemodel juga perlu menentukan ruang lingkup analisis. Hal ini mencakup batasan-batasan sistem yang akan dianalisis, serta asumsi-asumsi yang dibuat selama pemodelan. Sebagai contoh, dalam memodelkan dinamika populasi spesies tertentu, para pemodel harus memutuskan apakah hanya interaksi antara predator dan mangsa yang akan dimodelkan, atau apakah faktor-faktor lain seperti penyakit atau perubahan iklim juga akan diperhitungkan.

2. Formulasi Model

Formulasi model dimulai dengan membuat diagram causal loop, yang menggambarkan hubungan sebab-akibat antar elemen dalam sistem. Diagram ini memberikan gambaran visual yang jelas mengenai bagaimana satu elemen dapat mempengaruhi elemen lainnya dalam

sistem. Panah dalam diagram menunjukkan arah pengaruh antar variabel, dan tanda plus (+) serta minus (-) menunjukkan apakah pengaruh tersebut memperkuat atau mengurangi perubahan dalam elemen lain. Diagram causal loop sangat berguna untuk mengidentifikasi feedback loops, baik positif maupun negatif, yang terjadi dalam sistem

Diagram *causal loop* ini mencerminkan interaksi dinamis antara elemen-elemen dalam sistem. *Feedback* positif (loop yang memperkuat perubahan) dan *feedback* negatif (loop yang menghambat atau menstabilkan perubahan) dapat diidentifikasi dengan mudah. Misalnya, dalam model pertumbuhan populasi, kita dapat menggambarkan hubungan antara tingkat kelahiran dan jumlah individu dalam populasi. Jika tingkat kelahiran meningkat, maka jumlah individu dalam populasi juga meningkat, yang memperkuat siklus ini (*feedback* positif). Sebaliknya, jika kepadatan populasi terlalu tinggi, hal ini dapat menurunkan tingkat kelahiran (*feedback* negatif) karena keterbatasan sumber daya.

Setelah diagram *causal loop*, langkah berikutnya adalah membuat diagram aliran stok, yang lebih formal dalam menggambarkan stok dan aliran dalam sistem. Dalam diagram ini, stok digambarkan dalam bentuk kotak yang mewakili akumulasi atau jumlah suatu entitas, seperti jumlah individu dalam populasi. Aliran digambarkan dengan panah yang mengarah ke atau dari stok, menunjukkan laju perubahan dalam stok tersebut. Misalnya, dalam model pertumbuhan populasi, aliran bisa menggambarkan tingkat kelahiran dan kematian yang mengubah jumlah individu dalam populasi dari waktu ke waktu. Dengan demikian, diagram aliran stok memudahkan pemodel untuk memahami bagaimana stok berubah seiring waktu berdasarkan aliran yang masuk dan keluar.

3. Pengembangan Persamaan Dinamik

Setelah diagram causal loop dan diagram aliran stok disusun, langkah berikutnya dalam pemodelan sistem dinamik adalah pengembangan persamaan dinamik. Tahap ini bertujuan untuk menghubungkan stok dan aliran dalam bentuk persamaan matematis yang menggambarkan bagaimana stok berubah seiring waktu. Persamaan ini biasanya berupa persamaan diferensial atau persamaan aljabar yang menjelaskan laju perubahan stok berdasarkan aliran yang

masuk atau keluar. Dengan persamaan ini, kita dapat memprediksi bagaimana sistem akan berkembang, tergantung pada kondisi awal dan parameter yang ada dalam model.

Persamaan dinamik ini mendefinisikan hubungan antara stok dan aliran. Setiap perubahan dalam stok, seperti peningkatan atau penurunan jumlah individu dalam populasi, akan mempengaruhi aliran yang mengubah stok tersebut. Sebagai contoh, dalam model populasi, jumlah individu dalam populasi (stok) dipengaruhi oleh tingkat kelahiran dan kematian, yang berfungsi sebagai aliran yang menambah atau mengurangi jumlah individu dalam populasi. Jika tingkat kelahiran tinggi, stok akan meningkat, sementara jika tingkat kematian tinggi, stok akan berkurang. Oleh karena itu, persamaan dinamik harus menggabungkan hubungan ini untuk menggambarkan perilaku sistem secara akurat.

4. Simulasi Model

Setelah formulasi model selesai, langkah berikutnya dalam pemodelan sistem dinamik adalah simulasi model. Simulasi ini bertujuan untuk mengamati bagaimana sistem berperilaku seiring waktu berdasarkan persamaan dinamik yang telah dikembangkan sebelumnya. Dengan menggunakan perangkat lunak pemodelan sistem dinamik seperti Vensim atau Stella, pemodel dapat menghitung dan menggambarkan perubahan stok dan aliran dalam interval waktu tertentu. Proses ini memungkinkan pemodel untuk melihat bagaimana elemen-elemen dalam sistem saling berinteraksi dan berkembang, memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai perilaku jangka panjang sistem yang sedang dianalisis.

Pada tahap simulasi, pemodel dapat membahas berbagai skenario untuk memahami bagaimana sistem merespons perubahan dalam parameter tertentu. Misalnya, dengan mengubah tingkat kelahiran atau laju pertumbuhan dalam model populasi, pemodel dapat mengamati bagaimana perubahan tersebut mempengaruhi populasi dari waktu ke waktu. Simulasi ini penting untuk memprediksi perilaku sistem di bawah kondisi yang berbeda, dan untuk mengidentifikasi titik-titik kritis di mana perubahan kecil dapat menyebabkan dampak yang signifikan.

Simulasi memungkinkan untuk mengevaluasi dampak perubahan kebijakan atau faktor eksternal pada sistem. Sebagai contoh,

dalam model ekonomi, simulasi dapat digunakan untuk mengevaluasi bagaimana perubahan suku bunga atau kebijakan fiskal dapat mempengaruhi perekonomian dalam jangka panjang. Pemodel dapat mengubah parameter seperti tingkat investasi, pengeluaran pemerintah, atau pajak, dan melihat bagaimana sistem bereaksi terhadap perubahan tersebut. Hal ini sangat berguna untuk pengambilan keputusan dan perencanaan kebijakan.

5. Validasi Model

Validasi model adalah proses yang krusial untuk memastikan bahwa model yang telah dibangun dapat menggambarkan sistem dengan akurat dan dapat diandalkan. Tujuan utama dari validasi adalah untuk memverifikasi apakah model yang dihasilkan dapat mereproduksi perilaku sistem nyata dengan baik. Validasi ini penting karena tanpa validasi yang tepat, keputusan yang diambil berdasarkan hasil simulasi model mungkin tidak mencerminkan kenyataan dan bisa menghasilkan keputusan yang tidak efektif atau bahkan merugikan.

Salah satu metode yang umum digunakan dalam validasi model adalah kalibrasi, di mana parameter-parameter dalam model disesuaikan dengan data empiris yang ada. Proses kalibrasi ini melibatkan perbandingan antara hasil simulasi model dan data nyata, kemudian mengubah parameter-parameter model untuk menghasilkan output yang lebih sesuai dengan data yang ditemukan di dunia nyata. Dengan cara ini, model dapat disesuaikan agar lebih akurat dan relevan dengan kondisi yang sesungguhnya. Kalibrasi memungkinkan pemodel untuk mengoptimalkan model dan meningkatkan ketepatannya.

Validasi eksternal juga penting dalam memastikan keakuratan model. Validasi eksternal dilakukan dengan cara menguji model menggunakan data yang tidak digunakan dalam proses pembangunan model. Hal ini bertujuan untuk memeriksa apakah model dapat memprediksi perilaku sistem dengan benar di luar sampel data yang telah digunakan. Dengan melakukan validasi eksternal, pemodel dapat mengukur sejauh mana model mampu generalisasi hasilnya ke situasi atau kondisi baru yang belum terobservasi sebelumnya.

6. Analisis Sensitivitas dan Pengujian Skenario

Analisis sensitivitas adalah langkah penting dalam pemodelan sistem dinamik yang bertujuan untuk memahami bagaimana perubahan

dalam nilai parameter model dapat mempengaruhi hasil simulasi. Proses ini dilakukan dengan cara mengubah satu atau lebih parameter dalam model dan mengamati perubahan yang terjadi pada hasil yang dihasilkan. Analisis sensitivitas membantu pemodel untuk mengetahui seberapa sensitif model terhadap perubahan dalam parameter, sehingga dapat mengidentifikasi variabel yang paling berpengaruh terhadap perilaku sistem. Hal ini sangat penting karena memungkinkan pemodel untuk fokus pada parameter yang memiliki dampak terbesar, serta memberi wawasan mengenai ketidakpastian dalam model.

Analisis sensitivitas juga memberikan informasi mengenai ketergantungan model terhadap variabel tertentu, yang dapat digunakan untuk menilai stabilitas dan ketahanan model. Jika model sangat sensitif terhadap perubahan parameter tertentu, maka keputusan yang diambil berdasarkan model tersebut perlu mempertimbangkan ketidakpastian dalam variabel tersebut. Sebaliknya, jika model relatif tidak sensitif terhadap perubahan parameter, maka keputusan yang diambil lebih dapat diandalkan meskipun ada variasi dalam nilai parameter.

Pengujian skenario juga merupakan bagian penting dalam memahami perilaku sistem di bawah kondisi yang berbeda. Pengujian skenario dilakukan dengan mengubah kondisi awal atau kebijakan dalam model untuk melihat bagaimana perubahan tersebut mempengaruhi hasil sistem. Hal ini memungkinkan pemodel untuk membahas berbagai kemungkinan skenario dan melihat dampak dari kebijakan atau perubahan eksternal terhadap sistem. Pengujian skenario dapat memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai dampak jangka panjang dari keputusan yang diambil.

7. Pengambilan Keputusan dan Aplikasi Model

Hasil simulasi yang dihasilkan dapat menjadi dasar yang kuat untuk pengambilan keputusan. Salah satu keunggulan utama dari model sistem dinamik adalah kemampuannya untuk mengevaluasi berbagai pilihan kebijakan atau strategi dengan cara yang lebih sistematis dan berbasis bukti. Dengan memahami bagaimana sistem berperilaku di bawah berbagai skenario, pemangku kepentingan dapat membuat keputusan yang lebih informasi dan tepat sasaran. Keputusan yang diambil bukan hanya berdasarkan intuisi atau asumsi, tetapi juga didasarkan pada pemahaman yang lebih mendalam tentang konsekuensi jangka panjang dari setiap kebijakan atau pilihan yang ada.

Model sistem dinamik juga memberikan alat bantu yang sangat berguna untuk merencanakan strategi jangka panjang. Dengan mampu menggambarkan dinamika perubahan dalam suatu sistem, model ini memungkinkan pemangku kebijakan untuk memproyeksikan hasil-hasil yang mungkin terjadi di masa depan, sehingga dapat merancang strategi yang lebih responsif dan proaktif. Dalam banyak kasus, model ini juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi potensi masalah atau tantangan yang mungkin tidak terlihat dalam perencanaan tradisional, memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih holistik dan berkelanjutan.

Model sistem dinamik sangat efektif dalam mengelola risiko. Dalam banyak situasi, terutama yang melibatkan ketidakpastian tinggi, model ini membantu pengambil keputusan untuk memahami bagaimana perubahan kecil dalam satu elemen dapat memengaruhi keseluruhan sistem. Dengan membahas berbagai skenario, pengambil keputusan dapat merencanakan langkah-langkah mitigasi yang lebih efektif untuk mengurangi risiko yang mungkin terjadi. Hal ini memberikan pandangan yang lebih luas mengenai potensi hasil yang bisa dicapai, serta cara-cara untuk menghindari atau mengurangi dampak negatif yang mungkin timbul.

E. Contoh Diagram Dasar Sistem Dinamik

Sistem dinamik adalah alat yang digunakan untuk memodelkan dan menganalisis perilaku sistem yang kompleks, yang terdiri dari elemen-elemen yang saling berinteraksi satu sama lain. Salah satu komponen utama dalam pemodelan sistem dinamik adalah penggunaan diagram sistem yang dapat membantu memvisualisasikan hubungan antar elemen dalam sistem.

1. Diagram Causal Loop (*Loop Causal*)

Diagram causal loop (loop sebab-akibat) adalah representasi grafis yang menggambarkan hubungan sebab-akibat antar elemen dalam suatu sistem. Diagram ini menampilkan bagaimana satu elemen dalam sistem mempengaruhi elemen lain, baik secara langsung maupun tidak langsung. Hubungan sebab-akibat yang digambarkan dalam diagram causal loop sangat penting karena membantu pemodel untuk memahami *feedback loops* yang terjadi dalam sistem.

a. Komponen dalam Diagram *Causal Loop*

Pada diagram *causal loop*, ada dua jenis hubungan yang dapat digambarkan:

- 1) Hubungan Positif (*Positive Feedback*): Diperlihatkan dengan tanda plus (+) di dekat panah yang menghubungkan dua elemen. Ini berarti bahwa jika salah satu elemen meningkat (misalnya, stok meningkat), maka elemen yang terhubung juga akan meningkat. Sebaliknya, jika elemen pertama menurun, elemen kedua juga akan menurun. Hubungan positif sering menghasilkan efek perkuatan atau akselerasi dalam sistem.
- 2) Hubungan Negatif (*Negative Feedback*): Ditunjukkan dengan tanda minus (−) di dekat panah. Dalam hubungan ini, jika satu elemen meningkat, elemen yang terhubung akan menurun, dan sebaliknya. Hubungan negatif sering menghasilkan efek pengendalian atau penstabilan dalam sistem

b. Contoh Diagram *Causal Loop*

Misalkan kita ingin memodelkan pertumbuhan populasi dalam suatu ekosistem yang melibatkan predator dan mangsa. Diagram *causal loop* untuk sistem ini dapat digambarkan dengan elemen-elemen seperti jumlah mangsa, jumlah predator, dan tingkat kelahiran serta kematian.

- 1) Loop Positif: Jika jumlah mangsa meningkat, jumlah predator juga akan meningkat karena lebih banyak makanan tersedia bagi predator. Ini adalah contoh dari loop positif yang mempercepat proses pertumbuhan kedua elemen.
- 2) Loop Negatif: Namun, jika jumlah predator meningkat secara berlebihan, akan mengurangi jumlah mangsa, yang akhirnya mengurangi jumlah predator karena berkurangnya sumber makanan.

2. Diagram Aliran Stok (*Stock-Flow Diagram*)

Diagram aliran stok menggambarkan bagaimana stok (variabel yang dapat dihitung dalam jumlah tertentu) berubah seiring waktu akibat aliran yang masuk dan keluar dari stok tersebut. Diagram ini sangat berguna untuk memodelkan sistem dinamik yang melibatkan proses-proses kontinu, seperti aliran uang, populasi, atau sumber daya

lainnya. Dalam diagram ini, stok digambarkan dengan kotak, sementara aliran digambarkan dengan panah yang mengarah ke atau keluar dari stok.

- a. Komponen dalam Diagram Aliran Stok
 - 1) Stok (*Stock*): Elemen yang menggambarkan jumlah tertentu dari suatu variabel dalam sistem, misalnya jumlah populasi, uang, atau barang yang tersedia.
 - 2) Aliran (*Flow*): Elemen yang menggambarkan perubahan dalam stok, baik yang masuk maupun yang keluar. Aliran ini biasanya diwakili dengan panah yang mengarah ke atau keluar dari stok. Aliran bisa bersifat positif (menambah stok) atau negatif (mengurangi stok).
 - 3) Gates/Valves (*Valve*): Komponen yang dapat membatasi atau mengatur laju aliran, seperti kebijakan atau faktor-faktor eksternal yang mengontrol laju aliran dalam sistem.
- b. Contoh Diagram Aliran Stok

Misalkan kita ingin memodelkan proses distribusi uang dalam perekonomian. Dalam hal ini, stok bisa berupa jumlah uang yang beredar dalam ekonomi, sementara aliran bisa berupa pengeluaran pemerintah, belanja rumah tangga, dan investasi bisnis. Diagram ini akan menggambarkan bagaimana uang masuk ke dalam sistem melalui pengeluaran dan investasi, serta bagaimana uang keluar melalui pajak, impor, atau penghematan.

Contoh lainnya adalah sistem inventaris barang dalam perusahaan. Di sini, stok akan menggambarkan jumlah barang yang tersedia di gudang, sementara aliran bisa menggambarkan proses pemasokan barang baru ke dalam stok dan proses pengeluaran barang yang dijual kepada pelanggan. Diagram aliran stok akan menggambarkan hubungan antara stok barang, aliran masuk (pemasokan), dan aliran keluar (penjualan).

3. Contoh Penerapan Diagram Sistem Dinamik dalam Berbagai Kasus

- a. Penerapan dalam Pengelolaan Sumber Daya Alam

Pada pengelolaan sumber daya alam, seperti pemodelan keberlanjutan hutan, diagram causal loop dapat digunakan untuk menggambarkan hubungan yang kompleks antara

berbagai elemen dalam sistem. Sebagai contoh, diagram ini bisa menunjukkan hubungan antara laju deforestasi, pertumbuhan populasi manusia, kebijakan konservasi, dan regenerasi hutan. Laju deforestasi dapat dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu kebutuhan manusia terhadap kayu dan lahan, serta peningkatan jumlah populasi yang memicu permintaan lebih besar akan sumber daya alam. Kebijakan konservasi, seperti penanaman pohon kembali atau pembatasan aktivitas penebangan hutan, dapat memperlambat deforestasi, tetapi laju pertumbuhan populasi yang pesat tetap menjadi tantangan dalam menjaga keseimbangan ekosistem hutan.

Diagram aliran stok dalam konteks ini akan menggambarkan stok pohon di hutan, yang dapat berkurang seiring waktu akibat aktivitas deforestasi. Dalam diagram ini, stok pohon yang ada akan terpengaruh oleh aliran keluar yang berasal dari penebangan pohon, sementara aliran masuk menggambarkan upaya konservasi, seperti penanaman pohon baru. Dengan demikian, diagram ini membantu memvisualisasikan bagaimana perubahan dalam satu elemen sistem, seperti peningkatan populasi atau kebijakan konservasi, dapat memengaruhi jumlah pohon yang ada dalam hutan.

b. Penerapan dalam Ekonomi

Pada model perekonomian, diagram causal loop dapat digunakan untuk menggambarkan hubungan dinamis antara konsumsi, pendapatan, dan investasi. Misalnya, ketika konsumsi meningkat, permintaan terhadap barang dan jasa akan meningkat, yang mendorong produksi dan akhirnya meningkatkan pendapatan nasional. Peningkatan pendapatan ini, pada gilirannya, akan kembali meningkatkan konsumsi dalam suatu siklus yang dikenal dengan istilah multiplier effect. Hal ini menggambarkan bagaimana perubahan kecil dalam konsumsi dapat menyebabkan perubahan besar dalam perekonomian secara keseluruhan, karena setiap peningkatan pendapatan mendorong lebih banyak konsumsi, yang terus berputar dalam ekonomi.

Diagram aliran stok digunakan untuk menggambarkan pergerakan aliran uang dalam perekonomian. Stok yang ada dalam model ini bisa berupa jumlah uang yang beredar,

sedangkan aliran menggambarkan pergerakan uang yang masuk dan keluar dari sistem ekonomi. Aliran masuk bisa berupa investasi yang mendorong pertumbuhan ekonomi, sedangkan aliran keluar mencakup pajak yang dikenakan pemerintah atau penghematan oleh individu dan perusahaan. Diagram ini memungkinkan pemodel untuk menggambarkan bagaimana berbagai aliran ini mempengaruhi jumlah uang yang beredar dan bagaimana itu berdampak pada pendapatan serta konsumsi.

c. Penerapan dalam Kesehatan Masyarakat

Pada model kesehatan masyarakat, diagram causal loop digunakan untuk menggambarkan hubungan dinamis antara prevalensi penyakit, tingkat mortalitas, dan upaya pencegahan. Sebagai contoh, semakin banyak individu yang terinfeksi suatu penyakit, maka semakin tinggi angka kematian yang terjadi, yang pada gilirannya dapat mengurangi jumlah individu yang terinfeksi dalam populasi. Hal ini menggambarkan *feedback* negatif, di mana tingginya angka kematian dapat mengurangi prevalensi penyakit, meskipun ada faktor lain yang mempengaruhi, seperti penularan atau mutasi penyakit.

Intervensi medis atau upaya pencegahan yang efektif, seperti vaksinasi atau pengobatan, dapat menurunkan prevalensi penyakit dalam suatu populasi. Dalam diagram causal loop, intervensi medis ini dapat digambarkan sebagai faktor yang mengurangi jumlah orang yang terinfeksi, sehingga mengurangi tingkat kematian dan memperpanjang harapan hidup. Dengan demikian, upaya pencegahan berperan penting dalam memperlambat penyebaran penyakit dan meningkatkan kualitas hidup masyarakat.

F. Soal Latihan

1. Deskripsikan prinsip-prinsip utama sistem dinamik dan jelaskan bagaimana prinsip-prinsip ini diterapkan dalam pemodelan dinamik.
2. Jelaskan langkah-langkah dalam proses pemodelan sistem dinamik, dari identifikasi masalah hingga validasi model.
3. Bagaimana sistem dinamik dapat digunakan untuk mengelola keberlanjutan sumber daya alam, seperti hutan atau perikanan?

4. Jelaskan bagaimana model sistem dinamik dapat divalidasi. Sebutkan metode-metode yang digunakan untuk menguji keakuratan dan ketepatan model tersebut.
5. Bagaimana sistem dinamik dapat digunakan untuk memodelkan dan mengelola krisis, seperti pandemi atau bencana alam?

BAB IV

MODELLING DECISION SITUATION

DALAM SISTEM DINAMIK

Kemampuan Akhir yang Diharapkan

Mampu memahami terkait dengan pengertian dan tujuan pemodelan keputusan, memahami elemen-elemen utama model sistem dinamik, memahami tahapan pengembangan model sistem dinamik, serta memahami flow diagram dalam sistem dinamik, sehingga pembaca dapat pemahaman yang mendalam dan keterampilan praktis dalam menerapkan konsep-konsep tersebut dalam berbagai konteks.

Materi Pembelajaran

- Pengertian dan Tujuan Pemodelan Keputusan
- Elemen-Elemen Utama Model Sistem Dinamik
- Tahapan Pengembangan Model Sistem Dinamik
- Flow Diagram dalam Sistem Dinamik
- Soal Latihan

A. Pengertian dan Tujuan Pemodelan Keputusan

Pemodelan keputusan dalam konteks sistem dinamik merujuk pada penggunaan alat dan teknik untuk membangun model yang menggambarkan proses pengambilan keputusan dalam suatu sistem. Model ini melibatkan elemen-elemen yang berinteraksi, seperti input, proses, keputusan, dan output, yang semuanya dipengaruhi oleh dinamika sistem itu sendiri. Pemodelan keputusan ini bertujuan untuk menganalisis bagaimana berbagai faktor eksternal dan internal mempengaruhi keputusan yang diambil oleh individu atau organisasi dan bagaimana keputusan tersebut berpengaruh terhadap sistem secara keseluruhan.

Menurut Sterman (2002), pemodelan keputusan dalam sistem dinamik berfokus pada dinamika pengambilan keputusan yang melibatkan umpan balik (*feedback*) dan penundaan waktu (*time delays*),

yang sering kali menyebabkan keputusan yang salah atau suboptimal jika tidak dipahami dengan baik. Sistem dinamik menyediakan alat yang efektif untuk menggambarkan bagaimana keputusan dalam sistem kompleks dapat mengarah pada hasil yang tidak terduga karena keterkaitan antar elemen-elemen sistem.

Pemodelan keputusan dapat diterapkan dalam berbagai bidang, seperti pengelolaan sumber daya alam, kebijakan publik, bisnis, dan sistem sosial. Proses ini melibatkan simulasi untuk mengidentifikasi berbagai alternatif keputusan, mengevaluasi dampaknya, serta memilih kebijakan yang paling sesuai dengan tujuan yang diinginkan. Tujuan utama pemodelan keputusan adalah untuk memberikan wawasan yang lebih baik tentang bagaimana keputusan diambil dalam sistem yang kompleks dan dinamis. Pemodelan keputusan membantu dalam merancang kebijakan dan strategi yang optimal dengan memahami hubungan sebab-akibat dalam sistem yang akan dianalisis. Berikut adalah tujuan utama pemodelan keputusan dalam konteks sistem dinamik:

1. Meningkatkan Pemahaman Dinamika Sistem

Pemodelan keputusan membantu pengambil keputusan untuk memahami dinamika internal sistem dengan cara yang lebih terstruktur dan sistematis. Dalam pemodelan ini, hubungan antar elemen dalam sistem digambarkan secara jelas, sehingga pengambil keputusan dapat melihat bagaimana perubahan dalam satu bagian sistem dapat mempengaruhi bagian lainnya. Pemahaman ini sangat penting, karena tanpa gambaran yang menyeluruh, keputusan yang diambil bisa berdampak negatif atau bahkan merugikan. Misalnya, kebijakan yang seharusnya meningkatkan pertumbuhan ekonomi justru bisa memicu inflasi atau ketidakstabilan pasar jika tidak mempertimbangkan interaksi antara sektor-sektor yang berbeda.

Pada konteks ekonomi, pemodelan keputusan dapat memberikan wawasan tentang bagaimana kebijakan fiskal yang diterapkan oleh pemerintah seperti perubahan pajak atau subsidi akan mempengaruhi berbagai sektor ekonomi. Misalnya, pemotongan pajak di sektor manufaktur mungkin dirancang untuk meningkatkan produksi, tetapi jika tidak memperhitungkan permintaan konsumen atau daya beli masyarakat, dampaknya bisa berbeda dari yang diharapkan. Dalam hal ini, pemodelan sistem dinamik akan mengungkap bagaimana sektor-

sektor ini saling berinteraksi dan memberikan gambaran tentang dampak jangka panjang dari kebijakan tersebut.

2. Menyediakan Alat untuk Mengevaluasi Alternatif Keputusan

Pemodelan sistem dinamik memberikan alat yang sangat berguna untuk mengevaluasi berbagai alternatif keputusan sebelum diterapkan di dunia nyata. Dalam situasi yang kompleks atau penuh ketidakpastian, sulit untuk memprediksi hasil dari setiap keputusan tanpa pemahaman yang mendalam tentang bagaimana berbagai elemen dalam sistem saling berinteraksi. Melalui simulasi berbasis model, pemodel dapat menguji beberapa skenario untuk menilai dampak potensial dari berbagai alternatif keputusan, sehingga membantu pengambil keputusan dalam memilih opsi yang paling optimal. Dengan cara ini, pemodelan sistem dinamik memungkinkan evaluasi yang lebih menyeluruh dan berbasis bukti.

Sebagai contoh dalam pengelolaan bencana alam, pemodelan keputusan memungkinkan para perencana untuk merancang dan menguji berbagai strategi respons sebelum menghadapi kejadian nyata. Simulasi yang dilakukan dengan model sistem dinamik dapat memperhitungkan banyak variabel, seperti kecepatan penyebaran bencana, kapasitas sumber daya untuk respons, dan perilaku masyarakat. Dengan demikian, berbagai skenario dapat diuji untuk mengetahui strategi mana yang akan paling efektif dalam meminimalkan kerugian dan mempercepat pemulihan. Pemodelan ini juga dapat membantu dalam merencanakan distribusi sumber daya yang lebih efisien dan menentukan prioritas intervensi.

3. Mengidentifikasi Dampak Jangka Panjang dari Keputusan

Pemodelan keputusan dalam sistem dinamik memungkinkan pengambil keputusan untuk mengidentifikasi dampak jangka panjang dari keputusan yang diambil. Keputusan yang diambil pada suatu titik waktu dapat memiliki efek yang jauh melampaui periode yang segera mengikuti, dan sering kali dampaknya tidak langsung terlihat. Dengan menggunakan model sistem dinamik, kita dapat mensimulasikan bagaimana suatu keputusan akan berkembang dalam waktu yang lebih panjang dan bagaimana ia dapat mempengaruhi berbagai aspek dalam sistem secara berkelanjutan. Hal ini sangat penting untuk memahami konsekuensi yang mungkin tidak terduga di awal.

Sebagai contoh kebijakan lingkungan yang diterapkan saat ini, seperti pengurangan emisi gas rumah kaca, dapat memiliki dampak jangka panjang yang sangat besar terhadap kualitas udara dan kesehatan manusia di masa depan. Melalui simulasi berbasis model sistem dinamik, kita dapat melihat bagaimana perubahan dalam kebijakan pengelolaan emisi akan mempengaruhi konsentrasi polutan di atmosfer, yang pada gilirannya akan berdampak pada kesehatan masyarakat dan perubahan iklim dalam jangka panjang. Pemodelan ini membantu para pembuat kebijakan untuk menilai apakah kebijakan yang diterapkan dapat memberikan hasil yang berkelanjutan dan menguntungkan di masa depan.

4. Mengurangi Ketidakpastian dalam Pengambilan Keputusan

Pada banyak konteks pengambilan keputusan, ketidakpastian adalah tantangan utama yang harus dihadapi. Ketidakpastian ini dapat datang dari berbagai sumber, seperti perubahan kondisi eksternal yang tidak dapat diprediksi, kurangnya informasi tentang parameter sistem, atau ketidaktahuan tentang bagaimana suatu kebijakan atau intervensi akan mempengaruhi sistem secara keseluruhan. Dalam situasi ini, pengambil keputusan sering kali merasa kesulitan untuk menentukan langkah yang paling tepat. Pemodelan sistem dinamik menyediakan alat yang berguna untuk mereduksi ketidakpastian ini dengan memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai bagaimana berbagai faktor dalam sistem saling berinteraksi dan mempengaruhi hasil keputusan.

Dengan menggunakan model sistem dinamik, pengambil keputusan dapat memodelkan dinamika internal dari sistem dan mengidentifikasi faktor-faktor yang memiliki pengaruh terbesar terhadap hasil yang diinginkan. Sebagai contoh, dalam pengelolaan sumber daya alam atau perekonomian, model ini memungkinkan untuk memahami bagaimana perubahan pada satu variabel, seperti investasi atau kebijakan fiskal, akan berdampak pada variabel lainnya, seperti pertumbuhan ekonomi atau keberlanjutan sumber daya alam. Dengan mengidentifikasi hubungan ini, pengambil keputusan dapat memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai sistem dan mengurangi ketidakpastian yang berkaitan dengan keputusan yang diambil.

5. Mendukung Keputusan dalam Sistem yang Kompleks dan Multidimensional

Sistem yang kompleks dan multidimensional sering kali melibatkan banyak variabel yang saling berinteraksi, yang dapat membuat pengambilan keputusan menjadi sangat menantang. Dalam konteks seperti ini, keputusan yang diambil harus mempertimbangkan berbagai faktor yang tidak hanya mempengaruhi satu aspek dari sistem, tetapi juga berbagai aspek lainnya. Pemodelan keputusan dengan menggunakan sistem dinamik menawarkan solusi untuk masalah ini dengan memberikan gambaran menyeluruh mengenai bagaimana elemen-elemen yang berbeda dalam sistem berinteraksi dan mempengaruhi satu sama lain. Hal ini memungkinkan pengambil keputusan untuk melihat sistem dalam perspektif yang lebih luas dan membuat keputusan yang lebih informasional.

B. Elemen-Elemen Utama Model Sistem Dinamik

Sistem dinamik merupakan suatu pendekatan yang sangat efektif untuk memodelkan dan menganalisis sistem kompleks, terutama dalam konteks pengambilan keputusan yang melibatkan interaksi antar berbagai elemen dalam sistem. Dalam memodelkan sistem dinamik, ada beberapa elemen utama yang berperan penting dalam menggambarkan dinamika suatu sistem. Tiga elemen utama tersebut adalah variabel *stock*, variabel *flow*, dan *feedback loop*. Ketiga elemen ini saling terkait dan membentuk dasar dalam pengembangan model sistem dinamik yang dapat digunakan untuk menggambarkan bagaimana keputusan mempengaruhi dan dipengaruhi oleh sistem yang kompleks. Di dalam sistem dinamik, variabel *stock* dan *flow* digunakan untuk menggambarkan perubahan dalam sistem sepanjang waktu, sementara *feedback loop* menggambarkan bagaimana perubahan-perubahan tersebut saling berinteraksi dan berpengaruh satu sama lain.

1. Variabel Stock

Variabel *stock* adalah elemen dalam sistem dinamik yang merepresentasikan kondisi atau jumlah suatu entitas dalam sistem pada waktu tertentu. Variabel ini mengumpulkan atau menyimpan informasi yang bisa berubah seiring waktu, baik itu dalam bentuk jumlah fisik, finansial, atau lainnya. Dalam banyak kasus, *stock* menggambarkan

stok sumber daya yang ada dalam sistem yang dapat bertambah atau berkurang. Menurut Forrester (1997), *stock* adalah akumulasi dari sejumlah entitas yang ada dalam sistem dan mempengaruhi keadaan sistem tersebut. Dalam model sistem dinamik, *stock* berfungsi sebagai titik awal untuk menggambarkan bagaimana perubahan aliran dan interaksi dalam sistem berpengaruh pada jumlah sumber daya atau entitas yang ada. Variabel *stock* sering kali disebut sebagai variabel status karena menunjukkan keadaan atau level suatu sistem dalam satu waktu.

Contoh sederhana dari variabel *stock* adalah jumlah uang yang ada dalam rekening bank, jumlah populasi dalam suatu kota, atau jumlah inventaris barang dalam sebuah gudang. Variabel ini menggambarkan akumulasi dari sejumlah aliran (*flow*) yang terjadi dalam sistem. Perubahan dalam variabel *stock* terjadi akibat adanya *flow* yang mempengaruhi jumlahnya. Sebagai contoh, jumlah uang dalam rekening bank dapat bertambah akibat adanya aliran pemasukan (*income flow*) dan berkurang akibat adanya pengeluaran (*outflow*). Dalam model sistem dinamik, perubahan ini digambarkan secara matematis dan diperoleh melalui persamaan yang menunjukkan bagaimana *stock* berinteraksi dengan *flow*.

2. Variabel Flow

Variabel *flow* adalah elemen yang menggambarkan laju perubahan atau pergerakan dalam suatu sistem, yang menyebabkan perubahan pada variabel *stock*. Aliran ini berfungsi untuk memodifikasi nilai *stock* dengan cara menambah atau mengurangi jumlah suatu entitas dalam sistem. Menurut Sterman (2002), variabel *flow* mengacu pada aliran atau laju perubahan suatu variabel *stock*. Dengan kata lain, *flow* menggambarkan proses yang menghubungkan *stock* dengan aliran sumber daya, uang, atau informasi dari satu bagian sistem ke bagian lain. Flow dapat bersifat positif (menambah *stock*) atau negatif (mengurangi *stock*), dan laju aliran ini bisa berubah-ubah tergantung pada kondisi dan faktor-faktor dalam sistem. Variabel *flow* berperan penting dalam menentukan seberapa cepat perubahan pada variabel *stock* terjadi. Sebagai contoh, dalam sistem ekonomi, aliran uang yang diterima dari transaksi bisnis (*flow*) akan menambah jumlah uang dalam perekonomian (*stock*). Di sisi lain, aliran uang yang keluar sebagai

pengeluaran (*outflow*) akan mengurangi jumlah uang dalam perekonomian tersebut.

3. *Feedback Loop*

Feedback loop adalah salah satu konsep inti dalam sistem dinamik yang menggambarkan bagaimana elemen-elemen dalam sistem saling mempengaruhi melalui hubungan sebab-akibat. *Feedback loop* terdiri dari dua jenis, yaitu *positive feedback* (umpan balik positif) dan *negative feedback* (umpan balik negatif). *Feedback loop* adalah mekanisme yang menggambarkan bagaimana perubahan dalam satu bagian sistem dapat mempengaruhi bagian lain dari sistem, yang pada gilirannya mempengaruhi perubahan awal. Dengan kata lain, *feedback loop* menggambarkan siklus umpan balik yang dapat memperkuat (*positive*) atau menyeimbangkan (*negative*) perubahan dalam sistem.

Sterman (2002) menjelaskan bahwa *feedback loop* sangat penting dalam memahami sistem dinamik karena dapat menunjukkan bagaimana keputusan dan kebijakan dapat mempengaruhi hasil yang terjadi dalam waktu yang lama. Loop ini menjelaskan interaksi antara variabel-variabel dalam sistem yang saling berhubungan, baik dalam mempercepat (amplifikasi) atau memperlambat (penyembuhan) perubahan yang terjadi.

a. *Positive Feedback Loop*

Positive feedback loop, atau umpan balik positif, terjadi ketika perubahan dalam satu elemen sistem menyebabkan perubahan lebih lanjut yang mempercepat atau memperkuat perubahan tersebut. Dalam konteks sistem dinamik, umpan balik positif seringkali menciptakan siklus yang terus berkembang, di mana dampak awal semakin besar seiring berjalannya waktu. Contohnya, dalam ekonomi, peningkatan pengeluaran konsumen dapat memicu peningkatan permintaan barang dan jasa. Hal ini akan mendorong produsen untuk meningkatkan produksi untuk memenuhi permintaan tersebut, yang pada gilirannya akan menghasilkan lebih banyak pendapatan dan pekerjaan, serta meningkatkan daya beli masyarakat. Peningkatan pendapatan ini kemudian mengarah pada pengeluaran konsumen yang lebih tinggi, menciptakan siklus berkelanjutan yang dapat mempercepat pertumbuhan ekonomi. Fenomena ini adalah contoh dari umpan balik positif, di mana

satu perubahan awal (peningkatan konsumsi) memperkuat dampak dari perubahan tersebut (peningkatan permintaan dan produksi). Umpan balik positif ini bisa sangat kuat dalam mendorong pertumbuhan ekonomi selama periode tertentu, tetapi juga dapat menimbulkan risiko apabila tidak terkendali, seperti inflasi yang tinggi.

b. *Negative Feedback Loop*

Negative feedback loop, atau umpan balik negatif, terjadi ketika perubahan dalam satu elemen sistem menghasilkan efek yang menyeimbangkan atau mengurangi dampak perubahan tersebut, yang berfungsi untuk mempertahankan kestabilan sistem. Umpan balik negatif ini bertindak sebagai mekanisme pengaturan yang menjaga agar sistem tidak keluar dari kendali. Sebagai contoh, dalam ekosistem, populasi predator dan mangsa saling berinteraksi melalui umpan balik negatif. Ketika populasi predator meningkat, jumlah mangsa akan berkurang karena lebih banyak individu yang diburu dan dimakan.

Penurunan jumlah mangsa ini kemudian menyebabkan kekurangan sumber makanan bagi predator, yang dapat menyebabkan penurunan populasi predator. Dengan berkurangnya predator, populasi mangsa mulai pulih karena tingkat perburuan berkurang, dan siklus ini berulang. Dalam hal ini, umpan balik negatif membantu menjaga keseimbangan antara populasi predator dan mangsa, sehingga keduanya tidak berkembang biak secara berlebihan atau terancam punah. Sistem ekologi ini cenderung kembali ke keadaan seimbang secara alami melalui interaksi yang terjadi.

C. Tahapan Pengembangan Model Sistem Dinamik

Model sistem dinamik merupakan alat yang sangat berguna dalam memecahkan masalah yang melibatkan dinamika sistem yang kompleks. Pengembangan model sistem dinamik bertujuan untuk menggambarkan bagaimana suatu sistem berperilaku dan berevolusi seiring waktu, serta untuk memahami interaksi antar elemen dalam sistem. Dalam konteks pengambilan keputusan, model sistem dinamik dapat membantu dalam merancang kebijakan, memprediksi hasil jangka panjang, dan menganalisis dampak dari keputusan yang diambil.

Pengembangan model sistem dinamik dapat dibagi menjadi beberapa tahapan utama, yang umumnya mencakup identifikasi masalah, pembuatan model awal, pengujian model, validasi model, dan implementasi model untuk simulasi. Masing-masing tahapan ini penting dalam memastikan bahwa model yang dibangun dapat menggambarkan dinamika sistem secara akurat dan memberikan informasi yang relevan untuk pengambilan keputusan.

1. Identifikasi Masalah dan Tujuan

Langkah pertama dalam pengembangan model sistem dinamik adalah identifikasi masalah dan tujuan. Proses ini memerlukan pemahaman yang mendalam tentang sistem yang akan dimodelkan dan variabel-variabel yang mempengaruhinya. Untuk itu, pengidentifikasian masalah secara jelas menjadi kunci utama dalam langkah pertama ini. Pemahaman tentang tujuan pemodelan juga sangat penting, karena tujuan tersebut akan memandu seluruh pengembangan model. Sebagai contoh, dalam pemodelan sistem ekonomi, tujuan dapat berkisar pada memahami dampak kebijakan fiskal atau memprediksi pertumbuhan ekonomi di masa depan.

Menurut Forrester (1997), pada tahap awal ini, penting untuk menentukan tujuan model, apakah untuk merancang kebijakan yang lebih baik, memahami pola atau dinamika sistem, atau untuk memprediksi hasil dari suatu intervensi. Tujuan ini akan memengaruhi pemilihan variabel-variabel utama yang akan dimasukkan dalam model dan cara-cara untuk menghubungkannya. Dengan tujuan yang jelas, pemodel dapat memfokuskan upaya pada elemen-elemen kunci yang relevan, menghindari kebingungan atau pengabaian faktor-faktor penting yang dapat mempengaruhi hasil akhir.

2. Penyusunan Model Awal

Langkah berikutnya dalam pengembangan model sistem dinamik adalah penyusunan model awal. Pada tahap ini, para pemodel menggunakan alat grafis untuk menggambarkan hubungan antar elemen dalam sistem, seperti variabel stok (*stock*), aliran (*flow*), dan *feedback loops*. Penyusunan model awal ini bertujuan untuk memetakan bagaimana elemen-elemen tersebut berinteraksi dalam sistem yang lebih besar. Diagram seperti causal loop diagram atau stock and flow diagram digunakan untuk menyusun gambaran awal tentang

bagaimana suatu sistem berfungsi, serta untuk menggambarkan dinamika dan interaksi antara variabel-variabel yang ada.

Menurut Sterman (2002), pada tahap penyusunan model awal, penting untuk menggambarkan struktur dasar sistem dan hubungan sebab-akibat yang terjadi antara elemen-elemen yang relevan. Di sini, pemodel mulai mengidentifikasi dan menggambarkan dinamika internal yang ada dalam sistem, termasuk hubungan positif dan negatif antara variabel-variabel yang ada. Pembuatan model awal biasanya melibatkan iterasi yang berulang dan diskusi dengan berbagai pemangku kepentingan, seperti pengambil kebijakan atau ahli terkait, untuk memastikan bahwa semua elemen kunci dalam sistem tercakup dengan baik dalam model.

Model yang disusun pada tahap ini masih berupa representasi sederhana dari sistem yang sedang dianalisis. Model ini bertujuan untuk memberikan gambaran umum tentang dinamika dasar dalam sistem, namun masih memerlukan penyempurnaan dan pengujian lebih lanjut. Sebagai contoh, dalam analisis pengelolaan sumber daya air, diagram stok dan aliran mungkin mencakup elemen-elemen seperti jumlah air yang tersedia (sebagai stok), aliran penggunaan air (sebagai flow), serta kebijakan pengelolaan air seperti pengurangan konsumsi atau pembangunan infrastruktur yang dapat mempengaruhi aliran dan stok tersebut.

3. Pengujian Model

Langkah berikutnya adalah pengujian model untuk memastikan bahwa model tersebut dapat memprediksi perilaku sistem dengan akurat. Pengujian ini bertujuan untuk menilai apakah model dapat merepresentasikan sistem dengan benar dan apakah hasil yang dihasilkan oleh model sesuai dengan kenyataan. Menurut Richardson dan Pugh (1997), pengujian model adalah tahap yang sangat penting dalam siklus pengembangan model, karena memungkinkan pemodel untuk mengevaluasi seberapa baik model yang telah dibuat mencerminkan dinamika sistem yang sebenarnya.

Proses pengujian biasanya dilakukan dengan menjalankan simulasi pada model untuk berbagai skenario, seperti perubahan dalam variabel aliran (*flow*) atau kebijakan yang diambil dalam sistem. Hasil simulasi tersebut kemudian dibandingkan dengan data empiris atau dengan prediksi yang sudah diketahui. Tujuan dari perbandingan ini

adalah untuk mengidentifikasi apakah model memberikan hasil yang realistis dan dapat dipercaya. Jika model menunjukkan perbedaan signifikan dengan data empiris, pemodel perlu melakukan perbaikan atau revisi terhadap struktur dan parameter model.

4. Validasi Model

Langkah berikutnya adalah validasi model untuk memastikan bahwa model tersebut benar-benar akurat dan dapat digunakan untuk mendukung pengambilan keputusan yang efektif. Validasi model bertujuan untuk membandingkan hasil simulasi model dengan data nyata atau dengan hasil yang diharapkan berdasarkan teori atau pengetahuan yang ada. Hal ini penting karena tanpa validasi, model tidak dapat dipercaya untuk memberikan prediksi yang akurat atau informasi yang relevan. Menurut Sterman (2002), validasi adalah langkah yang sangat penting dalam pengembangan model sistem dinamik, karena ini memastikan bahwa model tersebut dapat diandalkan untuk menggambarkan perilaku sistem yang sesungguhnya.

Proses validasi umumnya dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dari model dengan data historis yang ada. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa model dapat mereproduksi pola perilaku yang diamati di dunia nyata. Jika model dapat menghasilkan hasil yang sejalan dengan data empiris, maka model dianggap valid dan dapat digunakan untuk meramalkan kondisi masa depan atau untuk mengevaluasi kebijakan yang diusulkan. Sebaliknya, jika model gagal untuk mereproduksi pola yang diharapkan, maka model perlu diperbaiki atau bahkan dibangun kembali agar lebih mencerminkan realitas.

5. Penyempurnaan dan Iterasi Model

Penyempurnaan dan iterasi model merupakan langkah penting dalam pengembangan model sistem dinamik. Setelah model diuji dan divalidasi, proses ini membantu untuk memastikan bahwa model tersebut tidak hanya akurat, tetapi juga dapat menghasilkan hasil yang lebih baik dalam menggambarkan dinamika sistem yang sebenarnya. Pada tahap ini, model sering kali membutuhkan perubahan atau penyempurnaan karena model yang pertama kali dibuat mungkin tidak sepenuhnya menangkap kompleksitas sistem yang dimodelkan. Penyempurnaan ini mencakup penambahan elemen-elemen yang

terlewat, perbaikan asumsi yang tidak realistis, atau penggantian pendekatan yang tidak memberikan hasil yang diinginkan.

Proses iterasi model dimulai dengan menilai umpan balik yang diperoleh dari hasil pengujian dan validasi sebelumnya. Hasil ini memberikan wawasan tentang bagian-bagian dari model yang perlu diperbaiki. Misalnya, jika model menunjukkan bahwa prediksi tidak sesuai dengan data empiris, maka pemodel perlu melakukan analisis lebih lanjut untuk mengetahui apa yang salah. Hal ini bisa mencakup penggantian asumsi tertentu, pengubahan hubungan sebab-akibat, atau bahkan penambahan data baru yang sebelumnya tidak dipertimbangkan. Perubahan ini bertujuan untuk menyempurnakan model agar lebih mencerminkan kondisi nyata.

6. Implementasi Model untuk Pengambilan Keputusan

Implementasi model untuk pengambilan keputusan adalah tahap akhir dalam pengembangan model sistem dinamik, di mana model yang telah divalidasi dan disempurnakan digunakan untuk menganalisis kebijakan atau skenario yang diusulkan. Pada tahap ini, model dapat digunakan untuk mengevaluasi dampak jangka panjang dari berbagai keputusan yang diambil. Pemodel sistem dinamik dapat mensimulasikan perubahan dalam variabel-variabel kunci, sehingga memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai bagaimana kebijakan yang berbeda dapat mempengaruhi sistem. Hal ini memungkinkan pengambil keputusan untuk merencanakan kebijakan yang lebih efektif dan menghindari risiko keputusan yang kurang tepat.

D. Flow Diagram dalam Sistem Dinamik

Flow diagram adalah representasi grafis dari hubungan antara berbagai komponen dalam suatu sistem. Dalam konteks sistem dinamik, flow diagram menunjukkan bagaimana variabel-variabel dalam sistem terhubung dan bagaimana perubahan pada satu variabel dapat mempengaruhi variabel lainnya. Menurut Sterman (2002), flow diagram dalam sistem dinamik terdiri dari dua jenis elemen utama, yaitu *stock* dan *flow*. *Stock* merujuk pada variabel yang menyimpan atau mengakumulasi nilai dalam sistem, sementara *flow* adalah aliran yang mengubah nilai dari *stock* tersebut. Kedua elemen ini saling terkait, dan aliran (*flow*) yang terjadi mempengaruhi perubahan dalam persediaan

(*stock*). Contoh sederhana dalam sistem dinamik adalah model populasi. Di sini, populasi adalah *stock*, sementara tingkat kelahiran dan kematian adalah *flow* yang mempengaruhi jumlah populasi. Dalam hal ini, *flow* diagram akan menggambarkan hubungan antara kelahiran, kematian, dan populasi, serta bagaimana perubahan dalam satu faktor dapat mempengaruhi keseluruhan sistem.

1. Elemen-Elemen dalam Flow Diagram

Pada flow diagram, terdapat beberapa elemen penting yang harus dipahami, antara lain:

- a. *Stock* (Persediaan) adalah variabel yang menunjukkan jumlah atau nilai akumulatif dari suatu elemen dalam sistem pada waktu tertentu. *Stock* menggambarkan keadaan atau status dari suatu sistem pada saat tertentu. Misalnya, dalam sistem distribusi barang, *stock* bisa merujuk pada jumlah barang yang ada di gudang.
- b. *Flow* (Aliran) adalah variabel yang menggambarkan perubahan dalam nilai *stock* selama periode waktu tertentu. *Flow* biasanya diukur dalam satuan waktu tertentu, seperti per jam, per hari, atau per tahun. *Flow* mengalir ke dalam atau keluar dari *stock*, dan mempengaruhi perubahan jumlah *stock* tersebut.
- c. *Feedback Loops* (Umpan Balik) adalah siklus yang terjadi ketika output dari suatu sistem kembali mempengaruhi input, yang kemudian mempengaruhi dinamika sistem secara keseluruhan. Umpan balik dapat bersifat positif atau negatif, tergantung pada bagaimana pengaruhnya terhadap sistem.
- d. Bergantung pada Waktu Dalam sistem dinamik, flow diagram menggambarkan perubahan yang terjadi sepanjang waktu. Waktu adalah elemen yang sangat penting dalam flow diagram karena sistem dinamik berfokus pada perubahan yang terjadi dalam jangka waktu tertentu.
- e. Keterkaitan Antar Elemen Flow diagram juga menggambarkan keterkaitan antar elemen dalam sistem. Sebagai contoh, dalam pemodelan sistem energi, *stock* dapat mencakup jumlah energi yang tersedia, sementara *flow* menggambarkan bagaimana energi tersebut digunakan atau disalurkan ke berbagai sektor.

2. Fungsi Flow Diagram dalam Pemodelan Sistem Dinamik

Flow diagram berfungsi sebagai alat visual yang membantu pemodel untuk memahami struktur sistem dan bagaimana elemen-elemen sistem saling berinteraksi. Selain itu, flow diagram juga berfungsi untuk:

- a. Mengidentifikasi Hubungan Sebab-Akibat Flow diagram membantu para pemodel untuk memahami hubungan sebab-akibat dalam sistem. Dengan menggambarkan aliran antara *stock* dan *flow*, pemodel dapat melihat bagaimana perubahan pada satu variabel dapat mempengaruhi variabel lainnya dalam jangka waktu tertentu.
- b. Menganalisis Dampak Kebijakan atau Keputusan Flow diagram digunakan untuk menganalisis dampak dari berbagai kebijakan atau keputusan yang mungkin diambil. Dalam sistem dinamik, para pemodel dapat mengevaluasi bagaimana perubahan dalam satu bagian sistem dapat mempengaruhi keseluruhan sistem. Misalnya, dalam pemodelan kebijakan pengelolaan sumber daya alam, flow diagram membantu untuk memprediksi dampak dari kebijakan pengurangan konsumsi terhadap ketersediaan sumber daya.
- c. Membantu dalam Proses Simulasi Flow diagram menjadi dasar untuk melakukan simulasi dalam sistem dinamik. Dengan memodelkan hubungan antara *stock* dan *flow*, pemodel dapat menjalankan simulasi untuk melihat bagaimana sistem akan bereaksi terhadap perubahan input atau kebijakan yang diambil.
- d. Menggambarkan Perubahan Seiring Waktu Salah satu ciri khas dari sistem dinamik adalah fokus pada perubahan seiring waktu. Flow diagram menggambarkan bagaimana elemen-elemen dalam sistem berubah seiring berjalannya waktu dan bagaimana perubahan tersebut berkontribusi terhadap dinamika sistem secara keseluruhan.

3. Penggunaan Flow Diagram dalam Situasi Pengambilan Keputusan

Pada pengambilan keputusan, flow diagram sangat berguna untuk memvisualisasikan berbagai skenario dan mengidentifikasi efek dari keputusan yang diambil. Misalnya, dalam situasi pengambilan keputusan terkait kebijakan ekonomi, flow diagram dapat membantu pengambil keputusan untuk memahami dampak jangka panjang dari

berbagai kebijakan fiskal atau moneter. Menurut Forrester (1997), flow diagram dalam pemodelan sistem dinamik digunakan untuk membahas berbagai alternatif kebijakan dan untuk memahami dampaknya dalam jangka panjang. Model semacam ini berguna untuk pengambilan keputusan yang kompleks, seperti dalam manajemen sumber daya, pengelolaan populasi, atau perencanaan pembangunan. Flow diagram juga digunakan untuk mengevaluasi keputusan dalam konteks *feedback loops*. Sebagai contoh, dalam kebijakan pengelolaan kesehatan, kebijakan pengurangan tingkat merokok dapat memiliki dampak jangka panjang yang dipengaruhi oleh *feedback loop*. Pengurangan merokok dapat mengurangi tingkat penyakit jantung, yang pada gilirannya dapat mengurangi beban biaya kesehatan. Dengan memvisualisasikan hubungan ini dalam flow diagram, pemodel dapat mengevaluasi dampak dari kebijakan tersebut.

4. Contoh Flow Diagram dalam Sistem Dinamik

Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai penerapan flow diagram dalam sistem dinamik, berikut adalah contoh aplikasi dalam pengelolaan sumber daya alam:

- a. Pemodelan Sumber Daya Air: Flow diagram untuk pemodelan pengelolaan sumber daya air akan mencakup elemen-elemen seperti jumlah air yang tersedia (*stock*), penggunaan air (*flow*), dan tingkat pemulihan sumber daya air (*flow*). Dalam diagram ini, *stock* akan menunjukkan jumlah air yang tersedia dalam suatu daerah, sedangkan *flow* akan menggambarkan aliran penggunaan air untuk berbagai sektor seperti pertanian, industri, dan rumah tangga. *Feedback loop* dalam sistem ini dapat menggambarkan bagaimana perubahan kebijakan (misalnya, pengurangan penggunaan air) dapat meningkatkan jumlah air yang tersedia, yang pada gilirannya akan mempengaruhi kebijakan penggunaan air.
- b. Pemodelan Ekonomi: dalam pemodelan ekonomi, flow diagram dapat digunakan untuk memodelkan hubungan antara pengeluaran konsumen, produksi, dan pengeluaran pemerintah. Misalnya, *stock* dapat menggambarkan total pengeluaran konsumen, sementara *flow* akan menggambarkan aliran barang dan jasa dalam perekonomian. *Feedback loop* dalam diagram ini dapat menggambarkan bagaimana peningkatan konsumsi

dapat meningkatkan produksi, yang pada gilirannya akan meningkatkan pendapatan dan konsumsi.

E. Soal Latihan

1. Jelaskan secara rinci pengertian pemodelan keputusan dalam konteks sistem dinamik. Apa tujuan dari pemodelan keputusan ini, dan bagaimana pemodelan keputusan membantu dalam proses pengambilan keputusan yang kompleks?
2. Pada sistem dinamik, terdapat tiga elemen utama yang membentuk dasar pemodelan, yaitu variabel stok, variabel aliran (*flow*), dan *feedback loops*. Jelaskan definisi dan fungsi dari setiap elemen ini dalam konteks pemodelan keputusan.
3. Jelaskan langkah-langkah yang perlu dilakukan dalam pengembangan model sistem dinamik untuk analisis keputusan. Mulailah dengan mendefinisikan masalah, identifikasi elemen-elemen utama, dan akhirnya buat flow diagram untuk memodelkan dinamika sistem.
4. Buatlah flow diagram yang menggambarkan sebuah sistem dinamik yang terkait dengan keputusan manajerial dalam perusahaan. Misalnya, perusahaan yang memutuskan untuk meningkatkan produksi berdasarkan permintaan pasar. Identifikasi elemen stok dan flow dalam model ini serta bagaimana *feedback loop* dapat mempengaruhi keputusan yang diambil.
5. Jelaskan bagaimana sensitivitas model sistem dinamik diuji untuk memastikan validitas hasil model. Apa yang dimaksud dengan analisis sensitivitas dalam konteks pemodelan keputusan?

BAB V

DINAMIKA PROYEK (PROJECT DYNAMICS)

Kemampuan Akhir yang Diharapkan

Mampu memahami terkait dengan konsep dinamika proyek dalam sistem dinamik, serta memahami aplikasi model sistem dinamik di berbagai bidang, sehingga pembaca dapat memberikan pemahaman konseptual dan praktik praktis kepada pembaca, sehingga mampu menggunakan pendekatan sistem dinamis untuk mengatasi permasalahan nyata secara holistik.

Materi Pembelajaran

- Konsep Dinamika Proyek dalam Sistem Dinamik
- Aplikasi Model Sistem Dinamik di Berbagai Bidang
- Soal Latihan

A. Konsep Dinamika Proyek dalam Sistem Dinamik

Dinamika proyek adalah konsep yang merujuk pada analisis dan pemahaman bagaimana berbagai elemen dalam sebuah proyek berinteraksi dan berubah seiring waktu. Dalam konteks sistem dinamik, dinamika proyek mengacu pada model yang menggambarkan hubungan antar variabel yang mempengaruhi jalannya proyek, seperti waktu, biaya, sumber daya, dan kinerja. Pemodelan dinamika proyek memberikan wawasan yang penting untuk mengelola ketidakpastian, mengidentifikasi potensi risiko, serta mengevaluasi dampak kebijakan dan keputusan dalam konteks manajemen proyek.

Sistem dinamik, yang pertama kali diperkenalkan oleh Jay W. Forrester pada tahun 1960-an, merupakan pendekatan untuk memahami sistem yang kompleks yang terdiri dari interaksi antar elemen-elemen dalam waktu yang terus berkembang. Pendekatan ini sangat berguna dalam memodelkan proyek yang memiliki ketergantungan yang tinggi antar berbagai faktor dan variabel yang dinamis. Melalui pemodelan

sistem dinamik, manajer proyek dapat mengidentifikasi umpan balik (*feedback loops*) yang mungkin terjadi dalam proyek dan memprediksi bagaimana perubahan dalam satu elemen proyek dapat mempengaruhi seluruh sistem.

Dinamika proyek adalah studi tentang perubahan dan interaksi antar elemen dalam proyek yang dapat mempengaruhi hasil akhirnya. Dalam sistem dinamik, dinamika proyek sering digambarkan dengan menggunakan model yang terdiri dari variabel stok (*stock variables*), aliran (*flow variables*), dan umpan balik (*feedback loops*). Model ini menggambarkan bagaimana variabel-variabel tersebut berinteraksi untuk menghasilkan output yang dapat diprediksi atau dianalisis secara sistematis.

Variabel stok dalam dinamika proyek bisa meliputi jumlah sumber daya yang tersedia, jumlah tugas yang selesai, atau jumlah biaya yang telah dikeluarkan. Variabel aliran, di sisi lain, menggambarkan perubahan dalam stok ini, seperti aliran sumber daya atau aliran pekerjaan yang dilakukan. Umpan balik (*feedback*) menggambarkan bagaimana hasil dari variabel stok mempengaruhi variabel lain dalam sistem, yang kemudian bisa mengubah aliran dan akhirnya mempengaruhi stok itu sendiri. Dalam menganalisis dinamika proyek menggunakan sistem dinamik, ada beberapa elemen penting yang perlu diperhatikan. Beberapa elemen utama yang digunakan dalam pemodelan dinamika proyek meliputi stok, aliran, dan umpan balik, yang semuanya bekerja bersama untuk menggambarkan interaksi antar komponen proyek:

1. Variabel Stok

Variabel stok merupakan salah satu elemen penting dalam pemodelan sistem dinamik, yang menggambarkan akumulasi atau jumlah suatu entitas yang dapat diukur dalam sistem. Dalam konteks proyek, stok merujuk pada nilai atau jumlah yang terakumulasi dari variabel aliran yang terjadi selama proses proyek berlangsung. Misalnya, dalam proyek pembangunan, stok bisa berupa jumlah sumber daya yang tersedia, jumlah pekerjaan yang telah diselesaikan, atau biaya yang sudah terakumulasi. Variabel stok ini berubah seiring waktu, mengikuti dinamika aliran input dan output yang mempengaruhi sistem tersebut.

Pada sebuah proyek pembangunan, stok memiliki peran penting dalam menggambarkan status terkini dari elemen-elemen utama yang terlibat dalam proyek tersebut. Sebagai contoh, stok "jumlah pekerja yang tersedia" memberikan gambaran mengenai kapasitas tenaga kerja yang dapat digunakan pada setiap tahap pekerjaan. Jika jumlah pekerja berkurang karena rotasi atau pengurangan tenaga kerja, maka stok ini akan menurun, yang bisa mempengaruhi kemajuan proyek. Begitu pula dengan stok "jumlah material yang sudah dipesan," yang mengukur akumulasi material yang siap digunakan dalam konstruksi.

2. Variabel Flow

Variabel aliran atau flow adalah elemen yang menggambarkan perubahan dalam stok dalam suatu sistem dinamik. Dalam konteks proyek, aliran menunjukkan dinamika atau proses yang terjadi seiring berjalannya waktu. Aliran ini berfungsi untuk mengubah atau mempengaruhi jumlah stok yang ada, baik itu meningkatkan atau mengurangnya. Dalam proyek konstruksi, misalnya, aliran bisa mencakup berbagai faktor, seperti kecepatan pengerjaan tugas atau pengeluaran biaya pada periode tertentu. Aliran ini memberikan gambaran yang lebih jelas tentang seberapa cepat suatu proses atau aktivitas terjadi dalam sistem proyek.

Aliran dalam proyek dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk keputusan yang diambil oleh manajer proyek atau pemangku kepentingan lainnya. Sebagai contoh, jika manajer proyek memutuskan untuk menambah jumlah pekerja, aliran dalam proyek, seperti "jumlah pekerja yang ditugaskan," dapat meningkat, yang pada gilirannya akan mempercepat penyelesaian tugas-tugas proyek. Begitu juga, perubahan dalam aliran material, seperti "jumlah material yang digunakan per bulan," dapat dipengaruhi oleh keputusan tentang penjadwalan pengiriman atau perubahan dalam cara material digunakan dalam konstruksi.

3. Feedback Loop

Feedback loop adalah konsep kunci dalam pemodelan sistem dinamik yang menggambarkan bagaimana perubahan dalam suatu elemen (baik itu stok atau aliran) dapat mempengaruhi elemen lainnya dalam sistem. *Feedback loop* berperan penting dalam menciptakan hubungan sebab-akibat antara berbagai elemen dan memperlihatkan

bagaimana interaksi di dalam sistem dapat berkontribusi pada evolusinya. Terdapat dua jenis utama *feedback loop*, yaitu *reinforcing feedback* (umpan balik positif) dan *balancing feedback* (umpan balik negatif), yang masing-masing memiliki dampak berbeda terhadap sistem.

Reinforcing feedback atau umpan balik positif terjadi ketika perubahan dalam suatu elemen sistem mempercepat atau memperbesar perubahan tersebut. Misalnya, dalam konteks ekonomi, peningkatan pengeluaran konsumen dapat meningkatkan permintaan barang dan jasa, yang kemudian mendorong produksi lebih banyak, sehingga menciptakan lebih banyak pendapatan dan meningkatkan konsumsi lebih lanjut. Hal ini menciptakan siklus yang memperkuat dirinya sendiri, mempercepat pertumbuhan atau perubahan yang terjadi dalam sistem.

Balancing feedback atau umpan balik negatif berfungsi untuk menyeimbangkan perubahan dalam sistem. Umpan balik negatif cenderung memperlambat atau mengurangi dampak perubahan tersebut, yang bertujuan untuk menjaga kestabilan sistem. Sebagai contoh, dalam ekologi, jika populasi predator meningkat, maka jumlah mangsa akan berkurang, yang pada akhirnya akan mengurangi jumlah predator karena kurangnya makanan. Proses ini berfungsi untuk menjaga keseimbangan antara predator dan mangsa, mencegah pertumbuhan populasi yang tidak terkendali.

B. Aplikasi Model Sistem Dinamik di Berbagai Bidang

Pemodelan sistem dinamik (SD) telah berkembang pesat dalam berbagai sektor dan telah diaplikasikan untuk menyelesaikan masalah yang kompleks dan tidak terduga. Sistem dinamik memberi wawasan yang dalam mengenai bagaimana berbagai elemen dalam sebuah sistem berinteraksi dan berkembang seiring waktu. Aplikasi model sistem dinamik di bidang manajemen proyek, industri dan logistik, lingkungan dan energi, serta kesehatan dan kebijakan publik memberikan gambaran yang jelas tentang potensi dan manfaat model ini dalam memecahkan masalah dunia nyata.

1. Manajemen Proyek

Pada manajemen proyek, model sistem dinamik digunakan untuk mengelola ketidakpastian, meningkatkan perencanaan, serta memantau dan mengendalikan jalannya proyek. Pemodelan ini memungkinkan manajer proyek untuk melihat hubungan yang saling terkait antara berbagai variabel dalam proyek, seperti biaya, jadwal, kualitas, dan sumber daya. Model sistem dinamik juga dapat digunakan untuk mensimulasikan skenario yang berbeda dan mengevaluasi dampak dari keputusan-keputusan yang diambil sepanjang siklus hidup proyek. Aplikasi Sistem Dinamik dalam Manajemen Proyek:

a. Pengelolaan Waktu dan Biaya

Pengelolaan waktu dan biaya merupakan dua aspek penting dalam manajemen proyek yang sering kali menjadi tantangan utama bagi para manajer proyek. Model sistem dinamik dapat digunakan untuk menganalisis dan memetakan hubungan antara aliran waktu dan dana dalam proyek, serta bagaimana kedua variabel tersebut saling mempengaruhi. Dengan memodelkan aliran tersebut, manajer proyek dapat memahami dinamika yang terjadi dalam proyek dan mengidentifikasi faktor-faktor yang dapat menyebabkan keterlambatan atau pembengkakan biaya (Senge, 2014).

b. Evaluasi Keputusan Proyek

Evaluasi keputusan proyek adalah proses krusial dalam manajemen proyek, karena keputusan-keputusan yang diambil dapat mempengaruhi keberhasilan proyek secara keseluruhan. Misalnya, keputusan untuk mengalokasikan lebih banyak sumber daya atau melakukan perubahan dalam ruang lingkup proyek dapat menyebabkan perubahan yang signifikan dalam hasil akhir. Dalam konteks ini, model sistem dinamik dapat berfungsi sebagai alat yang efektif untuk mengevaluasi dampak dari berbagai alternatif kebijakan. Dengan memodelkan aliran sumber daya, waktu, dan biaya, manajer proyek dapat mengidentifikasi potensi risiko yang terkait dengan keputusan yang diambil.

c. Simulasi dan Prediksi

Simulasi dan prediksi berperan penting dalam manajemen proyek, khususnya untuk merencanakan dan mengelola risiko secara efektif. Dengan menggunakan model sistem dinamik, manajer proyek dapat mensimulasikan berbagai skenario yang

memungkinkan untuk melihat dampak dari berbagai keputusan dan kondisi yang berbeda. Misalnya, dalam proyek konstruksi, model dapat mensimulasikan aliran material dan tenaga kerja yang diperlukan untuk berbagai tahap proyek. Dengan demikian, manajer proyek dapat mengidentifikasi potensi masalah, seperti kekurangan material atau tenaga kerja yang tidak cukup, sebelum masalah tersebut terjadi.

2. Industri dan Logistik

Industri dan logistik adalah sektor yang sangat bergantung pada aliran barang, sumber daya, dan informasi yang efisien. Pemodelan sistem dinamik dapat membantu mengoptimalkan rantai pasokan, meningkatkan manajemen persediaan, serta meningkatkan efisiensi operasi dan distribusi. Dalam industri, sistem dinamik dapat digunakan untuk memodelkan interaksi kompleks dalam rantai pasokan yang melibatkan banyak pemasok, produsen, dan pelanggan. Aplikasi Sistem Dinamik dalam Industri dan Logistik:

a. Manajemen Rantai Pasokan

Manajemen rantai pasokan adalah salah satu aspek yang sangat penting dalam industri dan logistik, di mana perusahaan perlu memastikan bahwa barang atau bahan mentah sampai tepat waktu dan dalam jumlah yang tepat. Model sistem dinamik dapat digunakan untuk memahami bagaimana berbagai elemen dalam rantai pasokan saling berhubungan dan bagaimana perubahan dalam satu elemen dapat mempengaruhi keseluruhan sistem. Misalnya, jika terjadi perubahan dalam permintaan pasar, ini akan memengaruhi jumlah barang yang perlu diproduksi dan dikirim. Dengan menggunakan model sistem dinamik, perusahaan dapat memprediksi dampak dari perubahan ini dan membuat keputusan yang lebih tepat (Meadows & Wright, 2008).

Dengan memetakan hubungan antara stok, aliran barang, dan faktor-faktor eksternal lainnya, model ini memungkinkan perusahaan untuk mengidentifikasi titik-titik lemah dalam rantai pasokan. Misalnya, perusahaan dapat mengetahui apakah ada ketidakseimbangan antara kapasitas produksi dan kebutuhan pasar atau jika ada masalah dalam proses distribusi yang dapat menyebabkan keterlambatan pengiriman. Dengan informasi ini,

perusahaan dapat mengambil langkah-langkah untuk memperbaiki sistem dan mengurangi kemungkinan terjadinya masalah yang dapat merugikan.

b. Pengelolaan Persediaan

Pengelolaan persediaan yang efisien adalah aspek penting dalam operasi logistik dan industri, karena pengelolaan stok yang tepat dapat mempengaruhi biaya operasional dan kepuasan pelanggan. Model sistem dinamik berperan penting dalam mengoptimalkan tingkat persediaan dengan memodelkan aliran barang yang masuk dan keluar dari gudang atau fasilitas penyimpanan. Dengan menggunakan model ini, perusahaan dapat memprediksi kebutuhan persediaan berdasarkan tren permintaan dan mengidentifikasi waktu yang tepat untuk memesan ulang produk. Hal ini membantu menghindari kekurangan stok yang dapat mengganggu kelancaran operasional dan juga mengurangi risiko kelebihan persediaan yang dapat menyebabkan pemborosan.

Model sistem dinamik dapat memperhitungkan berbagai faktor yang memengaruhi pengelolaan persediaan, seperti lead time (waktu antara pemesanan dan penerimaan barang), fluktuasi permintaan, dan kapasitas penyimpanan. Dengan memahami hubungan antar variabel ini, perusahaan dapat merencanakan dan mengelola stok dengan lebih efektif, memastikan bahwa barang tersedia ketika dibutuhkan tanpa menimbulkan pemborosan. Selain itu, model ini juga memungkinkan perusahaan untuk mengantisipasi fluktuasi permintaan dan menyesuaikan strategi pemesanan agar stok tetap dalam jumlah yang optimal.

c. Sistem Distribusi

Pada sistem distribusi, perusahaan sering menghadapi tantangan besar dalam mengoptimalkan rute pengiriman, mengelola armada kendaraan, dan memastikan barang sampai di tujuan tepat waktu. Model sistem dinamik dapat membantu memetakan dan menganalisis interaksi antara berbagai elemen dalam sistem distribusi tersebut, seperti armada, lokasi gudang, dan jalur pengiriman. Dengan memahami hubungan antara faktor-faktor ini, perusahaan dapat merancang sistem distribusi yang lebih efisien, yang tidak hanya mengurangi biaya transportasi tetapi juga meningkatkan kecepatan pengiriman barang ke konsumen.

Model sistem dinamik memungkinkan perusahaan untuk mensimulasikan berbagai skenario pengiriman dan distribusi berdasarkan parameter yang berbeda, seperti permintaan pasar, kondisi jalan, dan kapasitas armada. Dengan menggunakan simulasi ini, perusahaan dapat mengevaluasi rute pengiriman yang paling efisien dan mengidentifikasi potensi hambatan yang dapat mempengaruhi waktu pengiriman. Sebagai contoh, jika suatu rute menghadapi kemacetan atau gangguan lainnya, model ini dapat memperlihatkan bagaimana perubahan jalur dapat mengurangi waktu tempuh dan biaya operasional.

3. Lingkungan dan Energi

Di bidang lingkungan dan energi, model sistem dinamik digunakan untuk memodelkan sistem ekologis, perubahan iklim, dan distribusi energi. Sistem ini sangat kompleks karena melibatkan banyak faktor yang saling terkait, termasuk kebijakan energi, produksi dan konsumsi energi, serta dampak lingkungan dari berbagai sumber energi. Aplikasi Sistem Dinamik dalam Lingkungan dan Energi:

a. Pemodelan Perubahan Iklim

Pemodelan perubahan iklim menggunakan sistem dinamik memungkinkan para ilmuwan dan pembuat kebijakan untuk memahami dan memprediksi dampak jangka panjang dari aktivitas manusia terhadap lingkungan. Dengan model ini, emisi gas rumah kaca, seperti karbon dioksida (CO₂), dapat dipetakan untuk melihat bagaimana peningkatan atau penurunan emisi mempengaruhi suhu global. Model ini dapat mengidentifikasi hubungan antara berbagai faktor, seperti deforestasi, penggunaan energi fosil, dan polusi udara, serta bagaimana berkontribusi terhadap perubahan iklim. Melalui pemodelan dinamik, kita bisa mendapatkan gambaran yang lebih jelas tentang bagaimana keputusan yang diambil sekarang akan memengaruhi lingkungan di masa depan.

b. Pengelolaan Sumber Daya Alam

Sistem dinamik berperan penting dalam pengelolaan sumber daya alam dengan memberikan wawasan tentang bagaimana sumber daya yang terbatas, seperti air, energi, dan hutan, digunakan dan dilestarikan. Dalam hal pengelolaan air, model dinamik dapat membantu memprediksi dampak kebijakan

pengelolaan sumber daya air terhadap ketersediaan air bersih. Misalnya, model dapat mensimulasikan skenario di mana terjadi peningkatan penggunaan air, perubahan pola curah hujan, atau implementasi kebijakan penghematan air, dan bagaimana faktor-faktor ini akan memengaruhi persediaan air dalam jangka panjang. Dengan demikian, pemodelan dinamik memungkinkan identifikasi potensi masalah dan solusi yang lebih efektif untuk mengelola sumber daya air yang terbatas.

c. Transisi Energi dan Kebijakan Energi Terbarukan

Transisi energi dari sumber energi fosil ke energi terbarukan adalah tantangan besar yang membutuhkan perencanaan dan kebijakan yang matang. Pemodelan sistem dinamik dapat berperan penting dalam memetakan dan mengevaluasi dampak transisi ini terhadap berbagai aspek, seperti harga energi, pasokan energi, dan perekonomian secara keseluruhan. Dalam hal ini, model dapat mengintegrasikan berbagai variabel, seperti investasi dalam infrastruktur energi terbarukan, perkembangan teknologi, dan kebijakan pemerintah yang mendukung penggunaan energi terbarukan. Dengan menggunakan model dinamik, keputusan dapat didasarkan pada prediksi yang lebih akurat mengenai bagaimana transisi energi ini akan mempengaruhi pasar energi di masa depan.

4. Kesehatan dan Kebijakan Publik

Pada bidang kesehatan dan kebijakan publik, sistem dinamik digunakan untuk memodelkan penyebaran penyakit, dampak kebijakan kesehatan, dan evaluasi sistem kesehatan secara keseluruhan. Pemodelan ini memberikan alat yang kuat untuk mengevaluasi kebijakan dan memprediksi efek jangka panjang dari berbagai keputusan kebijakan dalam sistem kesehatan. Aplikasi Sistem Dinamik dalam Kesehatan dan Kebijakan Publik:

a. Penyebaran Penyakit

Pemodelan penyebaran penyakit menggunakan sistem dinamik menjadi alat yang sangat penting dalam mengatasi wabah penyakit, seperti influenza, COVID-19, atau penyakit menular lainnya. Dalam konteks ini, model sistem dinamik dapat membantu memetakan bagaimana suatu patogen menyebar melalui populasi manusia, dengan mempertimbangkan variabel

seperti tingkat kontak antar individu, tingkat infektivitas, serta keberadaan individu yang terinfeksi dan rentan. Dengan memahami dinamika penyebaran penyakit, model ini dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam tentang bagaimana penyakit berkembang dan tersebar di dalam komunitas, serta apa saja faktor yang mempercepat atau memperlambat penyebaran tersebut.

Pemodelan ini juga dapat digunakan untuk mengevaluasi dampak dari berbagai kebijakan pencegahan, seperti vaksinasi massal, pembatasan sosial, atau pengenaan karantina. Model sistem dinamik memungkinkan simulasi berbagai skenario yang berbeda, membantu pihak berwenang dalam merencanakan kebijakan yang paling efektif dan efisien untuk mengurangi jumlah kasus dan meminimalkan penyebaran penyakit. Misalnya, model dapat memprediksi seberapa besar efek dari vaksinasi terhadap penurunan angka infeksi, atau bagaimana penerapan pembatasan sosial dapat memperlambat laju penyebaran penyakit.

b. Evaluasi Kebijakan Kesehatan

Pemodelan sistem dinamik sangat berguna dalam mengevaluasi kebijakan kesehatan, terutama dalam hal perencanaan anggaran dan perbaikan sistem perawatan kesehatan. Misalnya, model ini dapat digunakan untuk menganalisis dampak peningkatan anggaran kesehatan terhadap hasil kesehatan masyarakat, seperti penurunan angka kematian atau peningkatan harapan hidup. Dalam hal ini, sistem dinamik memungkinkan para pembuat kebijakan untuk mensimulasikan efek dari perubahan anggaran dan alokasi sumber daya, serta bagaimana hal tersebut berinteraksi dengan faktor-faktor lain dalam sistem kesehatan, seperti ketersediaan fasilitas medis dan tenaga kesehatan.

Model sistem dinamik dapat membantu mengevaluasi perubahan regulasi, seperti pembaruan kebijakan asuransi kesehatan atau peraturan terkait tarif perawatan. Dengan memodelkan bagaimana perubahan kebijakan dapat mempengaruhi jumlah klaim asuransi, biaya perawatan, dan akses ke layanan kesehatan, para pemangku kepentingan dapat memprediksi dampak jangka panjang dari kebijakan tersebut. Misalnya, jika kebijakan baru memperkenalkan asuransi

kesehatan yang lebih terjangkau, model dapat digunakan untuk mengidentifikasi apakah ini akan meningkatkan akses ke perawatan atau justru meningkatkan beban pada sistem kesehatan.

c. **Pengelolaan Krisis Kesehatan**

Pada krisis kesehatan seperti pandemi atau bencana alam, model sistem dinamik memberikan alat yang sangat berguna untuk merencanakan respons yang efektif dan terkoordinasi. Pemodelan ini memungkinkan pihak berwenang untuk mensimulasikan berbagai skenario berdasarkan kecepatan penyebaran penyakit, tingkat infeksi, dan kapasitas sistem kesehatan. Dengan demikian, para pembuat kebijakan dapat memprediksi kebutuhan tenaga medis, peralatan medis, dan sumber daya lainnya, serta menyesuaikan alokasi sumber daya untuk memastikan respon yang optimal. Sebagai contoh, model dapat digunakan untuk menentukan kapan dan di mana vaksin atau obat-obatan perlu didistribusikan berdasarkan prediksi jumlah kasus yang akan datang.

Sistem dinamik juga dapat membantu dalam merencanakan intervensi yang lebih terstruktur, seperti pembatasan sosial, pengujian massal, dan isolasi pasien. Dengan memodelkan efek dari berbagai tindakan pencegahan, model ini memungkinkan analisis dampak dari kebijakan yang diterapkan. Hal ini membantu pemerintah dan lembaga kesehatan untuk mengevaluasi efektivitas dari intervensi yang ada, misalnya, mengukur apakah penutupan wilayah atau pembatasan mobilitas akan memperlambat penyebaran penyakit atau jika intervensi tersebut justru menambah beban ekonomi.

C. Soal Latihan

1. Pada sebuah proyek konstruksi, terdapat beberapa variabel penting yang memengaruhi hasil akhir proyek, seperti alokasi dana, waktu, jumlah tenaga kerja, dan pasokan material. Buatlah model sistem dinamik untuk proyek ini dan analisis bagaimana masing-masing variabel saling berinteraksi. Gunakan konsep variabel stock, flow, dan *feedback loops* dalam penjelasan Anda.

2. Pada pengelolaan proyek besar, keputusan yang diambil sering kali mempengaruhi hasil akhir proyek. Diskusikan bagaimana model sistem dinamik dapat digunakan untuk membantu manajer proyek dalam memprediksi dampak dari keputusan yang dibuat terkait alokasi sumber daya, jadwal, dan anggaran.
3. Analisis dampak dari *feedback loops* positif dan negatif dalam sebuah proyek konstruksi yang melibatkan banyak sub-kontraktor. Jelaskan bagaimana *feedback* positif dapat menguntungkan dalam mempercepat progres, namun juga bisa membawa risiko yang signifikan jika tidak dikelola dengan baik.
4. Pada proyek yang memiliki sumber daya terbatas, seperti dana atau tenaga kerja, bagaimana sistem dinamik dapat membantu dalam merencanakan distribusi sumber daya tersebut untuk mengoptimalkan hasil proyek?
5. Diskusikan bagaimana ketidakpastian dan risiko dapat dimodelkan dalam sistem dinamik dalam konteks proyek konstruksi yang besar. Apa saja pendekatan yang dapat digunakan untuk mengelola ketidakpastian ini, dan bagaimana model sistem dinamik membantu dalam memprediksi dan merespons perubahan yang tidak terduga?

BAB VI

VALIDASI DAN VERIFIKASI MODEL

SISTEM DINAMIK

Kemampuan Akhir yang Diharapkan

Mampu memahami terkait dengan konsep validasi dalam sistem dinamik, memahami jenis-jenis validasi model dinamik, memahami langkah-langkah validasi dan verifikasi model, serta memahami teknik evaluasi kinerja model, sehingga pembaca dapat memahami konsep dan keterampilan teknis yang memungkinkan pembaca mengembangkan, memvalidasi, dan menyebarkan model sistem dinamis secara profesional dan efektif.

Materi Pembelajaran

- Konsep Validasi dalam Sistem Dinamik
- Jenis-Jenis Validasi Model Dinamik
- Langkah-Langkah Validasi dan Verifikasi Model
- Teknik Evaluasi Kinerja Model
- Soal Latihan

A. Konsep Validasi dalam Sistem Dinamik

Validasi dalam sistem dinamik merupakan suatu proses untuk memeriksa dan memastikan bahwa model yang telah dikembangkan sesuai dengan realitas atau sistem yang dimodelkan. Menurut Sterman (2002), validasi adalah suatu upaya untuk memastikan bahwa model yang dihasilkan dapat digunakan untuk memprediksi perilaku nyata dari sistem dinamik yang dimodelkan. Proses ini melibatkan pengujian model dengan data empiris, serta analisis kesesuaian antara hasil simulasi dan fenomena yang diamati dalam dunia nyata. Model yang divalidasi dengan baik dapat digunakan untuk meramalkan perilaku sistem dalam kondisi yang belum diamati, serta membantu pengambilan keputusan yang lebih efektif. Validasi juga penting untuk

mengidentifikasi kemungkinan bias atau ketidakakuratan dalam asumsi yang digunakan selama pembuatan model (Forrester, 2007).

Validasi bertujuan untuk memastikan bahwa model dapat dipercaya untuk memberikan prediksi yang akurat mengenai perilaku sistem. Tujuan-tujuan khusus dari validasi dalam konteks sistem dinamik meliputi:

1. **Memastikan Akurasi Model:** Memastikan bahwa model mencerminkan fenomena dunia nyata yang sedang dimodelkan, baik dalam hal struktur maupun dinamika sistem.
2. **Meningkatkan Keterpercayaan Pengguna:** Model yang tervalidasi akan lebih diterima oleh pengambil keputusan, karena memiliki keyakinan bahwa model tersebut dapat menghasilkan output yang valid.
3. **Menilai Kemampuan Prediktif:** Validasi membantu untuk menilai apakah model dapat memprediksi masa depan dengan tingkat akurasi yang cukup, bahkan di luar data yang telah digunakan dalam pembuatannya.
4. **Identifikasi Ketidakpastian dan Bias:** Validasi dapat mengidentifikasi bagian-bagian model yang mungkin salah atau bias, serta memberikan wawasan mengenai potensi ketidakpastian dalam prediksi model.

B. Jenis-Jenis Validasi Model Dinamik

Validasi dalam konteks sistem dinamik merujuk pada serangkaian langkah untuk memastikan bahwa model yang dikembangkan secara akurat mencerminkan realitas sistem yang dimodelkan. Model yang tervalidasi dengan baik adalah model yang dapat memberikan prediksi yang dapat diterima oleh para pengambil keputusan dan memberikan pemahaman yang lebih baik tentang dinamika sistem yang kompleks. Validasi sangat penting dalam membantu pengembang model dan pengguna untuk memiliki kepercayaan pada hasil model tersebut, terutama ketika model digunakan untuk merumuskan kebijakan atau strategi. Dalam konteks model sistem dinamik, terdapat beberapa jenis validasi yang dapat diterapkan. Jenis-jenis validasi ini membantu untuk memastikan bahwa model yang dikembangkan dapat merefleksikan realitas dan dapat diterima oleh para pemangku kepentingan.

1. Validasi Komparatif

Validasi komparatif adalah jenis validasi yang paling umum dan langsung. Proses ini melibatkan perbandingan antara hasil simulasi model dan data empiris atau observasi nyata. Tujuan dari validasi komparatif adalah untuk memastikan bahwa model dapat mereproduksi hasil yang sesuai dengan fenomena dunia nyata yang sedang dianalisis. Validasi komparatif dilakukan dengan membandingkan output yang dihasilkan oleh model dengan data yang dikumpulkan dari sistem yang sesungguhnya. Misalnya, dalam pemodelan pertumbuhan populasi, hasil dari model sistem dinamik harus dibandingkan dengan data demografis yang ada untuk memastikan bahwa model dapat menangkap pola pertumbuhan yang serupa. Jika hasil simulasi dari model sangat mirip dengan data historis yang tersedia, maka model tersebut dianggap valid.

2. Validasi Struktural

Validasi struktural berfokus pada pemeriksaan apakah struktur dan hubungan antar variabel dalam model sesuai dengan pemahaman teoritis atau pengetahuan yang ada tentang sistem yang dimodelkan. Tujuan dari validasi struktural adalah memastikan bahwa model mencerminkan hubungan sebab-akibat yang benar dan sesuai dengan teori yang ada tentang sistem. Dalam pemodelan sistem dinamik, validasi struktural melibatkan evaluasi hubungan antar elemen dalam model, termasuk *feedback loops*, variabel stock dan flow, serta interaksi antar bagian dari sistem. Ini memastikan bahwa model dibangun dengan dasar logika yang benar dan merepresentasikan struktur sistem yang sebenarnya. Validasi struktural sering kali melibatkan kolaborasi dengan para ahli atau pengguna yang memiliki pengetahuan domain tentang sistem tersebut. Para ahli akan memberikan umpan balik tentang apakah struktur model mencerminkan fenomena yang sesungguhnya dan apakah asumsi yang digunakan dalam model valid.

3. Validasi Berdasarkan Data Empiris (*Data-Driven Validation*)

Validasi berdasarkan data empiris, atau dikenal juga dengan validasi berbasis data, melibatkan pengujian model dengan menggunakan data historis atau data dunia nyata untuk memastikan bahwa model dapat menggambarkan fenomena yang diamati. Pendekatan ini lebih mengutamakan kualitas dan kelengkapan data

yang digunakan untuk menguji keakuratan model. Model yang tervalidasi dengan baik berdasarkan data empiris akan lebih dapat diandalkan dalam meramalkan perilaku sistem di masa depan. Pendekatan ini sangat berguna ketika model digunakan untuk perencanaan atau simulasi jangka panjang, karena mengurangi ketidakpastian yang terkait dengan asumsi dan parameter yang digunakan dalam model.

4. Validasi Sensitivitas

Validasi sensitivitas adalah teknik yang digunakan untuk mengukur seberapa sensitif hasil model terhadap perubahan dalam parameter atau asumsi yang digunakan dalam pembuatan model. Validasi ini dilakukan dengan mengubah nilai-nilai parameter tertentu dalam model dan memeriksa bagaimana perubahan tersebut mempengaruhi hasil simulasi. Validasi sensitivitas memberikan wawasan mengenai ketidakpastian dalam model, yang berasal dari asumsi dan parameter yang digunakan. Jika model sangat sensitif terhadap perubahan dalam satu parameter, maka penting untuk memastikan bahwa parameter tersebut diukur dengan akurat. Sebaliknya, jika model tidak terlalu sensitif terhadap perubahan tertentu, maka parameter tersebut mungkin tidak terlalu berpengaruh dalam konteks model.

5. Validasi Visual

Validasi visual adalah pendekatan yang lebih kualitatif, di mana model diuji berdasarkan visualisasi dan representasi grafis dari struktur dan dinamika sistem. Dalam sistem dinamik, ini melibatkan pemeriksaan diagram alir (*flow diagrams*), diagram *stock-flow*, dan diagram *feedback loops* untuk memastikan bahwa model menggambarkan aliran informasi dan interaksi antar komponen dengan cara yang benar. Validasi visual dilakukan dengan melibatkan pengguna atau ahli domain untuk memeriksa representasi visual dan memastikan bahwa model mencerminkan pemahaman tentang sistem yang dimodelkan. Pendekatan ini membantu dalam mengidentifikasi kesalahan struktural yang tidak dapat terlihat dalam simulasi numerik.

6. Validasi Berdasarkan Eksperimen

Validasi berdasarkan eksperimen melibatkan pengujian model dengan cara melakukan eksperimen atau intervensi pada sistem nyata. Misalnya, jika model digunakan untuk merencanakan perubahan kebijakan dalam suatu organisasi, eksperimen dapat dilakukan dengan mengimplementasikan kebijakan yang diusulkan untuk melihat apakah hasilnya sesuai dengan prediksi model. Pendekatan ini lebih sulit dilakukan karena membutuhkan kontrol yang ketat terhadap variabel-variabel eksternal yang dapat mempengaruhi hasil eksperimen. Namun, eksperimen langsung dapat memberikan bukti yang sangat kuat mengenai validitas model.

C. Langkah-Langkah Validasi dan Verifikasi Model

Validasi dan verifikasi adalah dua aspek penting dalam pengembangan model sistem dinamik yang bertujuan untuk memastikan bahwa model yang dibangun memiliki akurasi yang tinggi dan relevansi terhadap sistem yang dimodelkan. Proses validasi dan verifikasi bertujuan untuk menjamin bahwa model yang digunakan dapat memberikan hasil yang dapat diandalkan untuk analisis dan pengambilan keputusan. Kedua proses ini memiliki tujuan yang saling melengkapi: verifikasi memastikan bahwa model dibangun sesuai dengan struktur yang diinginkan, sementara validasi memastikan bahwa model merepresentasikan dunia nyata dengan akurat.

1. Verifikasi Model

Verifikasi adalah proses untuk memastikan bahwa model yang dikembangkan telah dibangun dengan benar menurut spesifikasi yang ditentukan. Verifikasi memfokuskan pada pemeriksaan teknis dari implementasi model, yaitu apakah model tersebut bekerja sesuai dengan desain dan apakah semua elemen model telah terintegrasi dengan baik.

a. Pemeriksaan Kode dan Simulasi

Verifikasi model dimulai dengan pemeriksaan kode dan hasil simulasi yang dihasilkan oleh sistem dinamik. Pemeriksaan kode bertujuan untuk memastikan bahwa kode model tersebut telah diimplementasikan dengan benar, tanpa adanya kesalahan yang dapat mempengaruhi hasil analisis. Setiap elemen dalam model, seperti rumus, persamaan, dan fungsi yang digunakan

untuk menggambarkan dinamika sistem, perlu diperiksa untuk memastikan bahwa ia diterjemahkan dengan tepat dalam kode. Kesalahan dalam implementasi rumus atau persamaan dapat menyebabkan model menghasilkan prediksi yang tidak akurat, yang berpotensi menyesatkan pengambil keputusan.

Pemeriksaan kode juga melibatkan pengecekan terhadap pengaturan parameter model. Setiap parameter yang digunakan dalam model, seperti laju aliran, koefisien, atau variabel input lainnya, harus diatur dengan benar sesuai dengan tujuan pemodelan. Parameter yang tidak tepat atau tidak realistis dapat menyebabkan model tidak mencerminkan kondisi dunia nyata dengan baik. Oleh karena itu, verifikasi parameter menjadi langkah penting untuk memastikan bahwa model mencerminkan dinamika sistem yang sebenarnya.

Setelah pemeriksaan kode dilakukan, hasil simulasi yang dihasilkan oleh model juga perlu dievaluasi untuk memastikan konsistensinya dengan ekspektasi dan struktur logika yang ada dalam model. Simulasi pertama dapat digunakan sebagai tolok ukur untuk membandingkan apakah model bekerja sesuai dengan yang diharapkan. Jika ada perbedaan signifikan antara hasil simulasi dan ekspektasi, ini menunjukkan adanya kesalahan dalam implementasi atau asumsi yang perlu diperbaiki.

b. Pemeriksaan Konsistensi Struktural

Pemeriksaan konsistensi struktural merupakan tahap penting dalam verifikasi model sistem dinamik, yang bertujuan untuk memastikan bahwa hubungan antar elemen dalam model, seperti variabel stok dan aliran, telah digambarkan secara akurat dan konsisten. Salah satu elemen utama dalam verifikasi struktural adalah diagram alur (*flow diagram*). Diagram ini menggambarkan bagaimana variabel-variabel dalam model berinteraksi satu sama lain. Verifikasi dilakukan untuk memastikan bahwa aliran antar variabel sudah sesuai dengan logika dan dinamika sistem yang ingin dimodelkan. Setiap hubungan yang digambarkan dalam diagram harus mencerminkan interaksi yang nyata dan tidak mengandung ketidakkonsistenan yang dapat menyebabkan model memberikan hasil yang salah.

Pemeriksaan diagram stock-flow juga penting dalam memastikan konsistensi struktural model. Diagram ini menggambarkan hubungan antara stok (misalnya jumlah persediaan atau populasi) dan aliran (seperti laju pertumbuhan atau konsumsi) yang terjadi dalam sistem. Verifikasi dilakukan untuk memeriksa apakah aliran yang menghubungkan stok-stok ini sudah benar dan sesuai dengan aturan yang berlaku dalam dunia nyata. Misalnya, aliran material dalam suatu rantai pasokan harus berhubungan dengan persediaan yang ada, dan perubahan dalam stok harus tercermin dengan tepat dalam aliran yang terjadi.

Evaluasi terhadap umpan balik (*feedback loop*) dalam model juga merupakan bagian penting dari pemeriksaan konsistensi struktural. Dalam sistem dinamik, umpan balik dapat berupa umpan balik positif (*reinforcing feedback*) yang mempercepat perubahan atau umpan balik negatif (*balancing feedback*) yang menyeimbangkan sistem. Verifikasi dilakukan untuk memastikan bahwa kedua jenis umpan balik ini telah diidentifikasi dan dimodelkan dengan benar. Umpan balik positif dan negatif harus menggambarkan dinamika yang sesuai dengan sistem yang dimodelkan, dan setiap perubahan dalam satu elemen harus memengaruhi elemen lainnya dengan cara yang logis dan konsisten.

c. Pengujian Keberlanjutan Model

Pengujian keberlanjutan model merupakan langkah penting dalam proses verifikasi untuk memastikan bahwa model dapat berfungsi dengan baik dalam jangka panjang tanpa mengalami kegagalan atau menghasilkan hasil yang tidak realistis. Salah satu aspek yang diuji dalam tahap ini adalah stabilitas numerik model. Dalam simulasi sistem dinamik, perhitungan yang dilakukan dapat mengakumulasi kesalahan numerik yang dapat menyebabkan hasil yang tidak akurat atau bahkan kegagalan dalam proses simulasi. Oleh karena itu, penting untuk memastikan bahwa model mampu menangani perhitungan secara stabil tanpa menghasilkan pembelokan angka yang besar atau hasil yang melenceng dari ekspektasi.

Pengecekan stabilitas numerik melibatkan berbagai metode untuk memastikan bahwa perhitungan dalam simulasi berjalan

dengan lancar, terutama dalam model yang melibatkan banyak variabel dan hubungan yang kompleks. Salah satu metode yang sering digunakan adalah analisis kestabilan numerik, yang memeriksa apakah perubahan kecil dalam nilai input atau parameter model dapat menyebabkan fluktuasi besar dalam hasil simulasi. Jika model menunjukkan ketidakstabilan numerik, hal ini bisa menjadi indikator bahwa model tersebut perlu diperbaiki atau diubah untuk menghindari masalah tersebut.

Pengujian keberlanjutan model juga mencakup pengujian daya tahan model terhadap perubahan yang terjadi dalam parameter atau kondisi input. Hal ini penting untuk memastikan bahwa model tetap konsisten dan dapat beradaptasi dengan perubahan variabel eksternal atau input yang mungkin terjadi. Misalnya, dalam model ekonomi atau perubahan iklim, faktor-faktor eksternal seperti kebijakan pemerintah atau perubahan pasar dapat memengaruhi hasil model. Verifikasi ini memastikan bahwa model dapat memberikan prediksi yang valid bahkan ketika kondisi yang mendasari berubah.

d. Uji Sensitivitas Internal

Uji sensitivitas internal adalah langkah penting dalam proses verifikasi model yang bertujuan untuk menguji sejauh mana perubahan dalam parameter model dapat mempengaruhi hasil simulasi. Dalam model sistem dinamik, terdapat banyak parameter yang dapat mempengaruhi dinamika sistem. Beberapa parameter tersebut, seperti tingkat pertumbuhan, kecepatan aliran, atau parameter pengendalian, dapat bervariasi dalam nilai. Uji sensitivitas dilakukan dengan memodifikasi nilai-nilai parameter tersebut dan mengamati bagaimana perubahan tersebut mempengaruhi output dari model. Hal ini memberikan gambaran apakah model mampu menghasilkan hasil yang konsisten dan stabil meskipun terdapat fluktuasi kecil dalam input.

Proses uji sensitivitas dapat dilakukan dengan mengganti nilai satu atau lebih parameter secara bertahap dan mencatat bagaimana hasil simulasi berubah. Jika model menunjukkan perubahan yang besar atau tidak wajar meskipun hanya terjadi perubahan kecil pada parameter, hal ini menunjukkan bahwa

model tersebut sangat sensitif terhadap perubahan input dan mungkin tidak dapat diandalkan untuk prediksi yang stabil. Sebaliknya, jika model menunjukkan hasil yang relatif konsisten meskipun parameter berubah, ini menunjukkan bahwa model memiliki tingkat kestabilan yang baik dan lebih dapat diandalkan untuk meramalkan hasil di masa depan.

Penting juga untuk mengevaluasi parameter mana yang paling mempengaruhi hasil model. Beberapa parameter mungkin memiliki dampak yang signifikan terhadap output, sementara yang lainnya mungkin hanya menyebabkan perubahan kecil. Dengan memahami sensitivitas berbagai parameter, model dapat disesuaikan untuk memastikan bahwa elemen-elemen yang paling kritis diperhatikan dengan lebih cermat. Ini membantu dalam meningkatkan akurasi model dan menghindari ketergantungan yang berlebihan pada parameter yang tidak berpengaruh signifikan terhadap hasil.

2. Validasi Model

Validasi adalah proses yang dilakukan untuk memastikan bahwa model yang dikembangkan dapat menggambarkan sistem dunia nyata dengan akurat. Validasi lebih berfokus pada kesesuaian model dengan realitas dan kemampuan model untuk menghasilkan prediksi yang relevan. Dalam konteks sistem dinamik, validasi model melibatkan langkah-langkah untuk memeriksa apakah struktur dan dinamika yang diwakili oleh model sesuai dengan perilaku sistem yang dimodelkan.

a. Validasi Komparatif

Validasi komparatif adalah langkah penting dalam memastikan keakuratan model yang dikembangkan, dengan membandingkan hasil simulasi model dengan data dunia nyata yang relevan. Proses ini dimulai dengan pengumpulan data empiris yang menggambarkan sistem atau fenomena yang sedang dimodelkan. Data tersebut bisa berupa hasil pengamatan, eksperimen, atau data historis yang mencakup berbagai variabel dan parameter yang ada dalam sistem yang sedang dianalisis. Pengumpulan data yang tepat dan representatif sangat penting, karena kualitas data dunia nyata

yang digunakan untuk validasi akan mempengaruhi hasil evaluasi model (Forrester, 2007).

Setelah data empiris dikumpulkan, langkah berikutnya adalah menjalankan simulasi model berdasarkan input yang sama dengan yang digunakan dalam pengumpulan data. Hasil output dari simulasi model kemudian dibandingkan dengan data dunia nyata yang telah dikumpulkan. Proses perbandingan ini memungkinkan kita untuk mengidentifikasi apakah model dapat mereplikasi hasil yang sesuai dengan kondisi di dunia nyata. Dengan kata lain, model harus dapat menghasilkan pola atau tren yang serupa dengan data yang sebenarnya untuk dianggap valid.

Untuk mengevaluasi seberapa baik model mencocokkan data dunia nyata, kita mengukur tingkat kesalahan atau deviasi antara hasil simulasi dan data empiris. Salah satu metode yang umum digunakan untuk ini adalah dengan menghitung selisih antara nilai simulasi dan nilai observasi, baik dalam bentuk absolut atau relatif. Semakin kecil kesalahan atau deviasi yang terdeteksi, semakin baik model tersebut dalam menggambarkan realitas yang ada. Jika terdapat deviasi yang signifikan, langkah-langkah revisi dan penyesuaian model mungkin diperlukan untuk meningkatkan akurasi dan keandalannya.

b. Validasi Berdasarkan Teori atau Pengetahuan Domain

Validasi berdasarkan teori atau pengetahuan domain merupakan salah satu cara untuk memastikan bahwa model yang dikembangkan sesuai dengan prinsip-prinsip yang diterima dalam disiplin ilmu yang relevan. Langkah pertama dalam validasi ini adalah melibatkan para ahli atau praktisi yang memiliki pengetahuan mendalam tentang sistem yang sedang dimodelkan. Ahli domain ini memiliki pemahaman yang lebih baik tentang teori yang mendasari sistem tersebut, serta pengalaman empiris yang dapat menjadi dasar untuk mengevaluasi keakuratan model. Diskusi dengan ahli memungkinkan untuk mengidentifikasi potensi kesalahan atau inkonsistensi dalam struktur model yang mungkin tidak terdeteksi dalam verifikasi teknis.

Pada proses validasi ini, model diperiksa untuk memastikan bahwa hubungan antar variabel dan struktur yang dibangun

dalam model mencerminkan teori atau pengetahuan yang sudah ada dalam bidang terkait. Misalnya, jika model yang dikembangkan berkaitan dengan dinamika ekosistem, maka model harus menunjukkan hubungan sebab-akibat yang konsisten dengan teori ekologi yang telah mapan. Hubungan antar variabel dalam model, seperti stok, aliran, atau umpan balik, harus sesuai dengan pemahaman ilmiah yang berlaku dalam disiplin tersebut, baik itu dalam bentuk teori formal atau prinsip-prinsip yang diterima dalam praktik.

Validasi berbasis teori juga melibatkan pemeriksaan terhadap asumsi-asumsi yang digunakan dalam model. Model sering kali memerlukan penyederhanaan atau asumsi tertentu untuk memudahkan perhitungan dan simulasi, namun asumsi-asumsi ini harus masuk akal dan tidak bertentangan dengan pengetahuan domain yang ada. Proses ini melibatkan evaluasi terhadap apakah parameter yang digunakan dalam model sudah tepat dan realistis, serta apakah pengambilan keputusan dalam model konsisten dengan teori atau pengetahuan tentang sistem yang dimodelkan.

c. Validasi Berdasarkan Data Empiris (*Data-Driven Validation*)

Validasi berdasarkan data empiris, atau *data-driven validation*, merupakan pendekatan yang krusial dalam mengevaluasi keakuratan model sistem dinamik. Dalam pendekatan ini, model diuji dengan membandingkan hasil simulasi yang dihasilkan dengan data dunia nyata yang terkumpul dari eksperimen atau pengamatan sebelumnya. Tujuan utama dari validasi ini adalah untuk memastikan bahwa model dapat merepresentasikan sistem yang dimodelkan dengan akurat dan dapat diandalkan dalam memprediksi fenomena yang sama di masa depan. Proses ini dimulai dengan pengumpulan data empiris yang relevan, yang bisa mencakup data historis, hasil eksperimen, atau pengukuran lapangan.

Langkah berikutnya adalah menjalankan simulasi model dengan parameter yang sesuai, baik yang telah ditentukan sebelumnya atau yang diperoleh dari data tersebut. Model kemudian dipakai untuk memprediksi hasil yang sebanding dengan data dunia nyata. Hasil simulasi ini akan dibandingkan dengan data empiris yang ada untuk mengevaluasi seberapa baik model dapat

mereproduksi pola atau tren yang ada pada sistem yang dimodelkan. Dalam hal ini, kualitas data sangat penting, karena data yang buruk atau tidak lengkap dapat mengarah pada penilaian yang keliru terhadap akurasi model.

Deviasi antara hasil simulasi dan data dunia nyata dihitung untuk menilai sejauh mana model dapat memprediksi hasil dengan akurat. Deviasi ini dapat berupa selisih angka yang dihitung atau persentase ketidaksesuaian antara output model dan data empiris. Dalam beberapa kasus, kesalahan prediksi tersebut bisa diterima jika berada dalam batas toleransi yang wajar, tergantung pada tujuan model dan kompleksitas sistem yang dianalisis. Namun, jika deviasi terlalu besar, model mungkin perlu disesuaikan atau dikembangkan lebih lanjut agar lebih mencerminkan realitas.

d. Validasi Sensitivitas

Validasi sensitivitas merupakan langkah penting dalam menguji keandalan model dengan memperhatikan bagaimana perubahan kecil pada parameter atau input dapat mempengaruhi hasil model. Proses ini dilakukan untuk menilai tingkat ketergantungan model terhadap variasi nilai-nilai parameter tertentu dan untuk mengevaluasi seberapa sensitif model terhadap perubahan tersebut. Langkah pertama dalam validasi sensitivitas adalah memilih parameter yang dianggap penting atau krusial dalam model. Parameter-parameter ini dapat mencakup variabel yang memiliki pengaruh besar terhadap dinamika sistem atau yang dianggap berisiko tinggi jika terjadi ketidakpastian.

Langkah berikutnya adalah menguji perubahan nilai-nilai parameter tersebut dalam simulasi model. Perubahan ini dapat dilakukan dengan menambah atau mengurangi nilai parameter sesuai dengan rentang yang realistis atau mungkin terjadi dalam konteks dunia nyata. Proses ini mengharuskan model untuk dijalankan ulang setiap kali ada perubahan dalam parameter, dan hasil simulasi yang baru kemudian dibandingkan dengan hasil sebelumnya. Dengan cara ini, dapat dilihat apakah model tetap memberikan hasil yang konsisten atau menunjukkan perubahan yang signifikan.

Perubahan yang terjadi pada hasil simulasi diamati dan dianalisis untuk mengidentifikasi apakah fluktuasi parameter menyebabkan perbedaan yang signifikan dalam hasil model. Jika model sangat sensitif terhadap perubahan kecil dalam parameter, hal ini dapat menunjukkan adanya potensi ketidakpastian atau ketidakstabilan dalam model tersebut. Sebaliknya, jika model tidak menunjukkan perubahan yang berarti meskipun ada variasi pada parameter, ini bisa menunjukkan bahwa model lebih stabil dan tidak terlalu dipengaruhi oleh perubahan kecil dalam input.

e. Validasi Visual dan Pengujian *Feedback Loops*

Validasi visual merupakan pendekatan kualitatif yang sangat berguna untuk memastikan bahwa struktur model sistem dinamik digambarkan dengan cara yang benar. Dalam hal ini, pemeriksaan dilakukan terhadap diagram alur, diagram stock-flow, dan umpan balik (*feedback loops*) untuk memastikan bahwa hubungan antara elemen-elemen dalam sistem telah direpresentasikan dengan akurat. Langkah pertama dalam validasi visual adalah memeriksa apakah diagram alur yang digunakan untuk menggambarkan proses sistem menunjukkan hubungan yang sesuai antara variabel yang ada. Hal ini mencakup pengecekan untuk memastikan bahwa alur informasi dan pengaruh antar elemen sistem digambarkan secara logis dan konsisten.

Langkah selanjutnya adalah melakukan diskusi dengan ahli domain atau pemangku kepentingan yang memiliki pengetahuan tentang sistem yang dimodelkan. Diskusi ini bertujuan untuk memastikan bahwa representasi visual yang ada benar-benar mencerminkan pemahaman tentang cara kerja sistem. Validasi visual sering kali melibatkan beberapa iterasi perbaikan di mana pemangku kepentingan memberikan masukan untuk mengoreksi atau memperbaiki ketidaksesuaian dalam diagram yang ada. Pendekatan ini sangat penting, terutama dalam model yang melibatkan interaksi kompleks antar elemen, yang mungkin sulit dideteksi hanya melalui simulasi numerik.

Validasi *feedback loops* juga berperan yang sangat krusial dalam memastikan bahwa model menggambarkan hubungan

umpan balik dengan tepat. *Feedback loops*, baik yang positif maupun negatif, adalah elemen-elemen kunci dalam dinamika sistem yang dapat mempengaruhi kestabilan atau perubahan dalam model. Proses validasi *feedback loops* melibatkan analisis untuk memastikan bahwa hubungan sebab-akibat yang ditunjukkan oleh umpan balik sesuai dengan pemahaman teoritis atau observasi dunia nyata. Kesalahan dalam penggambaran *feedback loops* dapat menyebabkan model tidak menggambarkan realitas secara akurat.

D. Teknik Evaluasi Kinerja Model

Evaluasi kinerja model adalah langkah krusial dalam memastikan bahwa model yang dikembangkan memberikan hasil yang akurat, stabil, dan relevan dalam menggambarkan sistem dinamis yang dimodelkan. Proses ini melibatkan serangkaian teknik yang digunakan untuk menguji bagaimana baiknya model bekerja dan seberapa baik model dapat memberikan gambaran yang sesuai dengan sistem dunia nyata yang sedang dianalisis.

1. Analisis Kesalahan (*Error Analysis*)

Analisis kesalahan adalah teknik dasar yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja model dengan membandingkan hasil simulasi model dengan data empiris atau hasil observasi sistem dunia nyata. Teknik ini sangat penting untuk menilai seberapa besar deviasi antara prediksi model dan kenyataan yang terjadi. Analisis kesalahan dapat dilakukan dengan menghitung beberapa jenis kesalahan, seperti kesalahan rata-rata absolut (*Mean Absolute Error/MAE*), kesalahan kuadrat rata-rata (*Mean Squared Error/MSE*), dan kesalahan relatif. Langkah-langkah yang dilakukan dalam analisis kesalahan meliputi:

- a. Pengumpulan Data Empiris: Mengumpulkan data dunia nyata yang relevan untuk sistem yang dimodelkan.
- b. Perbandingan Model dan Data: Menjalankan simulasi model dan membandingkan hasilnya dengan data empiris.
- c. Menghitung Kesalahan: Menghitung kesalahan antara hasil model dan data untuk menilai sejauh mana model menyimpang dari kenyataan.

- d. Evaluasi: Menganalisis tingkat kesalahan yang ada, apakah dapat diterima atau perlu dilakukan perbaikan lebih lanjut.

Analisis kesalahan memberikan gambaran yang jelas tentang seberapa akurat model dalam merepresentasikan sistem yang sedang dianalisis. Jika kesalahan yang terdeteksi sangat besar, ini menandakan bahwa model perlu disesuaikan atau diperbaiki agar dapat lebih menggambarkan dinamika sistem yang sesungguhnya.

2. Pengujian Sensitivitas (*Sensitivity Analysis*)

Pengujian sensitivitas adalah teknik yang digunakan untuk mengevaluasi seberapa sensitif model terhadap perubahan parameter input. Dalam sistem dinamik, model dapat terdiri dari berbagai parameter yang memiliki pengaruh besar terhadap hasil simulasi. Pengujian sensitivitas bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh perubahan kecil dalam nilai parameter terhadap hasil akhir model. Teknik ini sangat berguna untuk mengevaluasi robusta model, yaitu kemampuan model untuk tetap menghasilkan hasil yang relevan meskipun ada variasi dalam input atau asumsi dasar model. Beberapa langkah dalam pengujian sensitivitas meliputi:

- a. Identifikasi Parameter Kritis: Menentukan parameter mana dalam model yang memiliki dampak besar terhadap hasil simulasi.
- b. Variasi Nilai Parameter: Mengubah nilai parameter secara sistematis untuk mengamati perubahan yang terjadi dalam hasil model.
- c. Analisis Dampak: Menganalisis dampak dari perubahan parameter terhadap hasil simulasi dan identifikasi parameter yang sangat sensitif terhadap perubahan.
- d. Interpretasi Hasil: Menilai apakah model masih memberikan hasil yang valid dan stabil meskipun ada perubahan dalam parameter yang diuji.

Pengujian sensitivitas memberikan informasi penting mengenai stabilitas dan ketahanan model dalam menghadapi perubahan. Model yang sensitif terhadap perubahan kecil dalam parameter menunjukkan bahwa hasilnya mungkin tidak dapat diandalkan dalam pengambilan keputusan jangka panjang (Stermann, 2007).

3. Pengujian Validitas Prediktif (*Predictive Validity Testing*)

Pengujian validitas prediktif berfokus pada kemampuan model untuk memprediksi kejadian atau hasil di masa depan berdasarkan data dan tren yang ada. Ini dilakukan dengan cara membandingkan prediksi yang dihasilkan oleh model dengan hasil yang tercatat dalam data historis atau data yang tidak digunakan selama proses pengembangan model. Pengujian validitas prediktif memungkinkan untuk menilai apakah model mampu memberikan proyeksi yang akurat terhadap dinamika sistem yang akan datang. Langkah-langkah yang dilakukan dalam pengujian validitas prediktif antara lain:

- a. Data Latih dan Data Uji: Memisahkan data yang digunakan untuk melatih model dan data yang digunakan untuk pengujian prediksi. Data uji sebaiknya belum pernah digunakan dalam proses pengembangan model.
- b. Proyeksi Masa Depan: Menggunakan model untuk memprediksi hasil di masa depan berdasarkan kondisi yang ada pada waktu tertentu.
- c. Perbandingan Prediksi dan Observasi: Membandingkan hasil prediksi model dengan data observasi yang diperoleh setelah periode yang diprediksi selesai.
- d. Evaluasi Akurasi: Mengukur tingkat akurasi prediksi menggunakan teknik analisis kesalahan yang sama seperti dalam analisis kesalahan.

Pengujian validitas prediktif ini memberikan gambaran tentang sejauh mana model dapat digunakan untuk meramalkan kejadian atau dinamika sistem dalam jangka panjang. Model yang valid secara prediktif sangat berguna dalam membantu merumuskan kebijakan atau keputusan di masa depan.

4. Uji Kestabilan Model (*Model Stability Testing*)

Kestabilan adalah aspek penting dari kinerja model sistem dinamik. Uji kestabilan bertujuan untuk mengevaluasi seberapa stabil model dalam merespons input yang berbeda atau perubahan dalam kondisi awal sistem. Kestabilan model menunjukkan bahwa model dapat memberikan hasil yang konsisten tanpa adanya fluktuasi atau perilaku yang tidak diinginkan seperti ledakan numerik atau osilasi yang tidak realistis. Dalam uji kestabilan, dilakukan analisis untuk memastikan bahwa model tidak menghasilkan perilaku yang tidak

diinginkan meskipun ada perubahan dalam parameter atau kondisi awal. Langkah-langkah dalam uji kestabilan meliputi:

- a. Pengujian terhadap Gangguan: Menilai bagaimana model merespons gangguan atau perubahan mendadak dalam parameter atau input.
- b. Simulasi Jangka Panjang: Menjalankan simulasi model untuk periode waktu yang lama untuk melihat apakah model tetap stabil.
- c. Deteksi Instabilitas: Mengidentifikasi apakah model menghasilkan perilaku yang tidak stabil seperti pembesaran yang tidak terkendali dalam hasil.
- d. Penyempurnaan Model: Jika model menunjukkan ketidakstabilan, langkah-langkah untuk menyesuaikan parameter atau struktur model diambil untuk memperbaikinya.

Kestabilan model sangat penting untuk memastikan bahwa model dapat memberikan hasil yang dapat diandalkan dalam jangka panjang, terutama ketika digunakan untuk analisis kebijakan atau perencanaan jangka panjang.

5. Analisis Kualitas Model (*Model Quality Analysis*)

Analisis kualitas model adalah evaluasi komprehensif dari berbagai aspek model untuk menilai sejauh mana model dapat menggambarkan sistem dunia nyata. Teknik ini melibatkan pemeriksaan kualitas model dari berbagai dimensi, seperti akurasi representasi, kemampuan prediktif, serta relevansi hasil dalam konteks dunia nyata. Kualitas model juga meliputi sejauh mana model dapat digunakan untuk memberikan informasi yang berguna bagi pengambil keputusan. Beberapa langkah dalam analisis kualitas model adalah:

- a. Uji Akurasi Representasi: Menilai apakah model menggambarkan dinamika sistem dunia nyata dengan baik.
- b. Evaluasi Relevansi Keputusan: Mengukur apakah hasil model dapat digunakan untuk memberikan wawasan yang berguna dalam pengambilan keputusan.
- c. Pemeriksaan Asumsi Model: Memeriksa apakah asumsi-asumsi yang digunakan dalam model realistis dan relevan dengan sistem yang dimodelkan.

- d. Pengujian Terhadap Data yang Lebih Luas: Menggunakan data tambahan untuk menguji apakah model tetap memberikan hasil yang baik dengan dataset yang berbeda.

Analisis kualitas model membantu untuk mengevaluasi kesesuaian model dalam konteks penggunaan praktisnya dan membantu mengidentifikasi area yang perlu ditingkatkan.

E. Soal Latihan

1. Jelaskan dengan rinci apa yang dimaksud dengan validasi dalam konteks sistem dinamik. Sertakan juga penjelasan tentang perbedaan antara validasi dan verifikasi model.
2. Berikan penjelasan mengenai teknik verifikasi yang umum digunakan dalam model sistem dinamik. Jelaskan langkah-langkah yang diambil untuk memastikan bahwa model telah dibangun dengan benar dan sesuai dengan spesifikasi awal.
3. Dalam konteks sistem dinamik, bagaimana cara melakukan pengujian validitas prediktif pada model? Jelaskan langkah-langkah yang harus diambil untuk memverifikasi kemampuan model dalam meramalkan hasil di masa depan.
4. Jelaskan apa yang dimaksud dengan pengujian sensitivitas dalam model sistem dinamik. Bagaimana teknik ini digunakan untuk menilai kestabilan model terhadap variasi parameter?
5. Apa yang dimaksud dengan uji kestabilan dalam model sistem dinamik? Jelaskan bagaimana Anda dapat melakukan uji kestabilan pada model yang telah dibangun untuk memeriksa potensi ketidakstabilan dalam hasil simulasi.

BAB VII

ANALISIS SENSITIVITAS DAN SKENARIO MODEL

Kemampuan Akhir yang Diharapkan

Mampu memahami terkait dengan skenario struktur dan parameter dalam sistem dinamik, memahami analisis sensitivitas pada model dinamik, memahami *decision analysis model*, memahami *performance of decision alternatives*, serta memahami *prediction model* dalam sistem dinamik, sehingga pembaca dapat pemahaman mendalam kepada pembaca serta keterampilan praktis untuk menerapkan teknik sistem dinamika dalam analisis keputusan, evaluasi alternatif, dan prediksi, sehingga dapat memberikan solusi strategi dan inovatif di berbagai bidang.

Materi Pembelajaran

- Skenario Struktur dan Parameter dalam Sistem Dinamik
- Analisis Sensitivitas pada Model Dinamik
- *Decision Analysis Model*
- *Performance of Decision Alternatives*
- *Prediction Model* dalam Sistem Dinamik
- Soal Latihan

A. Skenario Struktur dan Parameter dalam Sistem Dinamik

Skenario dalam sistem dinamik merujuk pada serangkaian kondisi atau proyeksi yang mungkin terjadi dalam suatu sistem berdasarkan asumsi atau keputusan tertentu. Dalam konteks model sistem dinamik, skenario dapat mencakup berbagai perubahan dalam struktur sistem atau parameter yang mempengaruhi dinamika sistem itu sendiri. Skenario ini dapat berupa perubahan dalam kebijakan, peraturan, alokasi sumber daya, atau perubahan eksternal lainnya yang mempengaruhi sistem yang dimodelkan. Secara umum, skenario dibedakan menjadi dua kategori utama: struktur skenario dan parameter

skenario. Keduanya merupakan elemen penting dalam model sistem dinamik yang digunakan untuk menguji bagaimana model bereaksi terhadap perubahan dalam input dan bagaimana hal tersebut dapat mempengaruhi hasil akhir.

1. Struktur Skenario dalam Sistem Dinamik

Struktur skenario dalam sistem dinamik adalah kerangka konseptual yang memodelkan hubungan kausal, interaksi antar variabel, dan dinamika umpan balik yang menentukan perilaku sistem. Struktur ini melibatkan identifikasi dan pengaturan elemen-elemen yang membentuk suatu sistem, termasuk variabel, parameter, dan aliran informasi. Pada intinya, struktur skenario mengintegrasikan perubahan yang terjadi dalam hubungan antar komponen sistem untuk mensimulasikan dan memahami dampaknya terhadap dinamika keseluruhan. Dalam analisis sistem dinamik, pemahaman yang mendalam tentang struktur skenario sangat penting untuk menghasilkan model yang realistis dan dapat diandalkan.

Sebagai contoh dalam model pertumbuhan populasi, struktur skenario mencakup komponen seperti laju kelahiran, laju kematian, dan tingkat migrasi. Elemen-elemen ini dihubungkan melalui hubungan sebab-akibat, yang dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor eksternal, seperti kebijakan pemerintah, teknologi medis, atau perubahan lingkungan. Misalnya, peningkatan akses terhadap fasilitas kesehatan dapat menurunkan laju kematian, sementara perubahan kebijakan keluarga berencana dapat mempengaruhi laju kelahiran. Dengan memodifikasi parameter dalam struktur skenario, model dapat memberikan wawasan tentang bagaimana sistem akan berkembang di bawah kondisi yang berbeda.

Struktur skenario dalam sistem dinamik memungkinkan analisis yang lebih mendalam tentang perilaku sistem melalui eksplorasi berbagai umpan balik (*feedback loops*). Umpan balik positif, seperti peningkatan populasi yang menyebabkan lebih banyak sumber daya dialokasikan untuk reproduksi, dapat mempercepat pertumbuhan populasi. Sebaliknya, umpan balik negatif, seperti tekanan pada sumber daya akibat pertumbuhan populasi, dapat memperlambat laju pertumbuhan. Dengan memahami bagaimana umpan balik ini bekerja dalam struktur skenario, pengambil keputusan dapat merancang intervensi yang lebih efektif untuk mencapai tujuan sistem.

2. Parameter Skenario dalam Sistem Dinamik

Parameter skenario dalam sistem dinamik merujuk pada nilai-nilai numerik yang digunakan untuk menggambarkan tingkat interaksi antar elemen dalam model. Tidak seperti struktur yang berfokus pada hubungan kausal dan dinamika antar komponen, parameter lebih menitikberatkan pada konstanta atau variabel yang memengaruhi intensitas atau laju perubahan dalam sistem. Parameter ini mencakup berbagai aspek seperti kecepatan aliran sumber daya, pengaruh kebijakan tertentu, atau faktor-faktor lain yang menentukan perilaku sistem dalam berbagai kondisi. Pemahaman dan pengelolaan parameter skenario menjadi sangat penting untuk menghasilkan simulasi yang akurat dan relevan.

Salah satu contoh penggunaan parameter skenario adalah dalam model ekonomi, di mana tingkat diskonto sering digunakan untuk menghitung nilai waktu uang atau memengaruhi keputusan investasi jangka panjang. Ketika tingkat diskonto berubah, hasil simulasi dapat menunjukkan perbedaan signifikan dalam pola investasi atau pertumbuhan ekonomi. Demikian pula, dalam model perubahan iklim, parameter seperti laju emisi gas rumah kaca atau sensitivitas suhu terhadap konsentrasi karbon dioksida menjadi elemen kunci yang membantu menganalisis dampak perubahan lingkungan terhadap berbagai sektor. Parameter-parameter ini memberikan fleksibilitas dalam membahas berbagai skenario yang mungkin terjadi di masa depan.

Pada sistem ekologi, parameter skenario sering kali mencakup variabel seperti laju pertumbuhan populasi, tingkat eksploitasi sumber daya, atau tingkat kerusakan lingkungan. Sebagai contoh, model ekosistem laut dapat menggunakan parameter tingkat tangkapan ikan dan laju reproduksi untuk memprediksi keberlanjutan stok ikan dalam jangka panjang. Dengan memodifikasi parameter-parameter ini, model dapat memberikan gambaran tentang potensi kerusakan atau pemulihan ekosistem berdasarkan intervensi yang berbeda. Hal ini menjadikan parameter skenario alat yang kuat untuk mengevaluasi dampak kebijakan lingkungan.

3. Hubungan antara Struktur dan Parameter dalam Sistem Dinamik

Struktur dan parameter adalah dua elemen fundamental dalam sistem dinamik yang saling melengkapi untuk menentukan perilaku model. Struktur menggambarkan hubungan kausal dan dinamika antara elemen-elemen dalam sistem, seperti umpan balik (*feedback loops*) dan aliran informasi, sementara parameter mencakup nilai-nilai numerik yang menentukan intensitas atau kecepatan interaksi dalam hubungan tersebut. Ketika struktur memberikan kerangka dasar model, parameter memberikan fleksibilitas untuk membahas berbagai kondisi. Hubungan ini menjadikan keduanya tidak dapat dipisahkan dalam analisis sistem dinamik karena perubahan pada satu elemen akan memengaruhi hasil model secara keseluruhan.

Sebagai contoh dalam model ekonomi, parameter seperti tingkat bunga dapat memengaruhi konsumsi, investasi, dan tabungan. Namun, dampak tingkat bunga ini akan sangat bergantung pada struktur model yang menghubungkan variabel-variabel tersebut. Jika struktur model mencakup umpan balik positif, seperti hubungan antara peningkatan kredit dan pertumbuhan konsumsi, maka perubahan kecil dalam tingkat bunga dapat memicu perubahan yang besar dalam sistem. Sebaliknya, jika struktur didominasi oleh umpan balik negatif, seperti pembatasan kapasitas kredit, dampaknya mungkin lebih terkendali. Hal ini menunjukkan bahwa parameter tidak dapat dievaluasi secara terpisah tanpa mempertimbangkan struktur.

Keterkaitan ini menjadikan analisis kombinasi struktur dan parameter sangat penting dalam memahami perilaku sistem dinamik. Dalam praktiknya, simulasi sering digunakan untuk membahas bagaimana variasi parameter tertentu memengaruhi hasil model dengan struktur yang berbeda. Misalnya, dalam model perubahan iklim, sensitivitas suhu terhadap konsentrasi karbon dioksida (parameter) dapat menghasilkan hasil yang berbeda tergantung pada apakah struktur model mencakup umpan balik positif dari pencairan es atau tidak. Dengan cara ini, kombinasi analisis struktur dan parameter membantu mengungkap dinamika yang lebih kompleks dalam sistem.

B. Analisis Sensitivitas pada Model Dinamik

Analisis sensitivitas berfokus pada perubahan hasil model ketika variabel input atau parameter tertentu diubah, untuk mengevaluasi bagaimana model bereaksi terhadap perubahan tersebut. Tujuan utama dari analisis sensitivitas adalah untuk mengidentifikasi variabel atau parameter yang memiliki dampak besar terhadap hasil dan untuk menentukan ketahanan model terhadap variasi input.

1. Teknik-teknik Analisis Sensitivitas dalam Model Dinamik

Berbagai teknik dapat digunakan untuk melakukan analisis sensitivitas pada model dinamik, masing-masing dengan kekuatan dan kelemahannya. Beberapa teknik yang umum digunakan dalam sistem dinamik adalah sebagai berikut:

a. Analisis Sensitivitas Lokal

Analisis sensitivitas lokal adalah salah satu teknik yang digunakan untuk mengevaluasi dampak perubahan kecil pada parameter individu terhadap hasil model dinamik. Teknik ini bertujuan untuk memahami seberapa sensitif model terhadap perubahan kecil pada nilai parameter tertentu. Dengan menggunakan analisis ini, kita dapat mengetahui parameter mana yang paling berpengaruh terhadap output model dan seberapa besar pengaruhnya. Pendekatan ini sangat penting dalam konteks pengambilan keputusan, di mana perubahan kecil dalam parameter yang kritis dapat memengaruhi hasil akhir secara signifikan.

Salah satu metode yang paling umum digunakan dalam analisis sensitivitas lokal adalah derivatif parsial. Derivatif parsial mengukur perubahan kecil pada output model seiring dengan perubahan kecil pada parameter tertentu. Dalam hal ini, derivatif parsial dihitung dengan mengukur perubahan hasil model ketika parameter yang dimaksud diubah dalam rentang nilai yang sangat kecil, sementara parameter lainnya dianggap tetap. Metode ini memberikan wawasan yang lebih dalam tentang bagaimana setiap parameter memengaruhi sistem secara langsung.

b. Analisis Sensitivitas Global

Analisis sensitivitas global adalah teknik yang digunakan untuk mengevaluasi dampak perubahan parameter yang lebih besar

dalam model dinamik, serta untuk mengidentifikasi parameter-parameter yang paling berpengaruh terhadap hasil model secara keseluruhan. Berbeda dengan analisis sensitivitas lokal yang hanya memperhitungkan perubahan kecil pada satu parameter, analisis sensitivitas global mempertimbangkan perubahan yang lebih besar pada berbagai parameter secara simultan. Teknik ini memberikan gambaran yang lebih menyeluruh tentang bagaimana ketidakpastian pada parameter model dapat mempengaruhi hasil simulasi dan memberikan informasi tentang sensitivitas model terhadap berbagai skenario parameter.

Salah satu metode yang paling sering digunakan dalam analisis sensitivitas global adalah simulasi Monte Carlo. Dalam metode ini, variasi parameter dilakukan secara acak dalam batasan tertentu, yang memungkinkan untuk mengevaluasi dampak dari ketidakpastian dalam parameter terhadap ketidakpastian hasil model. Simulasi Monte Carlo melibatkan menjalankan model berkali-kali dengan nilai-nilai parameter yang diubah secara acak dalam rentang yang telah ditentukan sebelumnya. Hasil simulasi kemudian dianalisis untuk melihat bagaimana distribusi output model berubah sebagai respons terhadap variasi input.

c. Metode *One-at-a-Time* (OAT)

Metode *One-at-a-Time* (OAT) adalah teknik analisis sensitivitas yang paling sederhana dan banyak digunakan dalam model dinamik. Teknik ini melibatkan perubahan satu parameter pada suatu waktu, sementara parameter lainnya tetap pada nilai konstan. Dengan cara ini, modeler dapat menilai dampak langsung dari perubahan pada satu parameter terhadap hasil model. Proses ini dilakukan dengan memvariasikan satu parameter dalam rentang nilai tertentu, dan mengamati bagaimana perubahan tersebut memengaruhi keluaran model, misalnya nilai prediksi atau hasil simulasi.

Keunggulan utama dari metode OAT adalah kesederhanaannya dan kemudahan implementasinya. Teknik ini tidak memerlukan banyak perhitungan atau perangkat komputasi yang rumit, sehingga sering digunakan pada model yang relatif sederhana atau ketika jumlah parameter yang perlu dianalisis terbatas.

Selain itu, OAT juga memungkinkan untuk mengidentifikasi dampak langsung perubahan parameter terhadap hasil model, yang bisa sangat berguna dalam pemahaman dasar tentang sensitivitas model terhadap faktor-faktor tunggal.

d. Analisis Sensitivitas dengan Sensitivitas Indeks

Analisis sensitivitas dengan sensitivitas indeks merupakan pendekatan yang digunakan untuk mengukur seberapa besar perubahan dalam output model yang disebabkan oleh variasi dalam parameter input. Dalam pendekatan ini, sensitivitas dihitung dengan menggunakan indeks sensitivitas yang dapat diperoleh melalui berbagai metode, seperti perhitungan derivatif atau eksperimen simulasi. Indeks sensitivitas ini memberikan gambaran tentang seberapa sensitif hasil model terhadap perubahan kecil dalam setiap parameter yang digunakan dalam model.

Metode ini lebih sering digunakan dalam model yang memiliki banyak parameter, di mana tujuannya adalah untuk mengevaluasi pengaruh relatif dari berbagai parameter terhadap hasil model. Dalam model yang kompleks, di mana banyak parameter saling berinteraksi, sensitivitas indeks memungkinkan untuk mengetahui parameter mana yang memiliki dampak paling besar terhadap keluaran model. Ini sangat berguna ketika model memiliki sejumlah besar variabel dan ingin diketahui mana yang paling memengaruhi hasilnya, serta parameter mana yang paling perlu diperhatikan atau dioptimalkan.

2. Aplikasi Analisis Sensitivitas dalam Berbagai Bidang

Analisis sensitivitas dalam sistem dinamik memiliki aplikasi yang luas di berbagai bidang, dari perencanaan dan manajemen proyek hingga kebijakan publik dan lingkungan. Beberapa contoh aplikasi analisis sensitivitas yang relevan dengan dunia nyata adalah sebagai berikut:

a. Manajemen Proyek

Pada manajemen proyek, analisis sensitivitas digunakan untuk mengevaluasi bagaimana perubahan dalam berbagai parameter, seperti waktu, biaya, dan sumber daya, dapat memengaruhi hasil proyek. Teknik ini sangat berguna dalam merencanakan

dan mengelola proyek yang memiliki ketidakpastian tinggi, seperti proyek konstruksi atau pengembangan perangkat lunak. Dengan melakukan analisis sensitivitas, manajer proyek dapat mengidentifikasi elemen-elemen yang paling berpengaruh terhadap kesuksesan proyek dan memprioritaskan perhatiannya pada faktor-faktor tersebut.

b. Industri dan Logistik

Pada industri dan logistik, analisis sensitivitas berperan penting dalam memprediksi dampak perubahan parameter-parameter kritis seperti permintaan, biaya bahan baku, dan waktu pengiriman terhadap kinerja operasi dan rantai pasokan. Dengan memahami sensitivitas model terhadap faktor-faktor ini, perusahaan dapat merencanakan dan membuat keputusan yang lebih informasional dalam menghadapi ketidakpastian. Sebagai contoh, perubahan dalam biaya bahan baku atau pengiriman dapat mempengaruhi biaya produksi, sehingga analisis sensitivitas memungkinkan perusahaan untuk mengidentifikasi potensi dampak negatif dari perubahan tersebut dan mencari solusi yang dapat meminimalkan risiko.

c. Lingkungan dan Energi

Di bidang lingkungan, analisis sensitivitas digunakan untuk memahami dampak dari perubahan parameter lingkungan terhadap ekosistem dan kesehatan manusia. Misalnya, perubahan tingkat emisi gas rumah kaca atau konsumsi energi dapat memiliki dampak yang signifikan terhadap perubahan iklim dan kualitas udara. Dengan menggunakan analisis sensitivitas, para peneliti dapat mengidentifikasi faktor-faktor utama yang berkontribusi pada perubahan tersebut, sehingga memungkinkan untuk merumuskan kebijakan yang lebih efektif dalam mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

d. Kesehatan dan Kebijakan Publik

Di sektor kesehatan, analisis sensitivitas berperan penting dalam mengevaluasi dampak kebijakan terhadap hasil kesehatan masyarakat. Misalnya, dalam program vaksinasi, analisis sensitivitas digunakan untuk memahami bagaimana perubahan dalam tingkat vaksinasi atau perubahan dalam karakteristik penyebaran penyakit dapat mempengaruhi prevalensi penyakit

tersebut. Dengan memvariasikan parameter-parameter seperti tingkat vaksinasi, usia sasaran, atau tingkat imunisasi kelompok, para pembuat kebijakan dapat memprediksi dampak jangka panjang dari kebijakan vaksinasi terhadap kesehatan masyarakat.

C. *Decision Analysis Model*

Decision analysis berfungsi sebagai alat yang memungkinkan pengambil keputusan untuk menilai berbagai alternatif yang tersedia dengan cara yang lebih terstruktur dan berbasis bukti. Ini memungkinkan untuk menganalisis berbagai skenario yang mungkin terjadi dan memberikan dasar yang kuat bagi pengambilan keputusan. Beberapa komponen utama dari *decision analysis model* meliputi:

1. Alternatif Keputusan (*Decision Alternatives*): Pilihan-pilihan yang tersedia untuk pengambil keputusan. Dalam konteks model dinamik, alternatif ini sering kali berhubungan dengan kebijakan atau strategi yang diusulkan.
2. Keputusan yang Akan Diambil (*Decision Makers*): Pihak yang membuat keputusan berdasarkan analisis yang dilakukan. Ini bisa melibatkan pemerintah, perusahaan, atau organisasi lain yang memiliki kekuasaan untuk memilih di antara alternatif yang ada.
3. Probabilitas (*Probability*): Ini adalah kemungkinan terjadinya suatu peristiwa atau hasil. Dalam banyak kasus, keputusan dibuat di bawah ketidakpastian, dan probabilitas digunakan untuk memperkirakan kemungkinan hasil dari berbagai alternatif.
4. Kriteria Penilaian (*Evaluation Criteria*): Kriteria yang digunakan untuk menilai alternatif keputusan. Dalam *decision analysis*, kriteria ini mungkin berupa biaya, keuntungan, risiko, atau dampak lingkungan, yang semuanya harus dipertimbangkan untuk memilih alternatif terbaik.
5. Hasil (*Outcomes*): Ini merujuk pada hasil yang dihasilkan dari pilihan yang diambil, yang biasanya berhubungan dengan dampak keputusan terhadap sistem.
6. Fungsi Tujuan (*Objective Function*): Fungsi yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja alternatif keputusan berdasarkan kriteria yang ditentukan. Fungsi ini dapat berupa maksimisasi keuntungan atau minimisasi biaya, misalnya.

a. Teknik-teknik dalam *Decision Analysis Model*

Berbagai teknik dan metode digunakan dalam decision analysis untuk mengevaluasi alternatif keputusan. Berikut adalah beberapa teknik yang sering digunakan dalam model dinamik:

1) Analisis Keputusan dengan Pohon Keputusan (*Decision Tree Analysis*)

Pohon keputusan adalah alat yang sangat berguna dalam analisis keputusan karena memberikan visualisasi yang jelas tentang berbagai alternatif keputusan dan konsekuensinya. Setiap cabang pohon keputusan menggambarkan pilihan yang dapat diambil oleh pengambil keputusan, dan di ujung setiap cabang terdapat hasil yang mungkin terjadi, yang dihitung berdasarkan probabilitas dan nilai yang terkait. Dengan cara ini, pohon keputusan membantu mengorganisasi informasi yang kompleks dan memungkinkan pengambil keputusan untuk mengevaluasi pilihan secara sistematis. Hal ini sangat penting, terutama ketika keputusan yang diambil berdampak pada banyak variabel dan memiliki ketidakpastian yang tinggi.

Salah satu keuntungan utama dari penggunaan pohon keputusan adalah kemampuannya untuk menilai konsekuensi dari setiap alternatif dengan mempertimbangkan probabilitas berbagai hasil. Misalnya, dalam analisis kebijakan kesehatan, pohon keputusan dapat digunakan untuk mengidentifikasi dampak dari berbagai strategi intervensi, seperti vaksinasi, lockdown, atau distribusi bantuan sosial. Setiap pilihan dapat dilengkapi dengan probabilitas yang menggambarkan kemungkinan hasil yang berbeda, seperti keberhasilan pengendalian penyebaran penyakit atau pengurangan angka kematian.

2) Analisis Sensitivitas dalam *Decision Analysis*

Analisis sensitivitas dalam analisis keputusan adalah teknik yang digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana hasil keputusan berubah ketika terjadi perubahan dalam input, seperti parameter model atau probabilitas yang digunakan. Hal ini sangat berguna untuk mengidentifikasi keputusan yang tetap efektif meskipun ada ketidakpastian atau

variabilitas dalam data yang digunakan. Dalam konteks ini, analisis sensitivitas memungkinkan pengambil keputusan untuk memahami dampak dari perubahan kecil pada variabel-variabel kunci dan untuk menilai seberapa stabil keputusan yang diambil terhadap perubahan tersebut.

Salah satu aspek utama dari analisis sensitivitas adalah mengidentifikasi parameter-parameter yang memiliki dampak paling signifikan terhadap hasil keputusan. Misalnya, dalam model dinamik untuk memprediksi dampak perubahan iklim, analisis sensitivitas dapat membantu untuk mengetahui variabel mana, seperti emisi karbon atau tingkat adopsi teknologi, yang paling berpengaruh terhadap kebijakan energi. Dengan memahami pengaruh setiap parameter, pengambil keputusan dapat fokus pada elemen-elemen yang paling mempengaruhi hasil kebijakan dan mempertimbangkan berbagai skenario berdasarkan variasi nilai-nilai tersebut.

3) Analisis Multi-Kriteria (*Multi-Criteria Decision Analysis*, MCDA)

Analisis Multi-Kriteria (MCDA) adalah teknik pengambilan keputusan yang digunakan untuk mengevaluasi berbagai alternatif berdasarkan lebih dari satu kriteria atau tujuan. Dalam konteks model dinamik, MCDA memungkinkan pengambil keputusan untuk mengevaluasi dampak dari berbagai alternatif keputusan terhadap beberapa aspek sistem secara bersamaan. Hal ini sangat berguna ketika keputusan yang diambil mempengaruhi berbagai faktor yang saling terkait, seperti efisiensi ekonomi, keberlanjutan lingkungan, dan kesejahteraan sosial, yang semuanya perlu dipertimbangkan secara seimbang.

Proses MCDA dimulai dengan identifikasi kriteria yang relevan untuk masalah yang sedang dianalisis. Setiap kriteria diberikan bobot yang mencerminkan pentingnya relatifnya terhadap tujuan keseluruhan. Bobot ini bisa didasarkan pada preferensi pengambil keputusan atau hasil diskusi dengan pemangku kepentingan. Setelah itu, setiap alternatif dinilai berdasarkan seberapa baik ia memenuhi

setiap kriteria, dan nilai-nilai ini kemudian digabungkan untuk menghasilkan skor keseluruhan bagi setiap alternatif.

4) Pemrograman Linear (*Linear Programming*, LP)

Pemrograman linear (*Linear Programming*, LP) adalah teknik optimasi matematis yang digunakan untuk menemukan solusi terbaik dalam masalah keputusan yang melibatkan pembatasan tertentu. Dalam LP, tujuan utama adalah memaksimalkan atau meminimalkan suatu fungsi objektif, seperti keuntungan atau biaya, sambil mempertimbangkan berbagai batasan yang ada pada model. Batasan-batasan ini bisa mencakup keterbatasan sumber daya, kapasitas produksi, atau waktu. Teknik ini sangat berguna dalam konteks model dinamik di mana keputusan yang diambil harus memperhatikan kondisi yang berubah seiring waktu dan berbagai keterbatasan sistem.

Salah satu penerapan utama LP dalam model dinamik adalah dalam perencanaan produksi. Misalnya, perusahaan yang memproduksi berbagai jenis barang dengan bahan baku terbatas akan menggunakan LP untuk menentukan jumlah barang yang harus diproduksi guna memaksimalkan keuntungan atau meminimalkan biaya. Dalam hal ini, LP mengidentifikasi kombinasi produk yang paling efisien dengan memperhitungkan kapasitas produksi, bahan baku yang tersedia, dan waktu yang diperlukan untuk memproduksi masing-masing produk. Fungsi objektifnya bisa berupa keuntungan total, sementara pembatasannya mencakup jumlah bahan baku yang tersedia dan kapasitas produksi pabrik.

- b. Penggunaan *Decision Analysis Model* dalam Berbagai Bidang
Decision analysis model dapat diterapkan dalam berbagai bidang, membantu pengambil keputusan untuk memilih strategi terbaik berdasarkan evaluasi kinerja berbagai alternatif keputusan. Beberapa contoh penerapan *decision analysis model* yang relevan adalah:

1) Manajemen Sumber Daya Alam dan Lingkungan

Pada pengelolaan sumber daya alam, *decision analysis model* berperan penting dalam membantu pengambil keputusan untuk mengevaluasi berbagai kebijakan dan

alternatif yang dapat mengoptimalkan manfaat ekonomi sambil meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan masyarakat. Salah satu aplikasi utamanya adalah dalam pengelolaan sumber daya alam yang terbatas, seperti penebangan hutan, pengelolaan energi terbarukan, dan perlindungan spesies langka. Dalam konteks ini, model analisis keputusan memungkinkan para pemangku kepentingan untuk menganalisis berbagai pilihan kebijakan dengan mempertimbangkan berbagai kriteria, termasuk aspek ekonomi, keberlanjutan jangka panjang, dan dampak sosial yang mungkin timbul.

Salah satu contoh penerapan model analisis keputusan dalam pengelolaan sumber daya alam adalah dalam pengelolaan perikanan. Dalam hal ini, model dinamik digunakan untuk menentukan kuota tangkapan ikan yang optimal yang dapat memaksimalkan keuntungan ekonomi dari industri perikanan sambil menjaga keberlanjutan stok ikan di laut. Melalui model ini, para pengambil keputusan dapat memodelkan dampak dari berbagai kebijakan, seperti pengurangan kuota tangkapan atau pembatasan area tangkapan, dan melihat hasil jangka panjang yang mungkin timbul dari kebijakan-kebijakan tersebut. Hal ini membantu untuk menghindari overfishing dan memastikan bahwa sumber daya ikan tetap tersedia untuk generasi mendatang.

2) Kesehatan Masyarakat dan Kebijakan Kesehatan

Pada kebijakan kesehatan masyarakat, *decision analysis model* menjadi alat yang sangat berguna untuk mengevaluasi berbagai intervensi kebijakan yang dapat mempengaruhi hasil kesehatan masyarakat secara luas. Model ini membantu para pembuat kebijakan untuk membuat keputusan yang lebih terinformasi dengan mempertimbangkan berbagai alternatif kebijakan dan dampaknya terhadap kesehatan masyarakat, biaya sosial, dan dampak ekonomi. Dengan menggunakan pendekatan yang sistematis, *decision analysis model* memungkinkan pengambil keputusan untuk mengidentifikasi kebijakan yang tidak hanya efektif dalam meningkatkan kesehatan, tetapi juga efisien dalam hal penggunaan sumber daya.

Salah satu contoh aplikasi yang sering digunakan dalam kebijakan kesehatan masyarakat adalah dalam pengelolaan epidemi. Misalnya, dalam menghadapi wabah penyakit menular, analisis keputusan dapat digunakan untuk mengevaluasi apakah lebih baik menginvestasikan dana pada program vaksinasi massal atau meningkatkan kapasitas perawatan rumah sakit untuk menangani pasien. Dengan menggunakan model ini, para pengambil keputusan dapat menganalisis berbagai faktor, seperti biaya perawatan rumah sakit, efektivitas vaksinasi, jumlah kasus yang diharapkan, dan potensi pengurangan angka kematian. Hal ini memungkinkan untuk memilih kebijakan yang memberikan hasil kesehatan optimal dengan biaya yang dapat dipertanggungjawabkan.

3) Manajemen Perusahaan dan Strategi Bisnis

Pada manajemen perusahaan dan strategi bisnis, *decision analysis model* memberikan alat yang berguna untuk mengevaluasi dan memilih keputusan yang paling menguntungkan berdasarkan berbagai faktor yang dapat mempengaruhi hasil bisnis. Dengan menggunakan model ini, perusahaan dapat mengidentifikasi alternatif strategis dan menganalisis risiko serta potensi keuntungan dari setiap pilihan yang tersedia. *Decision analysis* memungkinkan manajer untuk membuat keputusan yang lebih informasional, dengan memetakan konsekuensi dari berbagai tindakan dan menyusun strategi yang optimal dalam menghadapi ketidakpastian yang ada.

Salah satu contoh aplikasi yang umum digunakan dalam keputusan strategis perusahaan adalah dalam pengembangan produk baru. Sebelum meluncurkan produk baru ke pasar, perusahaan perlu mengevaluasi beberapa alternatif produk yang akan dikembangkan. Dengan menggunakan *decision analysis*, perusahaan dapat mengevaluasi berbagai faktor seperti proyeksi pasar, biaya pengembangan, dan tingkat adopsi konsumen. Dengan membandingkan berbagai opsi ini, perusahaan dapat memilih produk yang memberikan potensi keuntungan

terbesar sambil mempertimbangkan biaya yang terkait dengan risikonya.

D. *Performance of Decision Alternatives*

Penilaian kinerja alternatif keputusan dalam model dinamik melibatkan beberapa langkah penting, antara lain identifikasi tujuan dan kriteria penilaian, simulasi berbagai skenario, serta penggunaan teknik evaluasi yang relevan untuk menilai hasil yang dihasilkan oleh masing-masing alternatif. Kinerja alternatif keputusan dapat diukur melalui berbagai metrik, tergantung pada konteks dan tujuan model tersebut.

1. Tujuan Penilaian Kinerja: Tujuan utama dari penilaian kinerja adalah untuk memilih alternatif keputusan yang memberikan hasil terbaik sesuai dengan tujuan yang telah ditentukan sebelumnya. Hal ini mencakup pencapaian hasil yang optimal, baik dalam aspek biaya, waktu, kualitas, atau keberlanjutan, tergantung pada masalah yang dianalisis.
2. Kriteria Penilaian: Kriteria penilaian dalam decision analysis dapat bervariasi, tergantung pada sifat masalah yang dihadapi. Kriteria umum yang digunakan meliputi:
 - a. Keuntungan ekonomi: Penilaian apakah alternatif keputusan dapat memberikan nilai ekonomi terbaik.
 - b. Efisiensi sumber daya: Sejauh mana sumber daya (seperti tenaga kerja, waktu, atau bahan baku) digunakan secara efisien dalam alternatif tersebut.
 - c. Keberlanjutan lingkungan: Dampak lingkungan dari alternatif keputusan.
 - d. Risiko dan ketidakpastian: Evaluasi bagaimana risiko yang terkait dengan keputusan tersebut dapat dikelola.

Pada model dinamik, kriteria-kriteria ini sering kali diukur secara simultan untuk memastikan bahwa keputusan yang diambil tidak hanya optimal dalam satu aspek tetapi juga holistik.

3. Simulasi Skenario: Simulasi skenario digunakan untuk mengevaluasi bagaimana setiap alternatif keputusan dapat berfungsi dalam berbagai kondisi yang berbeda. Dalam analisis model dinamik, ini melibatkan pengujian model dengan parameter dan variabel yang berbeda untuk menggambarkan kemungkinan

hasil dari berbagai keputusan. Proses ini membantu pengambil keputusan untuk memahami potensi variabilitas dan ketidakpastian yang mungkin mempengaruhi kinerja alternatif.

a. Teknik Penilaian Kinerja Alternatif Keputusan

Beberapa teknik digunakan untuk menilai kinerja alternatif keputusan dalam model dinamik. Teknik-teknik ini bertujuan untuk memberikan wawasan yang lebih dalam tentang bagaimana berbagai pilihan dapat mempengaruhi sistem yang lebih luas dan untuk memastikan bahwa keputusan yang diambil optimal dalam konteks yang lebih luas.

1) Simulasi Monte Carlo

Simulasi Monte Carlo adalah teknik yang sangat berguna dalam penilaian kinerja alternatif keputusan, terutama ketika menghadapi ketidakpastian yang inheren dalam parameter model. Teknik ini bekerja dengan menghasilkan sejumlah besar simulasi acak berdasarkan distribusi probabilitas yang ditetapkan untuk berbagai parameter input. Dengan cara ini, Monte Carlo memberikan gambaran tentang kemungkinan hasil yang terjadi di masa depan, memungkinkan pengambil keputusan untuk mengidentifikasi rentang hasil yang mungkin dicapai dan mengevaluasi tingkat ketidakpastian yang terkait dengan setiap alternatif. Teknik ini sangat berguna dalam situasi yang melibatkan faktor-faktor yang sulit diprediksi, seperti fluktuasi harga, perubahan kebijakan, atau variasi dalam permintaan pasar.

Pada model dinamik, simulasi Monte Carlo dapat digunakan untuk menggambarkan skenario masa depan yang berbeda dan mengevaluasi dampak dari masing-masing alternatif keputusan. Sebagai contoh, dalam konteks perencanaan energi terbarukan, simulasi ini dapat digunakan untuk mengestimasi biaya dan efisiensi dari berbagai skenario pengembangan infrastruktur energi terbarukan, seperti panel surya atau turbin angin. Dengan mempertimbangkan ketidakpastian dalam harga bahan baku, perkembangan teknologi, dan kebijakan pemerintah, Monte Carlo dapat membantu memodelkan bagaimana

perubahan tersebut dapat mempengaruhi kinerja sistem energi secara keseluruhan.

2) Analisis Multi-Kriteria (*Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA*)

Analisis Multi-Kriteria (MCDA) adalah teknik yang sangat berguna dalam penilaian kinerja alternatif keputusan, terutama ketika keputusan tersebut melibatkan lebih dari satu kriteria yang perlu dipertimbangkan secara bersamaan. Dalam banyak situasi, keputusan yang diambil tidak hanya bergantung pada satu faktor, tetapi mencakup berbagai elemen yang memiliki dampak berbeda terhadap hasil yang diinginkan. MCDA memungkinkan pengambil keputusan untuk mengevaluasi alternatif berdasarkan sejumlah kriteria yang relevan, seperti biaya, waktu, kualitas, atau dampak lingkungan. Dengan metode ini, pengambil keputusan dapat mengidentifikasi alternatif yang terbaik secara keseluruhan, meskipun masing-masing alternatif mungkin unggul dalam kriteria yang berbeda.

Proses MCDA melibatkan pemberian bobot pada setiap kriteria sesuai dengan tingkat prioritasnya. Bobot ini mencerminkan seberapa penting suatu kriteria dibandingkan dengan kriteria lainnya dalam konteks keputusan yang diambil. Setelah itu, setiap alternatif dievaluasi berdasarkan kinerja pada masing-masing kriteria, dan nilai untuk setiap kriteria dijumlahkan dengan mempertimbangkan bobotnya. Hal ini memungkinkan perbandingan yang lebih objektif dan holistik antara berbagai alternatif, yang dapat menghasilkan keputusan yang lebih seimbang dan terinformasi.

3) Analisis Keputusan dengan Pohon Keputusan (*Decision Tree Analysis*)

Pohon keputusan (*Decision Tree*) adalah alat grafis yang digunakan untuk memvisualisasikan proses pengambilan keputusan dalam situasi yang penuh ketidakpastian. Dalam diagram ini, setiap cabang mewakili alternatif keputusan yang tersedia, sementara ujung cabang menunjukkan hasil yang mungkin terjadi berdasarkan probabilitas yang telah ditentukan. Pohon keputusan membantu pengambil

keputusan untuk secara sistematis mengevaluasi berbagai kemungkinan hasil dari setiap pilihan yang ada, dengan mempertimbangkan berbagai faktor seperti biaya, waktu, dan risiko yang terkait. Metode ini sangat berguna dalam situasi yang melibatkan ketidakpastian, karena memungkinkan pengambil keputusan untuk memilih alternatif terbaik berdasarkan evaluasi yang terperinci.

Pada model dinamik, pohon keputusan digunakan untuk mengevaluasi dampak dari berbagai alternatif terhadap kinerja sistem secara keseluruhan. Hal ini memungkinkan analisis yang lebih mendalam terhadap konsekuensi jangka panjang dari setiap keputusan yang diambil. Misalnya, dalam perencanaan bisnis atau pengelolaan sumber daya alam, pohon keputusan dapat membantu dalam merancang strategi yang tidak hanya mengoptimalkan hasil jangka pendek, tetapi juga mempertimbangkan faktor ketidakpastian dan perubahan yang mungkin terjadi di masa depan.

4) Optimasi (*Optimization*)

Optimasi adalah teknik yang digunakan untuk mencari solusi terbaik dari suatu masalah dengan memperhatikan berbagai kriteria dan pembatasan yang ada. Dalam konteks model dinamik, optimasi digunakan untuk mencari alternatif yang memberikan hasil optimal dalam situasi yang penuh ketidakpastian dan perubahan. Proses ini melibatkan penentuan fungsi objektif, seperti memaksimalkan keuntungan atau meminimalkan biaya, serta pembatasan yang harus dipatuhi, seperti kapasitas sumber daya atau permintaan pasar. Dengan menggunakan teknik optimasi, pengambil keputusan dapat memilih solusi yang paling efisien dan efektif sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan.

Teknik optimasi dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu optimasi linear dan non-linear. Optimasi linear digunakan ketika fungsi objektif dan pembatasan masalah dapat digambarkan dalam bentuk persamaan linear. Di sisi lain, optimasi non-linear digunakan ketika hubungan antara variabel dalam model tidak dapat dinyatakan secara linear.

Kedua teknik ini dapat diterapkan pada berbagai jenis masalah dalam model dinamik, termasuk pengelolaan sumber daya, penjadwalan, atau perencanaan produksi. Dengan optimasi, berbagai alternatif dapat dibandingkan untuk menemukan solusi terbaik yang sesuai dengan tujuan dan kondisi yang ada.

b. Evaluasi Kinerja dalam Berbagai Sektor

Evaluasi kinerja alternatif keputusan dalam model dinamik memiliki berbagai aplikasi praktis di berbagai sektor. Setiap sektor menghadapi tantangan dan ketidakpastian yang berbeda, sehingga evaluasi kinerja yang dilakukan harus disesuaikan dengan konteks spesifik tersebut.

1) Kebijakan Energi dan Lingkungan

Evaluasi kinerja alternatif keputusan dalam kebijakan energi dan lingkungan sangat penting untuk memastikan bahwa keputusan yang diambil dapat mengatasi tantangan global, seperti perubahan iklim dan kelangkaan sumber daya alam. Analisis kinerja ini melibatkan penilaian terhadap berbagai alternatif kebijakan dengan mempertimbangkan sejumlah faktor, termasuk dampak ekonomi, sosial, dan lingkungan. Dalam kebijakan energi, evaluasi sering kali mencakup analisis biaya-manfaat untuk menentukan apakah manfaat jangka panjang dari sebuah kebijakan lebih besar dibandingkan dengan biayanya, serta dampaknya terhadap pencapaian tujuan keberlanjutan. Dengan melakukan evaluasi kinerja yang menyeluruh, pengambil keputusan dapat memilih kebijakan yang memberikan hasil optimal bagi masyarakat dan lingkungan.

Contoh penerapan analisis kinerja dalam kebijakan energi terbarukan adalah pembangunan infrastruktur untuk pembangkit listrik tenaga angin atau solar. Dalam hal ini, evaluasi kinerja alternatif keputusan akan melibatkan perbandingan antara biaya pembangunan dan pemeliharaan infrastruktur energi terbarukan dengan manfaat yang dapat diperoleh, seperti pengurangan emisi gas rumah kaca dan pengurangan ketergantungan pada energi fosil. Selain itu, analisis ini juga mencakup dampak sosial-ekonomi, seperti

penciptaan lapangan kerja baru dalam sektor energi terbarukan dan efeknya terhadap perekonomian lokal.

2) Kebijakan Kesehatan Masyarakat

Evaluasi kinerja alternatif keputusan dalam sektor kesehatan masyarakat sangat penting untuk memastikan bahwa kebijakan yang diterapkan dapat efektif dalam menghadapi tantangan kesehatan, seperti epidemi atau penyakit menular. Dalam konteks ini, analisis keputusan digunakan untuk mengidentifikasi kebijakan yang memberikan dampak positif maksimal, baik dari segi kesehatan masyarakat maupun ekonomi. Evaluasi tersebut melibatkan simulasi berbagai skenario, menggunakan model dinamik untuk memprediksi hasil dari kebijakan yang diusulkan, seperti distribusi vaksin atau langkah-langkah pengendalian penyakit lainnya.

Contoh penerapan analisis kinerja dapat dilihat dalam evaluasi kebijakan vaksinasi dalam menghadapi wabah penyakit menular. Dalam situasi tersebut, keputusan terkait vaksinasi harus mempertimbangkan variabilitas tingkat adopsi vaksin di kalangan masyarakat, yang dapat bervariasi tergantung pada faktor sosial, budaya, dan ekonomi. Model dinamik digunakan untuk mensimulasikan bagaimana tingkat vaksinasi yang berbeda dapat mempengaruhi penyebaran penyakit dan jumlah kasus yang terjadi. Selain itu, analisis ini juga mencakup evaluasi dampak ekonomi dari kebijakan vaksinasi, baik dari sisi biaya langsung untuk distribusi vaksin maupun potensi penghematan biaya perawatan akibat pencegahan penyakit.

3) Manajemen Produksi dan Perusahaan

Evaluasi kinerja alternatif keputusan dalam manajemen produksi dan perusahaan sangat penting untuk mendukung pengambilan keputusan strategis yang dapat meningkatkan efisiensi dan keuntungan perusahaan. Dalam konteks ini, evaluasi dilakukan dengan membandingkan berbagai alternatif yang ada, seperti strategi produksi atau pengembangan produk baru, berdasarkan berbagai faktor penting seperti biaya, waktu, dan sumber daya yang dibutuhkan. Pendekatan ini memungkinkan perusahaan

untuk memilih opsi yang memberikan hasil terbaik dalam menghadapi tantangan operasional dan pasar yang ada.

Contoh penerapan yang relevan adalah dalam pengelolaan rantai pasokan. Perusahaan sering kali dihadapkan pada keputusan strategis apakah akan melakukan outsourcing atau mempertahankan produksi internal untuk memenuhi kebutuhan produknya. Evaluasi kinerja alternatif ini dapat dilakukan dengan menggunakan analisis biaya, yang mencakup biaya produksi internal, biaya outsourcing, serta waktu yang dibutuhkan untuk pengiriman barang. Selain itu, analisis ini juga mempertimbangkan faktor-faktor seperti kualitas produk, ketergantungan pada pemasok eksternal, dan fleksibilitas dalam menghadapi permintaan pasar yang berubah.

E. *Prediction Model* dalam Sistem Dinamik

Sistem dinamik berfokus pada bagaimana elemen-elemen dalam suatu sistem berinteraksi dan berubah dari waktu ke waktu. Model prediksi dalam sistem dinamik menggunakan pendekatan berbasis simulasi untuk membahas perilaku jangka panjang sistem yang kompleks. Hal ini melibatkan dua aspek utama, yaitu struktur model (yang mencakup komponen sistem dan hubungan antar variabel) dan parameter yang mendasari hubungan tersebut.

1. **Struktur Model:** Struktur model dalam sistem dinamik menggambarkan komponen-komponen sistem dan bagaimana saling berinteraksi. Komponen ini dapat mencakup stok (seperti jumlah persediaan, populasi, atau aset) dan aliran (seperti tingkat produksi, konsumsi, atau migrasi). Model ini menggunakan persamaan diferensial atau persamaan aljabar untuk menggambarkan hubungan antar komponen dan bagaimana perubahan satu elemen memengaruhi yang lain seiring berjalannya waktu.
2. **Parameter Model:** Parameter dalam sistem dinamik adalah variabel yang mengendalikan perilaku sistem. Parameter ini dapat berupa nilai tetap yang memengaruhi aliran dalam sistem, seperti tingkat pertumbuhan ekonomi, laju kematian, atau kebijakan pemerintah. Parameter juga mencakup nilai yang dapat berubah seiring waktu,

seperti kebijakan yang ditetapkan atau teknologi baru yang diperkenalkan. Penggunaan parameter yang tepat dalam model prediksi memungkinkan pemodel untuk memperkirakan berbagai hasil yang mungkin terjadi di masa depan.

3. Proses Dinamis dan Umpan Balik: Salah satu aspek penting dari model prediksi adalah kemampuan untuk menangkap umpan balik (*feedback*) yang ada dalam sistem. Sistem dinamik terdiri dari umpan balik positif (yang memperkuat perubahan dalam sistem) dan umpan balik negatif (yang mengurangi perubahan dan membawa sistem kembali ke keseimbangan). Kedua jenis umpan balik ini berperan kunci dalam memprediksi bagaimana sistem akan berperilaku di masa depan.

- a. Jenis-Jenis Model Prediksi dalam Sistem Dinamik

Ada beberapa pendekatan yang digunakan dalam sistem dinamik untuk membangun model prediksi. Metode-metode ini dirancang untuk menangani berbagai jenis masalah dan tujuan pemodelan, serta tingkat ketidakpastian yang terkait.

- 1) Model Prediksi Stok dan Aliran

Model prediksi stok dan aliran adalah komponen dasar dalam pemodelan dinamik yang digunakan untuk menggambarkan hubungan antara variabel yang terakumulasi (stok) dan perubahan dalam variabel tersebut (aliran). Stok adalah jumlah atau akumulasi variabel dalam suatu sistem pada titik waktu tertentu, sementara aliran menggambarkan laju perubahan stok tersebut. Dalam banyak sistem, stok dan aliran saling bergantung, dan perubahan pada satu variabel dapat menyebabkan perubahan signifikan pada variabel lainnya. Model ini menggunakan persamaan matematika atau diagram alir untuk menggambarkan dinamika interaksi antara stok dan aliran.

Contoh penerapan dari model ini dapat ditemukan dalam pemodelan pertumbuhan populasi. Dalam hal ini, stok adalah jumlah individu dalam populasi, sedangkan aliran adalah tingkat kelahiran, kematian, dan migrasi. Aliran-aliran ini memengaruhi perubahan jumlah stok seiring waktu. Misalnya, jika tingkat kelahiran lebih tinggi daripada tingkat kematian, stok populasi akan meningkat,

sedangkan jika tingkat kematian melebihi tingkat kelahiran, populasi akan menurun. Kebijakan pemerintah, seperti program keluarga berencana, atau perubahan lingkungan, seperti bencana alam, dapat memengaruhi aliran ini dan, pada gilirannya, stok populasi.

2) Model Prediksi Berbasis Umpan Balik

Model prediksi berbasis umpan balik digunakan untuk menganalisis bagaimana perubahan dalam satu bagian sistem dapat mempengaruhi bagian lainnya, sering kali melalui mekanisme umpan balik yang kompleks. Dalam sistem dinamik, umpan balik terbagi menjadi dua jenis utama: umpan balik positif dan umpan balik negatif. Umpan balik positif terjadi ketika perubahan dalam sistem memperkuat atau memperbesar efek yang ada, sedangkan umpan balik negatif terjadi ketika perubahan dalam sistem justru mengurangi atau menstabilkan efek tersebut.

Contoh penerapan umpan balik positif dapat dilihat dalam kebijakan energi terbarukan. Ketika investasi dalam energi terbarukan, seperti panel surya atau turbin angin, mendorong kemajuan teknologi, hasilnya adalah peningkatan efisiensi dan pengurangan biaya. Keberhasilan ini dapat menarik lebih banyak investasi, menciptakan siklus positif yang terus memperkuat pengembangan energi terbarukan. Siklus umpan balik positif ini berpotensi mempercepat transisi menuju sumber energi yang lebih bersih dan efisien, yang pada gilirannya dapat mengurangi ketergantungan pada energi fosil.

3) Model Prediksi Berbasis Data

Model prediksi berbasis data menggunakan teknik statistik dan pembelajaran mesin untuk menganalisis data historis guna memprediksi tren masa depan. Pendekatan ini sangat berguna ketika hubungan antara variabel dalam sistem tidak sepenuhnya diketahui atau ketika teori yang ada tidak dapat memberikan gambaran yang cukup jelas. Dengan memanfaatkan data empiris, model ini mampu menghasilkan prediksi yang dapat diandalkan, meskipun tanpa pemahaman yang mendalam mengenai mekanisme yang mendasari sistem tersebut. Hal ini membuatnya sangat

berguna dalam situasi di mana data lebih tersedia daripada teori yang kuat.

Salah satu contoh penerapan model prediksi berbasis data adalah dalam analisis pasar keuangan. Di pasar keuangan, harga saham atau aset sering kali dipengaruhi oleh berbagai faktor yang kompleks dan sulit diprediksi melalui model teori tradisional. Oleh karena itu, model berbasis data menggunakan teknik seperti regresi linier, jaringan saraf, atau pembelajaran mesin untuk menganalisis data historis harga saham, volume perdagangan, dan indikator ekonomi lainnya.

4) Model Prediksi Multi-Objektif

Model prediksi multi-objektif digunakan untuk memodelkan situasi di mana pengambil keputusan dihadapkan pada beberapa tujuan yang sering kali saling bertentangan atau beragam. Teknik ini memungkinkan untuk mengevaluasi alternatif keputusan dengan mempertimbangkan berbagai kriteria yang relevan secara simultan, seperti biaya, manfaat, waktu, dan risiko. Pendekatan ini sangat penting dalam pengambilan keputusan yang kompleks, di mana tidak ada satu solusi tunggal yang dapat memuaskan semua tujuan.

Contoh penerapan model prediksi multi-objektif dapat ditemukan dalam perencanaan kota. Dalam perencanaan kota, pengambil keputusan harus mempertimbangkan banyak variabel, seperti kebutuhan perumahan yang berkembang pesat, ruang terbuka hijau yang perlu dilestarikan, pembangunan infrastruktur yang efisien, serta dampak lingkungan dari setiap keputusan yang diambil. Model prediksi multi-objektif memungkinkan perencanaan penggunaan lahan yang mengintegrasikan semua tujuan ini, sehingga menghasilkan solusi yang optimal, yang dapat menyeimbangkan pertumbuhan urbanisasi dengan keberlanjutan lingkungan.

b. Proses Pembuatan Model Prediksi

Proses pembuatan model prediksi dalam sistem dinamik melibatkan beberapa langkah yang terorganisir dengan baik,

mulai dari definisi masalah hingga validasi hasil prediksi. Berikut adalah tahapan utama dalam pembuatan model prediksi:

1) Definisi Masalah

Langkah pertama adalah mendefinisikan masalah yang akan diprediksi. Ini mencakup identifikasi tujuan dari model prediksi, serta variabel yang perlu dianalisis untuk mencapai tujuan tersebut.

2) Pengumpulan Data

Model prediksi memerlukan data yang relevan dan berkualitas untuk membuat prediksi yang akurat. Data ini bisa berupa data historis, data eksperimen, atau data yang dihasilkan dari simulasi. Kualitas data sangat penting karena prediksi model sangat bergantung pada akurasi data yang digunakan.

3) Pembangunan Struktur Model

Setelah data dikumpulkan, struktur model perlu dibangun. Ini mencakup pemodelan hubungan kausal antara variabel dalam sistem dan definisi stok, aliran, dan umpan balik yang ada.

4) Kalibrasi Model

Kalibrasi model adalah proses menyesuaikan parameter model agar sesuai dengan data empiris yang ada. Hal ini dilakukan dengan mengubah parameter hingga model memberikan hasil yang sejalan dengan data yang dikumpulkan.

5) Simulasi dan Prediksi

Setelah model dikalibrasi, simulasi dilakukan untuk memprediksi hasil masa depan berdasarkan asumsi yang ada. Hasil simulasi ini kemudian dianalisis untuk mengevaluasi efektivitas berbagai kebijakan atau keputusan yang dipertimbangkan.

6) Validasi Model

Langkah terakhir adalah validasi model untuk memastikan bahwa model prediksi dapat diandalkan dalam memprediksi hasil yang realistis. Validasi ini dilakukan dengan membandingkan hasil model dengan data yang tidak digunakan dalam proses kalibrasi.

c. Aplikasi Model Prediksi dalam Berbagai Sektor

Model prediksi dalam sistem dinamik memiliki aplikasi yang sangat luas di berbagai sektor, termasuk di bidang ekonomi, kesehatan, lingkungan, dan teknologi. Berikut adalah beberapa contoh aplikasi model prediksi:

1) Sektor Energi

Pada sektor energi, model prediksi berperan penting dalam meramalkan permintaan energi di masa depan, yang sangat berguna bagi pengambil keputusan untuk merencanakan infrastruktur dan kebijakan energi yang tepat. Dengan memanfaatkan data historis dan faktor-faktor eksternal, seperti pertumbuhan populasi, perubahan iklim, dan tren teknologi, model prediksi dapat memberikan estimasi yang akurat tentang kebutuhan energi jangka panjang. Informasi ini memungkinkan pembuat kebijakan dan perusahaan energi untuk merencanakan kapasitas produksi yang sesuai dan menghindari potensi kekurangan energi di masa depan. Model prediksi juga digunakan untuk menganalisis pergerakan harga energi yang sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor global, seperti pasokan minyak, kebijakan perdagangan, dan fluktuasi ekonomi internasional. Dalam hal ini, model berbasis data atau stok dan aliran dapat membantu meramalkan perubahan harga energi, yang penting untuk perencanaan finansial dan kebijakan harga energi yang adil dan efisien. Hal ini juga memungkinkan perusahaan energi untuk mengoptimalkan strategi investasi dan mengelola risiko yang terkait dengan volatilitas harga energi.

2) Sektor Kesehatan

Model prediksi dalam sektor kesehatan memiliki peran krusial dalam meramalkan wabah penyakit dan dampak yang mungkin timbul terhadap sistem kesehatan. Dengan menganalisis data epidemiologis, model prediksi dapat memberikan estimasi yang akurat mengenai penyebaran penyakit menular, seperti flu atau COVID-19. Informasi ini memungkinkan otoritas kesehatan untuk merencanakan langkah-langkah pencegahan yang tepat, seperti vaksinasi massal atau pembatasan sosial, guna meminimalkan dampak buruk terhadap populasi. Selain itu, model ini dapat

membantu memprediksi kapan dan di mana lonjakan kasus akan terjadi, memungkinkan respons yang lebih cepat dan lebih terkoordinasi.

Model prediksi juga digunakan untuk meramalkan dampak intervensi kesehatan masyarakat, seperti kebijakan vaksinasi atau kampanye kesehatan preventif. Dengan memperhitungkan variabel seperti tingkat adopsi vaksin dan tingkat keberhasilan intervensi, model ini memberikan wawasan tentang efektivitas kebijakan dalam mengurangi prevalensi penyakit. Ini sangat penting bagi pengambil keputusan untuk memastikan bahwa alokasi sumber daya kesehatan termasuk tenaga medis, obat-obatan, dan fasilitas kesehatan dilakukan dengan efisien dan tepat waktu.

3) Sektor Lingkungan

Model prediksi dalam sektor lingkungan digunakan untuk memproyeksikan perubahan iklim dan dampak lingkungan jangka panjang. Salah satu contoh aplikasinya adalah dalam meramalkan dampak peningkatan emisi gas rumah kaca terhadap suhu global dan pola cuaca. Dengan menggunakan data historis dan simulasi berbasis model matematis, para ilmuwan dapat memprediksi bagaimana suhu global dapat berubah dalam beberapa dekade mendatang. Model ini memungkinkan pemangku kepentingan untuk memahami potensi dampak dari perubahan iklim, seperti kenaikan permukaan laut, pergeseran iklim, dan bencana alam yang lebih sering terjadi.

Model prediksi juga digunakan untuk menganalisis degradasi lingkungan, seperti kerusakan hutan, polusi air, dan pencemaran udara. Dengan memodelkan aliran polutan atau kerusakan ekosistem, model prediksi dapat memberikan gambaran yang jelas mengenai kecepatan dan dampak dari degradasi lingkungan. Hal ini memungkinkan kebijakan yang lebih tepat sasaran, seperti pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan atau peraturan yang lebih ketat terhadap industri yang menyebabkan kerusakan lingkungan. Model prediksi dapat membantu pemerintah dan organisasi internasional merancang intervensi yang

dapat memperlambat atau mencegah kerusakan lebih lanjut pada ekosistem.

F. Soal Latihan

1. Jelaskan apa yang dimaksud dengan analisis sensitivitas dalam konteks pemodelan sistem dinamik. Mengapa penting untuk melakukan analisis sensitivitas dalam pengembangan model prediksi?
2. Pada model dinamik untuk prediksi pertumbuhan populasi, perubahan dalam tingkat kelahiran dan kematian dapat mempengaruhi hasil prediksi. Apa dampaknya terhadap prediksi populasi dalam jangka panjang dan bagaimana hal ini dapat mempengaruhi perencanaan kebijakan sosial?
3. Sebuah perusahaan manufaktur sedang mempertimbangkan untuk memperkenalkan produk baru ke pasar. Gunakan analisis sensitivitas untuk mengevaluasi dampak dari variabel seperti harga jual, biaya produksi, dan tingkat permintaan terhadap keuntungan perusahaan.
4. Kebijakan publik sering kali dipengaruhi oleh ketidakpastian terkait dampak dari berbagai keputusan. Misalnya, dalam hal perencanaan pembangunan infrastruktur transportasi. Apa keuntungan dari melakukan analisis sensitivitas terhadap keputusan yang melibatkan ketidakpastian jangka panjang?
5. Buatlah sebuah model skenario untuk menganalisis dampak perubahan iklim terhadap sektor pertanian dalam jangka panjang. Apa saja parameter yang harus dipertimbangkan dalam skenario ini? Jelaskan bagaimana Anda akan mengevaluasi berbagai skenario berdasarkan ketidakpastian yang ada, dan bagaimana analisis sensitivitas dapat digunakan untuk memandu keputusan kebijakan terkait adaptasi perubahan iklim di sektor pertanian.

BAB VIII

IMPLEMENTASI MODEL SISTEM DINAMIK

Kemampuan Akhir yang Diharapkan

Mampu memahami terkait dengan strategi implementasi model sistem dinamik, memahami pemilihan alternatif skenario untuk pengambilan keputusan, serta memahami evaluasi efektivitas dan efisiensi model implementasi, sehingga pembaca dapat pemahaman yang lebih mendalam dan keterampilan praktis dalam merancang, mengimplementasikan, dan menyebarkan model sistem dinamis, sehingga dapat digunakan untuk pengambilan keputusan yang lebih baik dan solusi yang lebih efisien dalam berbagai situasi dan konteks.

Materi Pembelajaran

- Strategi Implementasi Model Sistem Dinamik
- Pemilihan Alternatif Skenario untuk Pengambilan Keputusan
- Evaluasi Efektivitas dan Efisiensi Model Implementasi
- Soal Latihan

A. Strategi Implementasi Model Sistem Dinamik

Strategi implementasi yang efektif sangat penting untuk memastikan bahwa model sistem dinamik dapat berfungsi sebagaimana mestinya dalam konteks dunia nyata. Model sistem dinamik digunakan untuk menganalisis masalah kompleks yang melibatkan umpan balik, keterlambatan, dan non-linieritas. Oleh karena itu, model ini harus dirancang dengan hati-hati, diuji dengan data yang relevan, dan disesuaikan untuk berbagai skenario sebelum diimplementasikan secara luas. Implementasi model ini seringkali melibatkan berbagai pihak, termasuk pengambil kebijakan, pemangku kepentingan industri, dan komunitas ilmiah. Langkah-langkah strategis dalam implementasi model sistem dinamik sebagai berikut:

1. Identifikasi Tujuan dan Masalah yang Dihadapi

Langkah pertama dalam implementasi model sistem dinamik adalah mengidentifikasi tujuan yang ingin dicapai dan masalah yang ingin diselesaikan. Model sistem dinamik sangat berguna ketika masalah yang dihadapi melibatkan elemen-elemen yang saling berinteraksi dan berkembang seiring waktu. Identifikasi yang jelas tentang tujuan dan masalah akan menentukan parameter model yang relevan dan pendekatan yang tepat.

2. Perancangan Model Sistem Dinamik

Perancangan model sistem dinamik melibatkan pemilihan variabel yang relevan, hubungan antarvariabel, dan identifikasi struktur umpan balik (*feedback loops*) yang ada dalam sistem. Dalam tahap ini, model tersebut harus memetakan aliran informasi dan pengaruh antar elemen dalam sistem. Proses ini mencakup langkah-langkah berikut:

a. Pengidentifikasian variabel kunci

Pengidentifikasian variabel kunci adalah langkah awal yang sangat penting dalam perancangan model sistem dinamik. Variabel-variabel ini mewakili elemen-elemen yang mempengaruhi atau dipengaruhi oleh sistem yang akan dimodelkan. Dalam banyak kasus, variabel kunci mencakup faktor-faktor utama seperti tingkat konsumsi, produksi, atau populasi, yang dapat mencerminkan perubahan dalam waktu dan memberikan pemahaman yang lebih jelas mengenai perilaku sistem. Proses ini membantu untuk menyaring elemen-elemen yang benar-benar signifikan, sehingga model yang dibangun tetap relevan dan fokus pada aspek-aspek yang paling berdampak.

b. Penentuan hubungan antar variabel

Penentuan hubungan antar variabel merupakan tahap penting dalam perancangan model sistem dinamik, karena menggambarkan interaksi yang terjadi antara berbagai elemen dalam sistem. Hubungan antar variabel ini bisa bersifat positif atau negatif, yang masing-masing menggambarkan dinamika yang berbeda dalam sistem tersebut. Hubungan positif berarti ketika satu variabel meningkat, variabel lainnya juga meningkat, sedangkan hubungan negatif berarti peningkatan satu variabel justru menyebabkan penurunan pada variabel

lainnya. Menentukan hubungan ini membantu dalam memahami bagaimana perubahan dalam satu bagian sistem dapat mempengaruhi bagian lainnya, dan memberikan dasar yang kuat untuk memprediksi perilaku sistem di masa depan.

c. Membangun struktur umpan balik (*feedback loops*)

Membangun struktur umpan balik (*feedback loops*) adalah langkah penting dalam perancangan model sistem dinamik. Umpan balik ini dapat dibedakan menjadi dua jenis utama: umpan balik positif dan umpan balik negatif, yang keduanya berperan krusial dalam menentukan stabilitas dan dinamika sistem. Umpan balik positif berfungsi untuk memperkuat perubahan dalam sistem, sementara umpan balik negatif cenderung untuk menstabilkan sistem dengan meredam perubahan yang terjadi. Kedua jenis umpan balik ini bekerja secara bersamaan, sering kali saling berinteraksi dan memengaruhi jalannya sistem secara dinamis.

3. Pengumpulan dan Validasi Data

Pengumpulan dan validasi data adalah dua langkah kunci dalam perancangan dan implementasi model sistem dinamik yang berhasil. Data yang relevan dan valid akan memastikan bahwa model yang dikembangkan dapat menggambarkan kondisi dunia nyata dengan akurat. Pengumpulan data dilakukan melalui berbagai metode, seperti pengamatan langsung di lapangan, eksperimen yang terkontrol, atau kajian literatur yang ada. Data yang diperoleh dari sumber-sumber ini harus mencakup variabel-variabel yang relevan dengan sistem yang dimodelkan, baik itu terkait dengan faktor lingkungan, ekonomi, sosial, atau lainnya, yang dapat mempengaruhi dinamika sistem tersebut.

Salah satu metode pengumpulan data yang umum adalah observasi langsung, di mana data dikumpulkan secara langsung dari objek atau fenomena yang sedang diteliti. Pendekatan ini memberikan informasi yang sangat berguna, terutama dalam konteks sistem yang kompleks atau sulit diukur melalui cara lain. Selain itu, eksperimen dapat digunakan untuk menguji hipotesis tertentu atau untuk memahami bagaimana variabel-variabel dalam sistem berinteraksi satu sama lain. Literatur yang ada juga dapat menjadi sumber penting, khususnya ketika data historis sulit diperoleh atau ketika data yang ada membutuhkan pembaruan atau klarifikasi.

Tahap berikutnya adalah validasi data untuk memastikan keakuratannya. Validasi ini penting untuk menghindari kesalahan yang dapat mengarah pada interpretasi yang salah atau pengambilan keputusan yang tidak tepat. Salah satu cara yang umum dilakukan adalah dengan membandingkan hasil yang diperoleh dari model dengan data historis atau data yang telah diakui keakuratannya. Jika hasil model sesuai dengan data historis, maka model tersebut dianggap valid. Sebaliknya, jika ada perbedaan signifikan, model perlu direvisi atau disesuaikan dengan data yang lebih akurat.

4. Simulasi dan Uji Coba Model

Langkah berikutnya adalah melakukan simulasi untuk menguji bagaimana model bekerja dalam berbagai kondisi. Simulasi ini bertujuan untuk menggali bagaimana model merespons perubahan dalam variabel dan parameter yang ada. Proses ini memungkinkan kita untuk membahas berbagai skenario dan melihat bagaimana dinamika sistem berubah di bawah pengaruh keputusan atau kebijakan tertentu. Simulasi memberi gambaran yang lebih jelas tentang bagaimana model dapat berfungsi dalam situasi nyata, serta memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang hubungan antar variabel dalam sistem.

Salah satu elemen penting dalam tahap simulasi adalah analisis sensitivitas. Analisis ini digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana hasil model dipengaruhi oleh perubahan kecil dalam parameter input. Dengan cara ini, kita dapat mengetahui variabel atau parameter mana yang memiliki dampak besar terhadap hasil akhir model, serta mana yang memiliki pengaruh kecil. Analisis sensitivitas membantu dalam mengidentifikasi ketidakpastian dan memberikan wawasan tentang bagian mana dari model yang perlu diperhatikan lebih hati-hati atau mungkin perlu dikaji lebih lanjut untuk meningkatkan ketepatan prediksi.

5. Evaluasi dan Perbaikan Model

Tahap berikutnya adalah evaluasi untuk memastikan bahwa model tersebut memberikan hasil yang akurat dan dapat dipercaya. Evaluasi ini penting untuk menilai seberapa baik model mencerminkan kondisi dunia nyata. Salah satu cara yang umum dilakukan adalah dengan membandingkan hasil simulasi model dengan data historis yang relevan. Jika hasil simulasi model menunjukkan kecocokan yang tinggi

dengan data dunia nyata, ini menjadi indikasi bahwa model bekerja dengan baik. Sebaliknya, jika terdapat perbedaan signifikan antara hasil model dan kenyataan, hal ini menandakan perlunya perbaikan lebih lanjut.

Evaluasi model juga melibatkan pemeriksaan terhadap parameter dan asumsi yang digunakan dalam pembangunan model. Setiap model didasarkan pada sejumlah asumsi yang membentuk cara kerja sistem. Jika asumsi-asumsi ini tidak realistis atau tidak lagi relevan, hasil simulasi model bisa menjadi tidak akurat. Oleh karena itu, evaluasi yang cermat terhadap asumsi-asumsi ini sangat penting. Jika ditemukan ketidaksesuaian, asumsi-asumsi yang digunakan perlu diperbarui atau disesuaikan agar lebih realistis.

6. Implementasi Model dalam Pengambilan Keputusan

Setelah model sistem dinamik berhasil divalidasi dan dievaluasi, langkah selanjutnya adalah implementasi model tersebut dalam pengambilan keputusan. Model yang telah diuji dengan data nyata dan divalidasi memiliki potensi untuk memberikan panduan yang lebih baik dalam merancang kebijakan dan strategi. Pembuat kebijakan atau manajer dapat menggunakan model ini untuk mengevaluasi dampak dari berbagai alternatif kebijakan, serta untuk merencanakan tindakan yang lebih efektif di masa depan. Dengan memanfaatkan model, keputusan yang diambil dapat lebih berbasis pada analisis mendalam mengenai dinamika sistem yang ada. Implementasi model dalam pengambilan keputusan sering melibatkan pemangku kepentingan yang lebih luas, termasuk pihak-pihak yang memiliki kepentingan dalam hasil kebijakan yang diambil. Hal ini terutama penting dalam kebijakan publik, di mana keputusan dapat memengaruhi berbagai sektor dan lapisan masyarakat.

B. Pemilihan Alternatif Skenario untuk Pengambilan Keputusan

Pemilihan alternatif skenario dalam pengambilan keputusan menggunakan model sistem dinamik melibatkan pembuatan dan evaluasi beberapa skenario yang berbeda, yang menggambarkan kemungkinan jalur evolusi suatu sistem berdasarkan perubahan variabel input atau kebijakan yang diterapkan. Skenario-skenario ini berfungsi sebagai alat untuk mengidentifikasi dan memahami dampak

dari berbagai keputusan yang mungkin diambil dalam situasi yang kompleks dan dinamis.

Pemilihan skenario terbaik atau paling optimal memerlukan pendekatan yang terstruktur dan mempertimbangkan sejumlah faktor yang dapat mempengaruhi hasil akhir. Tujuan utama dari pemilihan alternatif skenario adalah untuk menemukan solusi yang paling efektif yang dapat memberikan hasil terbaik dalam jangka panjang, dengan mempertimbangkan keterbatasan sumber daya dan potensi risiko. Proses pemilihan alternatif skenario untuk pengambilan keputusan dalam model sistem dinamik umumnya melibatkan beberapa tahap penting, sebagai berikut:

1. Definisi Tujuan dan Kriteria Keputusan

Langkah pertama dalam pemilihan skenario adalah mendefinisikan dengan jelas tujuan yang ingin dicapai dan kriteria yang akan digunakan untuk mengevaluasi skenario yang berbeda. Tujuan ini bisa sangat bervariasi, tergantung pada konteks masalah yang sedang dianalisis, seperti mengoptimalkan profit, meminimalkan biaya, atau meminimalkan dampak lingkungan dari suatu kebijakan. Kriteria keputusan tersebut mungkin mencakup aspek-aspek seperti:

- a. Efektivitas biaya: Seberapa efisien biaya yang diperlukan dalam mencapai tujuan.
- b. Keberlanjutan jangka panjang: Seberapa tahan skenario tersebut dalam menghadapi perubahan dan ketidakpastian.
- c. Risiko: Analisis risiko yang terkait dengan implementasi skenario.
- d. Keterlibatan pemangku kepentingan: Sejauh mana pemangku kepentingan akan terlibat atau terpengaruh oleh skenario tersebut.

2. Pengembangan Skenario

Langkah selanjutnya adalah mengembangkan berbagai alternatif skenario. Skenario ini dapat didasarkan pada perubahan dalam kebijakan, variasi dalam parameter input, atau prediksi tentang bagaimana sistem akan berkembang di masa depan di bawah kondisi yang berbeda. Dalam model sistem dinamik, skenario sering kali dibangun dengan memvariasikan parameter-parameter kritis yang

berpengaruh signifikan terhadap kinerja sistem. Contoh dari skenario yang mungkin diuji dalam model sistem dinamik antara lain:

- a. Skenario optimistis: Di mana variabel-variabel sistem mengikuti jalur yang paling menguntungkan, seperti pertumbuhan ekonomi yang tinggi atau kebijakan lingkungan yang sangat efektif.
- b. Skenario pesimistis: Di mana faktor-faktor eksternal atau variabel yang tidak terkendali, seperti krisis ekonomi atau bencana alam, menyebabkan dampak buruk.
- c. Skenario tengah: Yang mewakili jalur yang lebih konservatif, di mana kondisi stabil dan tidak ada kejutan besar.

3. Simulasi dan Evaluasi Skenario

Tahap selanjutnya dalam perancangan model sistem dinamik adalah melakukan simulasi terhadap setiap skenario tersebut. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk mengamati bagaimana sistem merespons perubahan yang diterapkan pada variabel-variabel atau kebijakan tertentu. Dengan memanipulasi parameter dan kondisi awal sistem, simulasi memberikan wawasan tentang bagaimana dinamika sistem berubah di bawah berbagai skenario. Hasil simulasi ini sangat berguna untuk memprediksi hasil masa depan dan mengevaluasi potensi dampak dari kebijakan atau keputusan yang akan diterapkan.

Selama proses simulasi, analisis sensitivitas berperan penting dalam menentukan variabel-variabel mana yang memiliki pengaruh paling besar terhadap hasil sistem. Dengan melakukan analisis sensitivitas, kita dapat mengidentifikasi parameter-parameter yang sangat berpengaruh dan yang tidak terlalu signifikan. Ini memungkinkan para pengambil keputusan untuk fokus pada variabel-variabel kritis yang dapat membawa perubahan besar dalam hasil akhir sistem. Sebagai contoh, dalam skenario kebijakan perubahan iklim, analisis sensitivitas dapat menunjukkan seberapa besar pengaruh pengurangan emisi gas rumah kaca terhadap suhu global atau dampaknya pada kesejahteraan ekonomi.

4. Analisis Hasil dan Pemilihan Skenario Terbaik

Setelah simulasi dan evaluasi dilakukan untuk setiap skenario, hasil-hasil ini perlu dianalisis dengan cermat. Analisis ini melibatkan perbandingan kinerja masing-masing skenario terhadap tujuan yang

telah ditetapkan sebelumnya. Salah satu teknik yang dapat digunakan dalam tahap ini adalah *multi-criteria decision analysis* (MCDA), yang memungkinkan pengambil keputusan untuk membandingkan berbagai kriteria dan memilih skenario yang memberikan hasil terbaik secara keseluruhan. Beberapa metode MCDA yang umum digunakan adalah:

a. *AHP (Analytic Hierarchy Process)*

AHP (Analytic Hierarchy Process) adalah teknik pengambilan keputusan yang digunakan untuk mengevaluasi berbagai alternatif berdasarkan sejumlah kriteria yang telah ditentukan sebelumnya. Teknik ini sangat berguna ketika keputusan melibatkan banyak faktor yang saling bertentangan atau kompleks. Dalam AHP, masalah yang dihadapi dipecah menjadi hirarki yang terdiri dari tujuan utama, kriteria evaluasi, dan alternatif-alternatif yang tersedia. Proses ini memungkinkan pengambil keputusan untuk membandingkan alternatif secara berpasangan berdasarkan pentingnya kriteria yang relevan, serta untuk memberikan bobot relatif kepada setiap kriteria berdasarkan prioritasnya.

Pada AHP, langkah pertama adalah mendefinisikan kriteria yang akan digunakan untuk mengevaluasi alternatif. Misalnya, dalam konteks pemilihan kebijakan publik, kriteria tersebut bisa meliputi biaya, dampak lingkungan, efisiensi waktu, dan keberlanjutan. Setelah kriteria ditentukan, masing-masing alternatif yang ada kemudian dievaluasi dengan membandingkan sepasang alternatif berdasarkan setiap kriteria. Penilaian ini dilakukan menggunakan skala numerik yang mencerminkan tingkat preferensi atau kepentingan dari satu alternatif dibandingkan dengan yang lainnya.

b. *TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)*

TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) adalah metode yang digunakan untuk mengevaluasi dan memilih alternatif berdasarkan kedekatannya dengan solusi ideal dan sejauh mana alternatif tersebut berbeda dari solusi terburuk. Metode ini sangat berguna dalam pengambilan keputusan multi-kriteria, di mana beberapa kriteria yang saling bertentangan harus dipertimbangkan. Proses TOPSIS dimulai dengan menilai alternatif-alternatif

berdasarkan kriteria yang telah ditentukan, dan kemudian menghitung dua titik referensi: solusi ideal (positif) dan solusi terburuk (negatif).

Solusi ideal adalah alternatif yang memiliki nilai terbaik untuk setiap kriteria yang dievaluasi, sedangkan solusi terburuk adalah alternatif dengan nilai terburuk untuk setiap kriteria. Kedua solusi ini digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi seberapa jauh setiap alternatif berada dalam ruang keputusan. Selanjutnya, jarak antara setiap alternatif dengan solusi ideal dan solusi terburuk dihitung. Alternatif yang memiliki jarak terpendek dengan solusi ideal dan jarak terjauh dari solusi terburuk dianggap sebagai pilihan terbaik.

5. Pengambilan Keputusan dan Implementasi

Pemilihan skenario terbaik dalam pengambilan keputusan seringkali melibatkan lebih dari sekadar analisis hasil simulasi. Setelah berbagai skenario diuji dan dievaluasi, langkah selanjutnya adalah menilai kelayakan dari skenario yang dipilih. Pengambil keputusan perlu mempertimbangkan berbagai faktor praktis, seperti ketersediaan sumber daya, kapasitas institusional yang ada, dan dukungan dari pemangku kepentingan. Tanpa dukungan yang memadai, bahkan skenario terbaik sekalipun dapat menghadapi tantangan besar dalam implementasinya. Oleh karena itu, evaluasi kelayakan menjadi tahap penting dalam memastikan bahwa keputusan yang diambil bisa diterapkan dengan efektif di lapangan. Penting juga untuk mempertimbangkan faktor eksternal yang dapat mempengaruhi implementasi keputusan. Regulasi pemerintah, kondisi pasar, dan perubahan teknologi merupakan elemen yang harus dipertimbangkan karena dapat memberikan dampak signifikan terhadap kelancaran atau keberhasilan penerapan kebijakan atau skenario.

C. Evaluasi Efektivitas dan Efisiensi Model Implementasi

Efektivitas dalam konteks model sistem dinamik merujuk pada kemampuan model untuk mencapai tujuan yang telah ditetapkan. Apakah model mampu memberikan solusi atau rekomendasi yang akurat, tepat, dan relevan dengan masalah yang dihadapi? Efektivitas ini sering kali diukur dengan membandingkan hasil yang diperoleh dari

model dengan kondisi nyata atau dengan hasil yang diharapkan. Efisiensi, di sisi lain, merujuk pada sejauh mana sumber daya yang digunakan dalam implementasi model (waktu, biaya, dan tenaga) dapat memaksimalkan hasil yang dicapai. Sebuah model yang efisien adalah model yang memberikan hasil yang optimal dengan sumber daya yang minimal.

1. Aspek yang Mempengaruhi Efektivitas Model Sistem Dinamik

Efektivitas model sistem dinamik bergantung pada berbagai faktor yang dapat mempengaruhi kinerjanya dalam menyelesaikan masalah yang dihadapi oleh pengguna. Beberapa aspek yang dapat mempengaruhi efektivitas ini antara lain:

a. Kualitas Data dan Asumsi Model

Kualitas data yang digunakan dalam model sistem dinamik berperan krusial dalam menentukan keberhasilan model tersebut. Data yang akurat dan representatif memastikan bahwa simulasi yang dihasilkan mencerminkan kondisi dunia nyata dengan tepat. Sebaliknya, penggunaan data yang cacat atau tidak relevan dapat menyebabkan ketidakakuratan dalam prediksi dan analisis, sehingga menurunkan keandalan model dalam meramalkan hasil dan mempengaruhi kualitas keputusan yang diambil berdasarkan model tersebut. Oleh karena itu, pengumpulan data yang valid melalui metode yang tepat dan terverifikasi sangat penting untuk memperoleh hasil yang optimal dari model sistem dinamik (Stermann, 2002).

b. Pemodelan Dinamika yang Akurat

Pemodelan dinamika yang akurat sangat penting dalam sistem dinamik, karena model ini berfokus pada analisis perubahan sistem dalam jangka panjang. Sistem dinamik menggunakan konsep umpan balik (*feedback*) dan waktu untuk memodelkan bagaimana perubahan dalam satu elemen sistem dapat mempengaruhi elemen lainnya seiring waktu. Umpan balik ini dapat berupa umpan balik positif yang memperkuat perubahan atau umpan balik negatif yang mengarah pada penyeimbangan kembali sistem. Oleh karena itu, pemahaman yang tepat mengenai dinamika internal sistem dan bagaimana hubungan antar elemen saling mempengaruhi sangatlah krusial untuk menciptakan model yang akurat.

c. Kemampuan Model untuk Menyediakan Informasi untuk Keputusan

Kemampuan model sistem dinamik untuk menyediakan informasi yang relevan bagi pengambilan keputusan sangat penting untuk memastikan efektivitasnya. Sebuah model yang baik harus mampu memberikan wawasan yang tidak hanya akurat, tetapi juga dapat diterjemahkan ke dalam keputusan praktis yang bisa diambil oleh pengambil kebijakan. Informasi yang diperoleh dari model harus membantu dalam meramalkan konsekuensi dari berbagai pilihan kebijakan, sehingga memungkinkan pemangku kebijakan untuk memilih skenario terbaik yang mendukung tujuan yang diinginkan. Jika model tidak menyediakan informasi yang jelas atau tidak relevan, maka efektivitasnya dalam mendukung keputusan akan sangat terbatas.

2. Aspek yang Mempengaruhi Efisiensi Implementasi Model Sistem Dinamik

Efisiensi implementasi model sistem dinamik tidak hanya bergantung pada kecepatan dan biaya, tetapi juga pada sejauh mana model dapat diimplementasikan dalam waktu yang wajar dan dengan sumber daya yang terbatas. Beberapa aspek yang mempengaruhi efisiensi implementasi antara lain:

a. Kompleksitas Model

Kompleksitas model sistem dinamik menjadi salah satu faktor yang sangat mempengaruhi efisiensi implementasi. Semakin kompleks model yang dibangun, semakin banyak variabel dan interaksi yang harus dipertimbangkan dalam simulasi. Setiap variabel tambahan, serta hubungan antar variabel, meningkatkan kebutuhan komputasi, yang dapat memperpanjang waktu yang diperlukan untuk menghasilkan hasil. Kompleksitas yang tinggi juga meningkatkan kemungkinan terjadinya kesalahan dalam proses pemodelan, karena banyaknya interaksi yang harus dianalisis secara bersamaan. Hal ini dapat mempengaruhi ketepatan waktu dan efektivitas model dalam memberikan hasil yang relevan bagi pengambil keputusan (Ahmad *et al.*, 2022).

b. Ketersediaan Alat dan Teknologi Pendukung

Ketersediaan alat dan teknologi pendukung berperan yang sangat penting dalam menentukan efisiensi implementasi model sistem dinamik. Penggunaan perangkat lunak simulasi yang tepat, seperti Vensim, Stella, atau AnyLogic, dapat mempercepat proses pembangunan model dan menjalankan simulasi. Alat ini memungkinkan pemodel untuk dengan mudah mendefinisikan variabel, hubungan antar variabel, serta menjalankan analisis sensitivitas yang kompleks. Tanpa perangkat lunak yang memadai, proses perancangan model bisa menjadi sangat lambat dan rentan terhadap kesalahan, yang akan menurunkan efisiensi keseluruhan implementasi.

Sistem komputasi yang efisien juga berperan penting dalam mendukung implementasi model yang kompleks. Penggunaan teknologi komputasi yang lebih canggih, seperti *cloud computing* atau *high-performance computing* (HPC), memungkinkan pemrosesan data yang lebih cepat dan lebih efisien. Sistem ini memungkinkan model untuk dijalankan dalam waktu yang lebih singkat, terutama jika model tersebut melibatkan sejumlah besar data dan variabel. Dengan adanya alat dan infrastruktur yang tepat, simulasi dapat dilakukan lebih cepat, yang meningkatkan efisiensi dalam membahas berbagai skenario dan parameter.

c. Penggunaan Data yang Efisien

Penggunaan data yang efisien sangat penting dalam implementasi model sistem dinamik, karena data yang tidak terorganisir atau terlalu besar dapat memperlambat kinerja model dan mempengaruhi waktu yang dibutuhkan untuk menjalankan simulasi. Jika data yang digunakan tidak terstruktur dengan baik, seperti memiliki format yang tidak konsisten atau redundansi informasi, ini dapat meningkatkan kompleksitas pemrosesan dan membutuhkan lebih banyak sumber daya komputasi. Data yang tidak dikelola dengan baik juga dapat menyebabkan kesalahan dalam analisis, yang akhirnya mengurangi akurasi dan efisiensi model secara keseluruhan.

3. Metode untuk Mengevaluasi Efektivitas dan Efisiensi Implementasi Model

Untuk menilai efektivitas dan efisiensi implementasi model sistem dinamik, beberapa pendekatan dapat digunakan. Salah satunya adalah melalui analisis biaya-manfaat (*cost-benefit analysis*) yang memungkinkan evaluasi apakah manfaat yang diperoleh dari penggunaan model lebih besar dibandingkan dengan biaya yang dikeluarkan untuk mengimplementasikannya.

a. Analisis Biaya-Manfaat (*Cost-Benefit Analysis*)

Analisis Biaya-Manfaat (*Cost-Benefit Analysis*) merupakan metode yang sangat berguna untuk mengevaluasi efektivitas dan efisiensi implementasi model sistem dinamik. Dalam konteks ini, analisis ini membandingkan biaya yang dikeluarkan untuk mengembangkan, mengimplementasikan, dan memelihara model dengan manfaat yang diperoleh dari penggunaan model tersebut. Biaya yang dimaksud meliputi biaya sumber daya manusia, teknologi, data, dan waktu yang dibutuhkan untuk menjalankan model. Manfaat, di sisi lain, dapat berupa peningkatan kualitas keputusan, penghematan biaya operasional, atau dampak positif lain yang dihasilkan oleh model, seperti efisiensi dalam perencanaan dan pengelolaan sumber daya.

b. Analisis Kinerja dan Benchmarking

Analisis Kinerja dan Benchmarking adalah metode evaluasi yang penting dalam menilai efektivitas dan efisiensi implementasi model sistem dinamik. Proses ini melibatkan perbandingan hasil yang diperoleh dari model dengan kinerja sistem nyata atau dengan model lain yang serupa untuk mengetahui sejauh mana model yang diterapkan dapat menghasilkan solusi yang sesuai dengan kenyataan. Dengan menggunakan pendekatan benchmarking, pengambil keputusan dapat menilai kualitas dan akurasi model berdasarkan performa dari model lain yang sudah terbukti atau standar industri yang ada.

c. Uji Validasi dan Verifikasi Model

Uji Validasi dan Verifikasi Model adalah langkah penting dalam mengevaluasi efektivitas dan efisiensi implementasi model sistem dinamik. Validasi model bertujuan untuk

memastikan bahwa hasil simulasi yang dihasilkan oleh model mencerminkan kondisi nyata. Dengan membandingkan prediksi model dengan data dunia nyata, pengambil keputusan dapat menilai seberapa baik model tersebut merepresentasikan fenomena yang dianalisis. Proses ini juga membantu untuk mengidentifikasi potensi kesalahan atau ketidaksesuaian yang mungkin muncul akibat asumsi atau data yang digunakan dalam pemodelan. Jika hasil model terbukti akurat dan dapat diandalkan, maka model dianggap valid.

Verifikasi model, di sisi lain, berfokus pada memastikan bahwa model berfungsi sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan sebelumnya. Proses ini mengevaluasi apakah struktur model, parameter, dan algoritma yang digunakan bekerja seperti yang dirancang dan apakah hasil yang diperoleh sesuai dengan ekspektasi. Verifikasi dilakukan untuk mengonfirmasi bahwa tidak ada kesalahan dalam implementasi teknis model yang dapat mempengaruhi keakuratan hasil. Proses ini penting untuk memastikan bahwa model tidak mengandung cacat yang dapat merusak hasil simulasi atau pengambilan keputusan.

D. Soal Latihan

1. Jelaskan konsep dasar dari model sistem dinamik dan bagaimana model ini digunakan dalam menganalisis perubahan jangka panjang dalam suatu sistem.
2. Apa peran umpan balik dalam model sistem dinamik dan bagaimana ia memengaruhi perilaku sistem?
3. Bagaimana cara memilih alternatif skenario dalam implementasi model sistem dinamik untuk pengambilan keputusan?
4. Jelaskan pentingnya evaluasi efektivitas dan efisiensi dalam implementasi model sistem dinamik.
5. Jelaskan bagaimana teknik analisis sensitivitas digunakan dalam sistem dinamik untuk menguji ketahanan model terhadap perubahan asumsi.

BAB IX

SISTEMATIS LITERATUR REVIEW DALAM SISTEM DINAMIK

Kemampuan Akhir yang Diharapkan

Mampu memahami terkait dengan pengertian *literatur review* dalam sistem dinamik, memahami pentingnya *literatur review* untuk validasi dalam sistem dinamik, serta memahami tahapan sistematis *literatur review*, sehingga pembaca dapat melakukan tinjauan pustaka secara efektif dan sistematis, yang tidak hanya meningkatkan pemahaman teori dalam sistem dinamik tetapi juga berperan dalam validasi dan pengembangan model-model sistem dinamik yang lebih solid.

Materi Pembelajaran

- Pengertian *Literatur Review* dalam Sistem Dinamik
- Pentingnya *Literatur Review* untuk Validasi dalam Sistem Dinamik
- Tahapan Sistematis *Literatur Review*
- Soal Latihan

A. Pengertian *Literatur Review* dalam Sistem Dinamik

Literatur review dalam sistem dinamik adalah suatu proses yang melibatkan pencarian, evaluasi, dan sintesis pengetahuan yang ada tentang penerapan dan teori sistem dinamik. Proses ini bertujuan untuk mengumpulkan hasil-hasil penelitian sebelumnya yang terkait dengan model sistem dinamik, baik dari segi teori maupun aplikasinya, serta mengkaji kontribusi yang telah dibuat oleh peneliti sebelumnya. Dalam sistem dinamik, *literatur review* juga mencakup studi mengenai model-model simulasi, metodologi pengembangan model, serta teknik-teknik analisis dan validasi model.

Pada konteks sistem dinamik, *literatur review* tidak hanya terbatas pada penelaahan terhadap studi-studi teori yang mendasari

model ini, tetapi juga mencakup analisis terhadap berbagai jenis aplikasi model sistem dinamik dalam memecahkan masalah dunia nyata. Dengan kata lain, *literatur review* dalam SD adalah sebuah upaya untuk memahami sejauh mana penerapan model sistem dinamik dapat meningkatkan pengambilan keputusan dalam berbagai sektor, dan bagaimana metodologi ini dapat dikembangkan lebih lanjut. Beberapa tujuan utama dari *literatur review* dalam konteks sistem dinamik adalah:

1. Mengidentifikasi Teori dan Model yang Ada

Literatur review dalam konteks sistem dinamik bertujuan untuk mengidentifikasi teori-teori utama yang telah berkembang dalam bidang ini dan memetakan model-model yang digunakan untuk menggambarkan fenomena dinamis dalam berbagai sistem. Sistem dinamik sendiri adalah pendekatan yang digunakan untuk memodelkan perubahan yang terjadi dalam sistem kompleks, yang melibatkan interaksi antar variabel dalam waktu yang panjang. Dalam *literatur review* ini, penting untuk menggali berbagai teori yang mendasari sistem dinamik, seperti teori umpan balik (*feedback*), stokastik, dan kausalitas, yang menjadi kerangka kerja untuk memahami bagaimana perubahan dalam satu variabel dapat mempengaruhi variabel lain dalam sistem yang lebih besar.

Review ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi berbagai model yang telah digunakan untuk memodelkan fenomena tertentu dalam bidang ekonomi, lingkungan, dan sosial. Misalnya, dalam ekonomi, model sistem dinamik sering digunakan untuk mempelajari pertumbuhan ekonomi, pengangguran, inflasi, dan interaksi pasar. Dalam konteks perubahan lingkungan, model digunakan untuk memahami dinamika ekosistem, dampak perubahan iklim, serta interaksi antara aktivitas manusia dan lingkungan. Sementara itu, dalam sosiologi, model sistem dinamik digunakan untuk mempelajari perubahan sosial, penyebaran informasi, dan pengaruh kebijakan publik.

2. Mengevaluasi Metodologi dan Pendekatan yang Digunakan

Mengevaluasi metodologi dan pendekatan yang telah digunakan dalam penelitian sistem dinamik sebelumnya adalah langkah penting dalam *literatur review*. Setiap pendekatan memiliki kelebihan dan

kekurangan yang perlu dipertimbangkan dalam konteks tujuan dan kompleksitas sistem yang ingin dimodelkan. Misalnya, beberapa penelitian menggunakan simulasi numerik untuk menyelesaikan masalah yang melibatkan banyak variabel dan interaksi yang kompleks. Simulasi ini sering digunakan untuk memprediksi perilaku sistem dinamik dalam jangka panjang, namun dapat membutuhkan sumber daya komputasi yang besar dan rentan terhadap ketidakakuratan jika model yang digunakan tidak tepat. Oleh karena itu, evaluasi terhadap efektivitas penggunaan simulasi numerik sangat penting untuk mengetahui kapan pendekatan ini paling efektif digunakan.

Analisis sensitivitas juga merupakan pendekatan yang umum dalam penelitian sistem dinamik. Metode ini digunakan untuk memahami sejauh mana perubahan kecil dalam parameter model dapat mempengaruhi hasil simulasi. Pendekatan ini sangat berguna untuk mengidentifikasi variabel-variabel kritis dalam model, namun bisa jadi kurang efisien jika jumlah parameter yang perlu diuji sangat banyak. Melalui *literatur review*, peneliti dapat menilai apakah analisis sensitivitas telah dilakukan secara memadai dan apakah hasilnya memberikan wawasan yang cukup untuk pengambilan keputusan.

3. Mengidentifikasi Kesenjangan dalam Pengetahuan

Pada *literatur review*, salah satu langkah penting adalah mengidentifikasi kesenjangan dalam pengetahuan yang ada. Dengan menganalisis penelitian-penelitian terdahulu, peneliti dapat menemukan area-area yang masih minim eksplorasinya atau topik yang belum sepenuhnya dipahami. Kesenjangan ini bisa muncul dalam berbagai bentuk, seperti penerapan model sistem dinamik dalam konteks yang kurang dieksplorasi, misalnya dalam sektor sosial atau kesehatan, atau penerapan teknik analisis baru yang belum banyak digunakan. Dengan mengidentifikasi kesenjangan ini, peneliti dapat memberikan kontribusi yang signifikan dengan membahas area yang belum banyak diteliti sebelumnya.

Contoh kesenjangan yang dapat ditemukan adalah keterbatasan dalam aplikasi sistem dinamik untuk masalah yang sangat spesifik. Misalnya, meskipun banyak penelitian sistem dinamik diterapkan dalam bidang ekonomi atau lingkungan, penerapan model ini dalam konteks perubahan sosial atau kebijakan kesehatan masih sangat terbatas. Identifikasi kesenjangan ini memberikan peluang bagi peneliti

untuk menerapkan teori dan model yang ada dalam bidang baru, atau bahkan mengembangkan model-model baru yang lebih sesuai dengan kebutuhan spesifik bidang tersebut. Hal ini akan memperkaya pengetahuan dan aplikasi sistem dinamik di area yang kurang dieksplorasi.

4. Memberikan Konteks untuk Pengembangan Penelitian Selanjutnya

Literatur review berperan kunci dalam memberikan konteks untuk pengembangan penelitian selanjutnya dengan merumuskan dasar teoritis dan metodologis yang kuat. Dengan menelusuri berbagai teori, model, dan temuan penelitian sebelumnya, peneliti dapat memahami dengan lebih baik landasan yang telah ada dan bagaimana penelitiannya dapat melanjutkan atau memperluas pemahaman tersebut. *Literatur review* juga memberikan gambaran menyeluruh tentang perkembangan bidang penelitian yang bersangkutan, termasuk temuan-temuan kunci dan teori yang mendasari, sehingga penelitian selanjutnya dapat dibangun berdasarkan fondasi yang telah kokoh.

Literatur review tidak hanya membahas pengetahuan yang ada, tetapi juga mengidentifikasi area-area yang masih belum terjelajahi atau belum sepenuhnya dipahami. Ini membuka ruang bagi penelitian lebih lanjut yang bisa mengisi celah-celah tersebut. Sebagai contoh, penelitian tentang penerapan sistem dinamik dalam sektor kesehatan mungkin telah menunjukkan beberapa kemajuan, tetapi belum membahas potensi penerapan dalam kebijakan kesehatan publik secara mendalam. Peneliti yang melanjutkan penelitian ini dapat membangun teori baru atau memodifikasi model yang ada untuk menjawab tantangan yang belum terpecahkan.

B. Pentingnya *Literatur Review* untuk Validasi dalam Sistem Dinamik

Validasi dalam sistem dinamik merujuk pada proses untuk memastikan bahwa model yang dibangun mencerminkan sistem yang sebenarnya dengan cara yang dapat dipertanggungjawabkan dan dapat dipercaya. Validasi ini mencakup beberapa tahap yang meliputi:

1. Validasi Konseptual: Menilai apakah struktur model dan hubungan antar variabel yang ada dalam model tersebut sesuai dengan

pemahaman teori atau fenomena yang ingin dijelaskan. Proses ini memeriksa apakah model telah menangkap dinamika dan interaksi utama dalam sistem yang sedang dianalisis.

2. **Validasi Data:** Menilai apakah data yang digunakan dalam model, baik itu data empiris atau data yang dihasilkan dari simulasi, sesuai dengan kenyataan atau data yang dapat diukur secara nyata di lapangan. Validasi ini melibatkan komparasi antara hasil model dan data observasional untuk melihat seberapa baik model tersebut dapat mereplikasi kenyataan.
3. **Validasi Perilaku Dinamis:** Menilai apakah model dapat mereproduksi pola perilaku dinamis yang sama dengan yang diamati dalam sistem nyata. Hal ini mengacu pada apakah model dapat memprediksi perubahan-perubahan dinamis dalam waktu, seperti pertumbuhan, kestabilan, atau perubahan periodik yang ada dalam sistem.
4. **Validasi Prediktif:** Menguji apakah model dapat menghasilkan prediksi yang akurat mengenai perilaku masa depan, serta melihat apakah model dapat diterapkan untuk peramalan atau pengambilan keputusan yang andal.

Literatur review memiliki peran yang sangat penting dalam validasi model sistem dinamik karena membantu peneliti dan praktisi dalam beberapa aspek utama:

- a. **Pemahaman Teori dan Konsep yang Relevan**
satu fungsi utama *literatur review* adalah untuk memahami dan merangkum teori-teori dan konsep-konsep yang sudah ada dalam bidang sistem dinamik. Dengan menggali literatur yang relevan, peneliti dapat mendapatkan wawasan yang lebih dalam tentang struktur dan dinamika sistem yang ingin dimodelkan. Ini sangat penting untuk memastikan bahwa model yang dikembangkan mencerminkan prinsip-prinsip teori yang sudah terbukti.
- b. **Mengidentifikasi Model-model yang Telah Digunakan dan Terbukti Valid**
Dengan *literatur review*, peneliti dapat mengevaluasi model-model yang telah diterapkan dalam situasi serupa. Hal ini memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi model-model yang telah terbukti efektif dalam memecahkan masalah yang serupa dan dapat dijadikan referensi untuk pengembangan

model baru. Validasi model yang ada dalam literatur memberikan dasar yang kuat untuk memastikan bahwa pendekatan yang digunakan dalam model yang baru telah diuji sebelumnya dan berhasil.

c. Menilai Metodologi Validasi yang Telah Digunakan

Literatur review juga memberikan wawasan mengenai berbagai metodologi validasi yang telah digunakan dalam penelitian sebelumnya. Metode validasi yang umum digunakan dalam sistem dinamik meliputi analisis sensitivitas, uji perilaku dinamis, perbandingan dengan data empirik, dan simulasi jangka panjang. Dengan menelaah literatur, peneliti dapat mengidentifikasi teknik-teknik yang telah terbukti efektif untuk memvalidasi model, serta memahami bagaimana metode-metode tersebut diterapkan dalam konteks yang berbeda.

d. Identifikasi Kesenjangan dalam Validasi Model

Salah satu kontribusi penting dari *literatur review* adalah mengidentifikasi kesenjangan dalam literatur yang ada. Misalnya, beberapa area aplikasi sistem dinamik mungkin belum banyak mendapat perhatian dalam literatur, atau metodologi validasi tertentu mungkin belum diterapkan dalam konteks yang relevan. Dengan mengevaluasi literatur yang ada, peneliti dapat melihat di mana penelitian sebelumnya mungkin kurang memadai dan bagaimana dapat mengatasi masalah tersebut dalam penelitiannya sendiri.

e. Penguatan Keandalan dan Kredibilitas Model

Penguatan keandalan dan kredibilitas model dalam penelitian sistem dinamik sangat bergantung pada validasi yang dilakukan sebelumnya. Sebuah *literatur review* yang komprehensif akan memberikan gambaran bagaimana model-model yang ada telah diuji dan divalidasi dalam konteks yang relevan. Validasi ini penting untuk memastikan bahwa model yang digunakan mampu merepresentasikan kondisi dunia nyata dengan akurat. Jika sebuah model telah terbukti efektif dalam berbagai studi atau telah diterapkan dalam situasi yang serupa, hal ini memberikan bukti kuat mengenai keandalannya. Oleh karena itu, *literatur review* membantu memperkuat posisi model yang digunakan dengan menunjukkan bahwa model tersebut telah diterima dan terbukti efektif dalam konteks yang relevan.

Keandalan model menjadi kunci untuk memastikan bahwa hasil simulasi atau analisis yang dihasilkan dapat dipercaya dan digunakan sebagai dasar untuk pengambilan keputusan yang penting. Dalam berbagai bidang, seperti kebijakan publik atau manajemen sumber daya alam, keputusan yang diambil berdasar pada model yang kurang valid dapat berisiko dan menghasilkan hasil yang tidak diinginkan. *Literatur review* yang mencakup bukti validasi model dari berbagai penelitian akan memberikan keyakinan bahwa model yang digunakan bukan hanya teori semata, tetapi telah terbukti dapat memberikan hasil yang akurat dan sesuai dengan kenyataan.

C. Tahapan Sistematis *Literatur Review*

Literatur review (tinjauan pustaka) adalah proses penting dalam penelitian yang berfungsi untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mensintesis penelitian sebelumnya yang relevan. Dalam konteks sistem dinamik, *literatur review* bertujuan untuk memahami teori, model, metodologi, serta hasil-hasil yang telah ada, dengan tujuan untuk mendukung pembangunan model yang valid dan efektif. Proses ini harus dilakukan secara sistematis, terstruktur, dan terorganisir agar dapat memberikan kontribusi yang berarti dalam validasi model sistem dinamik.

1. Penentuan Topik dan Ruang Lingkup

Langkah pertama dalam sistematis *literatur review* adalah penentuan topik dan ruang lingkup penelitian. Proses ini bertujuan untuk menetapkan fokus yang jelas, sehingga *literatur review* yang dilakukan memiliki tujuan yang spesifik dan relevan. Penentuan topik dan ruang lingkup yang tepat adalah hal yang sangat penting karena akan mempengaruhi seluruh proses pencarian, seleksi, dan sintesis literatur yang dilakukan.

a. Menentukan Topik

Menentukan topik *literatur review* dalam konteks sistem dinamik merupakan langkah pertama yang krusial dalam menyusun penelitian yang terarah dan fokus. Topik yang dipilih harus relevan dengan permasalahan yang ingin dipecahkan menggunakan pendekatan sistem dinamik. Sebagai contoh, jika

tujuan penelitian adalah mengembangkan model sistem dinamik untuk memprediksi pertumbuhan ekonomi, maka topik *literatur review* sebaiknya difokuskan pada teori-teori dasar yang berkaitan dengan dinamika ekonomi, seperti teori makroekonomi dan model-model dinamik yang telah digunakan untuk menganalisis fenomena ekonomi. Hal ini akan memberi dasar yang kuat untuk memahami konsep-konsep yang ada, serta mengidentifikasi pendekatan-pendekatan yang telah terbukti efektif dalam penelitian serupa.

Pemilihan topik juga perlu disesuaikan dengan tujuan penelitian. Jika peneliti ingin mengembangkan model sistem dinamik untuk bidang tertentu, seperti pengelolaan sumber daya alam atau perubahan iklim, *literatur review* sebaiknya mencakup penerapan sistem dinamik dalam bidang tersebut. Dalam hal ini, peneliti perlu mengidentifikasi model-model yang telah digunakan sebelumnya untuk menangani masalah-masalah serupa, serta mengevaluasi kelebihan dan kekurangannya. Hal ini memungkinkan peneliti untuk memperluas pemahaman tentang bagaimana sistem dinamik dapat digunakan untuk memodelkan dinamika lingkungan atau kebijakan terkait, serta memberikan pandangan yang lebih jelas mengenai kesenjangan yang mungkin ada dalam penerapan sistem dinamik di bidang tersebut.

b. Menetapkan Ruang Lingkup

Langkah selanjutnya adalah menetapkan ruang lingkup *literatur review*. Penetapan ruang lingkup yang jelas sangat penting agar pencarian literatur dapat lebih terfokus dan relevan dengan tujuan penelitian. Ruang lingkup ini mencakup beberapa aspek, seperti periode waktu yang akan ditinjau, wilayah geografis yang relevan, serta batasan subjek atau masalah yang akan diangkat. Sebagai contoh, jika penelitian berfokus pada penggunaan sistem dinamik dalam manajemen sumber daya alam, peneliti dapat memutuskan untuk membatasi ruang lingkungannya pada penerapan model sistem dinamik dalam konteks pengelolaan air atau kehutanan, serta hanya mempertimbangkan literatur yang diterbitkan dalam 10 tahun terakhir. Hal ini membantu peneliti untuk memetakan tren dan

pendekatan terbaru yang relevan dengan masalah yang sedang diteliti.

Penetapan ruang lingkup juga mencakup batasan pada jenis literatur yang akan ditinjau. Sebagai contoh, peneliti mungkin memilih untuk hanya memasukkan artikel ilmiah, buku teks, atau laporan kebijakan dari lembaga yang terpercaya, serta menghindari literatur yang tidak peer-reviewed atau kurang kredibel. Selain itu, peneliti perlu memutuskan apakah *literatur review* akan fokus pada studi kasus di wilayah tertentu, misalnya, negara atau kawasan dengan kebijakan lingkungan yang maju, atau apakah akan mencakup penerapan sistem dinamik secara global. Dengan menentukan batasan geografis dan subjek, peneliti dapat memastikan bahwa literatur yang ditinjau relevan dan dapat memberikan wawasan yang mendalam dalam konteks penelitian yang sedang dilakukan.

2. Strategi Pencarian Literatur

Langkah kedua dalam sistematis *literatur review* adalah merumuskan strategi pencarian literatur. Pencarian literatur yang efektif adalah kunci untuk mendapatkan artikel dan sumber-sumber yang relevan, terpercaya, dan berkualitas. Strategi pencarian ini mencakup pemilihan database yang tepat, penentuan kata kunci yang efektif, serta penyaringan artikel yang relevan.

a. Pemilihan Database

Peneliti harus memilih database yang tepat untuk mencari literatur yang relevan. Beberapa database yang sering digunakan dalam pencarian literatur sistem dinamik adalah:

- 1) Scopus: Database multidisipliner yang menawarkan jurnal ilmiah internasional dari berbagai bidang, termasuk sistem dinamik.
- 2) Web of Science: Database yang sangat luas, yang juga mencakup artikel-artikel tentang sistem dinamik.
- 3) Google Scholar: Platform pencarian yang mudah diakses, sering digunakan untuk mencari artikel ilmiah dan buku-buku yang berhubungan dengan sistem dinamik.
- 4) IEEE Xplore: Terutama digunakan untuk mencari literatur dalam bidang rekayasa dan teknologi, yang juga mencakup aplikasi sistem dinamik.

b. Penentuan Kata Kunci

Pemilihan kata kunci yang tepat sangat penting dalam memastikan bahwa pencarian literatur menghasilkan hasil yang relevan. Kata kunci ini harus mencakup istilah yang berkaitan dengan topik dan ruang lingkup yang telah ditentukan sebelumnya. Misalnya, jika topik yang dibahas adalah penerapan sistem dinamik dalam ekonomi, beberapa kata kunci yang bisa digunakan antara lain: “*system dynamics in economics*”, “*dynamic modeling*”, “*economic growth models*”, “*feedback loops in economics*”, dan sebagainya. Selain kata kunci utama, peneliti juga dapat menggunakan variasi kata kunci dan sinonim untuk memperluas pencarian. Pencarian yang terstruktur dengan baik ini dapat dilakukan menggunakan operator Boolean (AND, OR, NOT) untuk mempersempit atau memperluas hasil pencarian.

c. Menyaring Artikel yang Relevan

Setelah melakukan pencarian, peneliti harus menyaring artikel-artikel yang ditemukan untuk memastikan hanya literatur yang relevan dan berkualitas tinggi yang digunakan. Kriteria penyaringan ini bisa mencakup:

- 1) Kualitas jurnal: Pastikan artikel berasal dari jurnal yang terindeks dan memiliki reputasi yang baik.
- 2) Tahun publikasi: Pilih artikel yang relevan dengan topik terkini, dengan rentang waktu biasanya 5-10 tahun terakhir.
- 3) Relevansi topik: Pastikan artikel benar-benar berkaitan dengan topik dan ruang lingkup penelitian.

3. Seleksi Literatur Relevan

Seleksi literatur relevan merupakan langkah yang penting untuk memastikan bahwa hanya sumber yang memberikan kontribusi berarti terhadap penelitian yang digunakan. Proses ini melibatkan beberapa tahapan berikut:

a. Membaca Abstrak dan Kesimpulan

Seleksi literatur yang relevan adalah langkah penting dalam menyusun *literatur review* yang efektif. Salah satu tahap awal yang umum dilakukan adalah dengan membaca abstrak dan kesimpulan dari artikel atau sumber yang ditemukan. Abstrak

biasanya memberikan gambaran singkat tentang tujuan, metode, dan hasil penelitian, sedangkan kesimpulan merangkum temuan utama dan kontribusi penelitian terhadap bidang yang dibahas. Dengan membaca kedua bagian ini, peneliti dapat dengan cepat menilai apakah artikel tersebut berfokus pada topik yang relevan dengan penelitian yang sedang dilakukan.

Jika abstrak dan kesimpulan menunjukkan bahwa artikel membahas aspek yang sesuai dengan ruang lingkup penelitian, artikel tersebut dapat dipertimbangkan untuk dibaca lebih lanjut. Misalnya, dalam konteks sistem dinamik, jika artikel menyebutkan penggunaan model sistem dinamik dalam analisis perubahan sosial atau pengelolaan sumber daya alam, ini menunjukkan relevansi yang cukup tinggi terhadap topik yang dibahas. Pada titik ini, peneliti dapat memasukkan artikel tersebut ke dalam daftar literatur yang perlu dianalisis lebih mendalam.

b. Memeriksa Metodologi dan Temuan Utama

Setelah artikel yang relevan dipilih berdasarkan abstrak dan kesimpulannya, langkah berikutnya adalah memeriksa metodologi yang digunakan dalam penelitian. Dalam konteks sistem dinamik, metodologi yang digunakan harus tepat untuk masalah yang sedang dianalisis. Misalnya, model sistem dinamik yang diterapkan harus sesuai dengan dinamika sistem yang ingin dipahami, seperti perubahan sosial, ekonomi, atau lingkungan. Peneliti harus memeriksa apakah model tersebut mengintegrasikan elemen-elemen penting seperti umpan balik, stok, dan aliran, serta apakah pendekatan yang digunakan mampu merepresentasikan kompleksitas sistem yang dianalisis. Hasil penelitian harus dapat dipercaya dan valid. Artikel yang baik akan menjelaskan dengan jelas bagaimana model diterapkan, serta memberikan hasil yang konsisten dan dapat direplikasi dalam kondisi yang serupa. Untuk memastikan keandalan model, peneliti harus memeriksa apakah model tersebut telah divalidasi, baik melalui uji coba dengan data historis atau dengan perbandingan terhadap sistem nyata. Validasi ini penting karena hanya dengan memastikan bahwa model memberikan hasil yang akurat dan realistis, kita bisa percaya bahwa model tersebut dapat digunakan untuk

meramalkan atau memberikan wawasan yang bermanfaat dalam pengambilan keputusan.

c. **Menilai Kontribusi Artikel terhadap Pemahaman Model**

Menilai kontribusi artikel terhadap pemahaman model sistem dinamik sangat penting untuk memastikan bahwa literatur yang dipilih dapat memberikan wawasan yang substansial. Artikel yang baik tidak hanya menyajikan teori dasar sistem dinamik, tetapi juga menghubungkan teori tersebut dengan aplikasi praktis dalam konteks yang relevan. Dalam hal ini, artikel yang memaparkan bagaimana model sistem dinamik diterapkan dalam memecahkan masalah nyata, seperti dalam perencanaan kota, manajemen sumber daya alam, atau analisis perubahan iklim, lebih berharga karena memberikan gambaran tentang bagaimana teori-teori tersebut bekerja di dunia nyata.

Kontribusi penting lainnya adalah sejauh mana artikel tersebut menggambarkan keberhasilan atau kegagalan penerapan model sistem dinamik dalam kasus-kasus spesifik. Artikel yang membahas hasil implementasi model, tantangan yang dihadapi, serta pembelajaran yang dapat diambil, memberikan wawasan yang lebih dalam dan aplikatif bagi peneliti. Oleh karena itu, artikel yang tidak hanya berbicara tentang teori tetapi juga menunjukkan bukti empiris atau studi kasus akan lebih relevan dalam mengembangkan model sistem dinamik yang lebih efisien dan efektif. Kontribusi semacam ini dapat membantu peneliti memahami tidak hanya bagaimana model bekerja, tetapi juga bagaimana model tersebut dapat diadaptasi atau disesuaikan dengan berbagai kondisi praktis.

4. Sintesis dan Analisis Temuan

Tahap terakhir dalam *literatur review* adalah sintesis dan analisis temuan dari artikel-artikel yang telah dipilih. Pada tahap ini, peneliti harus merangkum dan menganalisis hasil-hasil yang diperoleh dari literatur yang telah disaring dan dipilih. Tujuan dari sintesis adalah untuk melihat bagaimana temuan-temuan tersebut saling berhubungan, serta untuk mengidentifikasi tren, pola, atau kesenjangan dalam penelitian yang ada.

a. Sintesis Temuan

Sintesis temuan dalam *literatur review* berfungsi untuk mengintegrasikan berbagai hasil penelitian yang relevan, sehingga memberikan gambaran komprehensif tentang perkembangan dalam suatu bidang. Dalam konteks sistem dinamik, proses sintesis dimulai dengan mengidentifikasi berbagai model yang telah digunakan dalam penelitian sebelumnya, serta pendekatan yang digunakan oleh para peneliti. Misalnya, artikel-artikel yang menggunakan model berbasis agen, model berbasis umpan balik, atau model berbasis stok dapat dikelompokkan untuk melihat perbedaan dan kesamaan dalam pendekatan yang diterapkan. Dengan cara ini, peneliti bisa melihat tren dalam penggunaan model serta kelebihan dan kekurangannya dalam berbagai konteks.

Pada sintesis temuan, penting untuk membahas hubungan antar konsep yang ditemukan di berbagai studi. Misalnya, jika beberapa penelitian menunjukkan bahwa model berbasis stok lebih efektif dalam meramalkan perubahan jangka panjang dalam sistem ekonomi, sementara model berbasis umpan balik lebih baik untuk analisis dinamis dalam skala kecil, hal ini dapat menjadi insight penting untuk penelitian lebih lanjut. Sintesis ini juga membantu mengidentifikasi area yang masih kurang diteliti atau variabel yang mungkin perlu dimasukkan dalam model di masa depan, sehingga memberi arah bagi pengembangan teori dan metodologi.

b. Analisis Temuan

Analisis temuan merupakan langkah penting dalam *literatur review*, karena tidak hanya menggabungkan berbagai hasil penelitian, tetapi juga memberikan penilaian kritis terhadap kekuatan dan kelemahan model yang digunakan dalam setiap artikel yang dipilih. Peneliti harus menganalisis apakah model sistem dinamik yang diterapkan relevan dengan tujuan penelitian, serta sejauh mana model tersebut berhasil mencerminkan realitas yang dianalisis. Misalnya, dalam penelitian yang menggunakan model berbasis stok, peneliti harus menilai apakah model tersebut mampu menggambarkan perubahan dinamis dalam sistem yang kompleks, serta seberapa

akurat prediksi yang dihasilkan dibandingkan dengan data nyata.

Analisis metodologi yang diterapkan dalam artikel juga menjadi bagian penting dari evaluasi. Peneliti harus mengevaluasi apakah pendekatan yang digunakan (seperti simulasi numerik atau model berbasis umpan balik) sesuai dengan masalah yang dihadapi, dan apakah metodologi tersebut dapat menghasilkan temuan yang dapat diandalkan dan dapat direplikasi. Hal ini mencakup penilaian terhadap kualitas data yang digunakan, validitas asumsi model, serta kecocokan teknik analisis yang diterapkan.

D. Soal Latihan

1. Jelaskan langkah-langkah yang harus diambil untuk menentukan topik dan ruang lingkup dalam *literatur review* sistem dinamik. Mengapa penentuan topik yang jelas sangat penting dalam proses *literatur review*?
2. Dalam proses seleksi literatur relevan, bagaimana cara menilai kualitas sebuah artikel? Apa saja kriteria yang perlu diperhatikan dalam memilih literatur yang dapat dipercaya untuk penelitian sistem dinamik?
3. Jelaskan bagaimana proses sintesis dan analisis temuan dalam *literatur review* dapat membantu dalam mengembangkan model sistem dinamik. Apa tujuan utama dari sintesis literatur dan bagaimana hal tersebut dapat meningkatkan validitas model yang akan dibangun?
4. Jelaskan peran strategi pencarian literatur dalam memastikan bahwa hasil dari *literatur review* tidak hanya komprehensif tetapi juga terkini.
5. Jelaskan bagaimana *literatur review* dalam sistem dinamik dapat memperbaiki atau memperbaharui teori yang ada.

BAB X

INTEGRASI DATA KE DALAM SISTEM DINAMIK

Kemampuan Akhir yang Diharapkan

Mampu memahami terkait dengan pengumpulan data untuk model sistem dinamik, memahami teknik pemrosesan data, serta memahami validasi data untuk simulasi dinamik, sehingga pembaca dapat mengumpulkan, memproses, dan memvalidasi data secara efektif, yang sangat penting dalam memastikan bahwa model sistem dinamik yang dikembangkan dapat memberikan analisis yang akurat dan dapat diandalkan untuk pengambilan keputusan yang berbasis data.

Materi Pembelajaran

- Pengumpulan Data untuk Model Sistem Dinamik
- Teknik Pemrosesan Data
- Validasi Data untuk Simulasi Dinamik
- Soal Latihan

A. Pengumpulan Data untuk Model Sistem Dinamik

Pengumpulan data merupakan langkah kritis dalam membangun model sistem dinamik yang efektif dan valid. Data yang digunakan dalam sistem dinamik berfungsi sebagai dasar untuk mendesain model, memverifikasi keakuratannya, dan melakukan simulasi yang relevan dengan dunia nyata. Data adalah komponen fundamental dalam pengembangan model sistem dinamik. Model yang dibuat tanpa data yang akurat dan relevan rentan menghasilkan hasil yang tidak valid, yang pada akhirnya dapat merugikan keputusan berbasis model. Data diperlukan untuk:

1. Kalibrasi Model – Menentukan parameter-parameter yang sesuai dengan kondisi nyata.
2. Validasi Model – Memastikan bahwa model merefleksikan perilaku sistem sesungguhnya.

3. Simulasi dan Eksperimen – Memberikan gambaran tentang berbagai skenario di masa depan.

Sterman (2002) menekankan bahwa keberhasilan model sistem dinamik sangat bergantung pada integrasi data yang kuat untuk memastikan model dapat memetakan pola perilaku kompleks dalam sistem nyata.

- a. Sumber Data untuk Sistem Dinamik

Sumber data yang digunakan dalam sistem dinamik dapat berasal dari berbagai macam input, termasuk data kuantitatif dan kualitatif. Berikut adalah beberapa sumber utama data:

- 1) Data Kuantitatif

Data kuantitatif melibatkan angka atau statistik yang digunakan untuk mengukur perilaku sistem. Sumber utamanya meliputi:

- a) Data Sekunder: Statistik yang sudah dipublikasikan, seperti data dari badan pemerintah, organisasi internasional, atau laporan perusahaan.
- b) Data Primer: Data yang dikumpulkan langsung oleh peneliti melalui survei, eksperimen, atau pengamatan langsung.

- 2) Data Kualitatif

Data kualitatif mengacu pada informasi deskriptif yang dapat digunakan untuk memahami interaksi antar elemen sistem.

- a) Wawancara: Digunakan untuk mengumpulkan wawasan dari para ahli atau pemangku kepentingan.
- b) Analisis Dokumen: Menggunakan dokumen, laporan, atau artikel untuk mengekstraksi informasi relevan.

- b. Teknik Pengumpulan Data untuk Sistem Dinamik

Pengumpulan data dapat dilakukan dengan berbagai teknik, tergantung pada kebutuhan model dan jenis data yang diperlukan:

- 1) Survei dan Kuesioner

Survei dan kuesioner merupakan teknik pengumpulan data yang umum digunakan dalam penelitian sistem dinamik, terutama untuk mendapatkan data primer yang diperlukan dalam membangun dan memvalidasi model. Survei memungkinkan peneliti untuk mengumpulkan informasi

langsung dari responden, yang bisa berupa individu, kelompok, atau organisasi yang terlibat dalam sistem yang sedang diteliti. Pengumpulan data melalui survei memberikan keunggulan karena peneliti dapat merancang pertanyaan sesuai dengan kebutuhan spesifik model yang sedang dikembangkan, sehingga hasil yang diperoleh lebih relevan dan berguna dalam analisis sistem dinamik.

Agar kuesioner dapat memberikan data yang akurat dan dapat digunakan dalam model sistem dinamik, desain kuesioner menjadi sangat penting. Pertanyaan-pertanyaan dalam kuesioner harus disusun dengan cermat, menghindari bias, dan memastikan bahwa setiap pertanyaan terkait langsung dengan elemen-elemen yang ada dalam model sistem dinamik. Misalnya, jika model bertujuan untuk menganalisis perubahan perilaku konsumen dalam suatu industri, maka kuesioner perlu mencakup pertanyaan-pertanyaan tentang kebiasaan konsumsi, faktor yang mempengaruhi keputusan pembelian, serta persepsi terhadap faktor-faktor eksternal yang mempengaruhi pasar.

2) Pengamatan Langsung

Pengamatan langsung merupakan teknik pengumpulan data yang penting dalam penelitian sistem dinamik, di mana peneliti secara langsung mengamati sistem atau proses yang sedang berlangsung di dunia nyata. Metode ini memungkinkan peneliti untuk mendapatkan wawasan langsung mengenai dinamika sistem yang tidak dapat dijelaskan sepenuhnya melalui data kuantitatif atau model matematis. Dalam pengamatan langsung, peneliti dapat mencatat interaksi antar elemen dalam sistem, bagaimana variabel-variabel berinteraksi, serta dampak dari perubahan tertentu terhadap sistem secara keseluruhan. Misalnya, dalam sistem dinamik yang mengkaji pengelolaan sumber daya alam, pengamatan langsung terhadap penggunaan air di suatu daerah bisa memberikan data yang sangat berguna untuk memahami bagaimana kebijakan tertentu mempengaruhi perilaku masyarakat dan sumber daya alam.

3) Eksperimen

Eksperimen merupakan salah satu teknik pengumpulan data yang efektif dalam penelitian sistem dinamik, terutama ketika tujuan utama adalah untuk menguji hubungan sebab-akibat antara variabel-variabel dalam suatu sistem. Dalam eksperimen, peneliti dapat mengubah salah satu atau beberapa variabel independen untuk melihat bagaimana perubahan tersebut mempengaruhi variabel dependen dalam sistem yang dianalisis. Misalnya, dalam penelitian mengenai dampak kebijakan lingkungan terhadap kualitas udara, peneliti dapat merancang eksperimen untuk melihat bagaimana perubahan kebijakan, seperti pengurangan emisi kendaraan, mempengaruhi kualitas udara di daerah perkotaan. Eksperimen ini memberikan data yang dapat digunakan untuk memvalidasi atau memodifikasi model sistem dinamik.

4) Data Digital dan Sensor

Penggunaan teknologi digital dan sensor dalam pengumpulan data untuk sistem dinamik telah membuka kemungkinan baru dalam memperoleh informasi yang akurat dan real-time. Salah satu contoh paling umum adalah penggunaan Internet of Things (IoT), yang menghubungkan berbagai perangkat fisik seperti sensor untuk mengumpulkan data secara otomatis. Dalam konteks sistem dinamik, data digital yang diperoleh melalui IoT dapat digunakan untuk memodelkan berbagai fenomena, seperti pola lalu lintas, konsumsi energi, kualitas udara, atau aliran air dalam sistem hidrologi. Keunggulan utama dari data digital adalah kemampuannya untuk menyediakan informasi yang terus-menerus diperbarui, memungkinkan model dinamik untuk merefleksikan kondisi yang paling terkini dan dinamis dalam sistem yang sedang dianalisis.

B. Teknik Pemrosesan Data

Pemrosesan data adalah langkah penting dalam integrasi data ke dalam sistem dinamik. Data mentah sering kali memerlukan manipulasi, transformasi, dan pengorganisasian agar dapat digunakan untuk analisis dan simulasi model dinamik. Teknik pemrosesan data

memastikan bahwa data yang digunakan berkualitas tinggi, relevan, dan dalam format yang sesuai untuk diterapkan dalam model. Pemrosesan data berperan sentral dalam menjembatani data mentah dengan model sistem dinamik. Proses ini mencakup langkah-langkah untuk meningkatkan kualitas, memastikan integritas, dan mempersiapkan data untuk dianalisis lebih lanjut.

1. Tahapan dalam Pemrosesan Data untuk Sistem Dinamik

Proses pemrosesan data melibatkan serangkaian langkah, mulai dari pembersihan data hingga transformasi dan integrasi. Berikut adalah tahapan utama:

a. Pembersihan Data (*Data Cleaning*)

Pembersihan data (*data cleaning*) adalah tahap krusial dalam pemrosesan data untuk sistem dinamik, karena kualitas data yang buruk dapat mengarah pada hasil model yang tidak akurat. Langkah pertama dalam pembersihan data adalah mengidentifikasi kesalahan atau ketidakkonsistenan yang ada dalam dataset. Kesalahan ini bisa berupa data yang hilang (*missing data*), duplikasi data, atau nilai-nilai yang tidak sesuai (*outliers*). Misalnya, dalam data yang dikumpulkan melalui sensor atau survei, ada kemungkinan bahwa beberapa pengamatan tidak tercatat dengan lengkap atau ada nilai yang jauh menyimpang dari rentang yang wajar. Deteksi kesalahan ini penting agar proses analisis dan pemodelan tidak terganggu oleh data yang tidak valid.

Tahap berikutnya adalah koreksi kesalahan tersebut. Salah satu teknik umum untuk mengatasi data yang hilang adalah imputasi data, yaitu proses mengisi nilai yang hilang dengan perkiraan yang dihitung berdasarkan data yang ada. Misalnya, nilai yang hilang dapat diisi dengan rata-rata, median, atau menggunakan teknik yang lebih canggih seperti regresi atau algoritma machine learning untuk memprediksi nilai yang hilang. Jika data yang hilang terlalu banyak atau tidak relevan untuk tujuan analisis, mungkin lebih baik untuk menghapus entri tersebut dari dataset, meskipun ini perlu dilakukan dengan hati-hati agar tidak mengurangi kualitas dataset secara keseluruhan.

b. Transformasi Data

Transformasi data adalah tahapan penting dalam pemrosesan data untuk sistem dinamik, yang bertujuan untuk mengubah data mentah ke dalam format yang dapat digunakan dengan lebih efektif dalam analisis dan pemodelan. Salah satu proses umum dalam transformasi data adalah normalisasi, yang mengubah nilai data agar berada dalam skala tertentu, misalnya, antara 0 dan 1. Normalisasi ini sangat penting ketika data memiliki unit atau rentang yang berbeda-beda, sehingga variabel-variabel tersebut dapat dibandingkan secara adil. Misalnya, dalam model yang menggabungkan variabel ekonomi seperti GDP dan inflasi, normalisasi memungkinkan kedua variabel tersebut untuk berkontribusi secara setara dalam perhitungan tanpa terpengaruh oleh perbedaan skala atau satuan.

Agregasi adalah langkah transformasi lainnya yang sering dilakukan, terutama ketika data diperoleh dari berbagai sumber atau periode waktu yang berbeda. Agregasi mengacu pada proses menggabungkan data yang tersebar atau terpisah menjadi satu dataset yang lebih komprehensif dan mudah dianalisis. Misalnya, dalam model transportasi dinamik, data lalu lintas dari beberapa sensor yang tersebar di berbagai lokasi dapat digabungkan untuk menghasilkan satu dataset yang menggambarkan pola lalu lintas secara keseluruhan di wilayah tersebut. Proses ini membantu menyederhanakan analisis dan memungkinkan penggunaan data yang lebih luas dalam pemodelan dinamik.

c. Integrasi Data

Integrasi data merupakan langkah penting dalam pemrosesan data untuk sistem dinamik, yang bertujuan untuk menggabungkan data yang berasal dari berbagai sumber menjadi satu kesatuan yang konsisten dan terorganisasi. Proses ini sangat diperlukan ketika data yang digunakan untuk membangun model dinamik tersebar di berbagai platform, seperti sensor, sistem informasi manajemen, atau database eksternal. Integrasi data memungkinkan pemodelan dinamik yang lebih menyeluruh, di mana informasi dari berbagai sektor atau dimensi dapat digabungkan untuk memberikan gambaran yang lebih akurat tentang sistem yang sedang dianalisis.

Salah satu tantangan utama dalam integrasi data adalah memastikan konsistensi antara berbagai sumber data. Seringkali, data yang berasal dari sistem yang berbeda memiliki format, struktur, atau skala yang berbeda pula. Oleh karena itu, proses ini memerlukan teknik yang dapat mengatasi perbedaan format dan mengubah data ke dalam format yang seragam. Misalnya, data yang diperoleh dari sensor IoT dan data dari survei atau observasi mungkin memiliki unit pengukuran yang berbeda. Dalam kasus ini, perlu dilakukan penyesuaian dan konversi untuk memastikan bahwa data dari semua sumber dapat digabungkan secara efisien dan tidak menimbulkan kesalahan analisis.

d. Validasi Data

Validasi data adalah langkah krusial dalam pemrosesan data untuk sistem dinamik, yang bertujuan untuk memastikan bahwa data yang digunakan dalam model memiliki kualitas yang tinggi dan sesuai dengan kriteria yang telah ditetapkan. Proses validasi ini mencakup pemeriksaan ketepatan, konsistensi, dan relevansi data untuk memastikan bahwa data yang dimasukkan dalam model dapat dipercaya dan memberikan hasil yang akurat. Tanpa validasi yang memadai, model yang dibangun dapat menghasilkan prediksi yang salah atau menyesatkan, yang pada gilirannya dapat merugikan proses pengambilan keputusan.

Salah satu aspek utama dalam validasi data adalah memastikan ketepatan data. Hal ini mencakup verifikasi bahwa data yang dikumpulkan benar-benar mencerminkan variabel yang dimaksud dan tidak mengandung kesalahan atau bias. Misalnya, data yang digunakan untuk memodelkan dinamika populasi dalam sistem sosial harus diperiksa untuk memastikan bahwa angka yang dikumpulkan adalah akurat dan sesuai dengan sumbernya. Validasi juga mencakup pemeriksaan terhadap kesesuaian antara data yang diperoleh dengan data yang ideal atau standar dalam bidang tersebut, seperti perbandingan dengan data historis atau data dari sumber yang lebih terpercaya.

2. Teknik Pemrosesan Data

Berikut adalah teknik-teknik pemrosesan data yang sering digunakan dalam sistem dinamik:

a. Data Preprocessing

Data preprocessing adalah tahap awal yang sangat penting dalam pemrosesan data untuk sistem dinamik, karena kualitas data yang digunakan akan mempengaruhi hasil model secara keseluruhan. Salah satu langkah utama dalam data preprocessing adalah scaling, yang bertujuan untuk mengubah data ke dalam rentang nilai tertentu, seperti 0 hingga 1, agar semua variabel berada dalam skala yang sama. Ini sangat penting ketika data yang digunakan memiliki unit yang berbeda atau rentang nilai yang sangat bervariasi. Misalnya, dalam model yang melibatkan suhu, tekanan, dan kelembapan, setiap variabel mungkin memiliki rentang nilai yang jauh berbeda, sehingga tanpa scaling, variabel yang memiliki rentang lebih besar akan mendominasi model. Scaling memastikan bahwa semua variabel memiliki kontribusi yang seimbang dalam model, meningkatkan efisiensi dan akurasi prediksi.

Langkah penting lainnya dalam data preprocessing adalah encoding, yaitu mengonversi data kualitatif menjadi data numerik. Banyak algoritma sistem dinamik memerlukan input numerik untuk dapat memproses data secara efisien. Data kualitatif, seperti kategori atau label (misalnya, "tinggi", "sedang", dan "rendah"), perlu diubah menjadi format numerik agar dapat dimasukkan ke dalam model. Metode umum untuk encoding adalah menggunakan teknik seperti one-hot encoding, di mana setiap kategori diubah menjadi variabel biner (0 atau 1), atau label encoding, di mana setiap kategori diberi nilai numerik yang sesuai. Proses ini memungkinkan model untuk memproses data kualitatif secara matematis dan meningkatkan kemampuan model dalam menangani berbagai jenis data.

b. Data Wrangling

Data wrangling merupakan salah satu tahap kritis dalam mempersiapkan data mentah untuk analisis atau simulasi dalam model sistem dinamik. Proses ini melibatkan serangkaian langkah untuk membersihkan, mengubah, dan menyusun ulang data agar dapat digunakan secara efektif. Salah satu teknik utama dalam data wrangling adalah filtering, yang bertujuan untuk menghapus data yang tidak relevan atau tidak berguna untuk analisis lebih lanjut. Filtering ini seringkali dilakukan

dengan mengidentifikasi dan menghapus nilai yang hilang, duplikasi, atau data yang berada di luar kisaran yang diinginkan. Proses ini membantu mengurangi noise dalam data dan memastikan bahwa hanya informasi yang relevan yang diproses dalam model, meningkatkan akurasi dan efisiensi hasil simulasi. Langkah selanjutnya dalam data wrangling adalah restructuring. Ini mencakup pengorganisasian ulang data ke dalam format yang lebih logis atau sesuai dengan kebutuhan model. Restructuring data mungkin melibatkan penggabungan beberapa dataset yang berbeda atau mengubah format data untuk memudahkan pemrosesan lebih lanjut. Sebagai contoh, data yang awalnya tersimpan dalam bentuk tabel bisa diubah menjadi format matriks atau grafik agar lebih sesuai dengan jenis model yang akan digunakan. Proses ini juga termasuk penataan ulang data berdasarkan variabel yang relevan untuk analisis, yang pada gilirannya membantu meningkatkan kualitas input untuk model sistem dinamik.

c. Data Reduction

Data reduction adalah teknik yang digunakan untuk mengurangi volume data yang besar tanpa menghilangkan informasi penting, yang sangat berguna dalam analisis sistem dinamik. Salah satu teknik yang umum digunakan dalam data reduction adalah *Principal Component Analysis* (PCA). PCA berfungsi untuk mengurangi dimensi data dengan cara mengidentifikasi dan menyimpan informasi utama yang ada dalam dataset. Teknik ini menganalisis varians antar variabel untuk mengidentifikasi kombinasi linier dari variabel-variabel tersebut yang memiliki kontribusi terbesar terhadap informasi dalam dataset. Hasilnya adalah komponen utama yang mewakili mayoritas informasi yang terkandung dalam data, memungkinkan pengurangan dimensi tanpa kehilangan signifikansi dari data yang ada. Dengan demikian, PCA membantu mempermudah pemrosesan data, mempercepat analisis, dan mengurangi beban komputasi yang diperlukan. Teknik sampling juga sering digunakan dalam data reduction, terutama ketika bekerja dengan dataset yang sangat besar. Sampling dilakukan dengan memilih subset data yang representatif untuk mewakili keseluruhan populasi data. Tujuan

dari sampling adalah untuk menyederhanakan dataset dengan memilih bagian data yang paling relevan atau memiliki karakteristik serupa dengan data yang lebih besar, sehingga dapat melakukan analisis yang efisien. Teknik ini penting untuk meminimalkan waktu pemrosesan dan sumber daya komputasi, terutama ketika mengerjakan model sistem dinamik yang membutuhkan perhitungan intensif. Dengan menggunakan sampel yang cukup besar dan mewakili data secara keseluruhan, hasil yang diperoleh tetap dapat diandalkan.

d. Data Imputation

Data imputation adalah proses yang digunakan untuk mengatasi masalah data yang hilang atau tidak lengkap dalam dataset. Dalam konteks sistem dinamik, data yang hilang bisa memengaruhi hasil model secara signifikan, sehingga imputation menjadi langkah penting untuk memastikan keakuratan analisis. Salah satu teknik sederhana yang sering digunakan adalah mean imputation. Teknik ini menggantikan nilai yang hilang dengan rata-rata dari data yang ada dalam satu variabel. Misalnya, jika ada beberapa nilai yang hilang dalam variabel pengukuran suhu, nilai yang hilang tersebut akan digantikan dengan nilai rata-rata suhu yang teramati. Meskipun mudah diterapkan, teknik ini memiliki kelemahan, karena mengabaikan variasi data dan dapat mengurangi keberagaman informasi dalam dataset.

Teknik lain yang lebih canggih adalah regression imputation. Teknik ini memanfaatkan hubungan antar variabel untuk memperkirakan nilai yang hilang berdasarkan pola yang ada dalam data. Misalnya, jika nilai variabel X hilang dan terdapat hubungan yang kuat dengan variabel Y, maka nilai X yang hilang dapat diprediksi menggunakan regresi antara X dan Y. Dengan demikian, regression imputation memungkinkan prediksi yang lebih akurat, terutama ketika ada hubungan yang jelas antara variabel-variabel dalam dataset. Hal ini penting dalam konteks model sistem dinamik yang sering melibatkan interaksi antar berbagai elemen dalam suatu sistem yang kompleks.

e. Data Visualization

Data visualization adalah teknik penting dalam pemrosesan data yang digunakan untuk menggambarkan pola, tren, dan hubungan antar variabel dalam bentuk yang mudah dipahami. Dalam konteks sistem dinamik, visualisasi membantu para peneliti dan pengambil keputusan untuk mengidentifikasi dinamika yang terjadi dalam sistem yang sedang dianalisis. Dengan menggunakan alat visualisasi, data yang kompleks dan berjumlah besar dapat disajikan dalam format yang lebih sederhana dan intuitif, memungkinkan untuk mengungkapkan pola yang mungkin sulit terlihat hanya dengan analisis numerik. Sebagai contoh, grafik time-series sering digunakan untuk menggambarkan perubahan suatu variabel sepanjang waktu, seperti pertumbuhan ekonomi atau perubahan populasi, memberikan wawasan langsung tentang fluktuasi dan tren jangka panjang dalam data.

Histogram juga merupakan alat visualisasi yang sangat berguna untuk menggambarkan distribusi data. Histogram memungkinkan peneliti untuk melihat sebaran frekuensi data dalam interval tertentu, yang dapat memberikan informasi tentang kecenderungan pusat (*mean*), sebaran data, serta kemungkinan adanya anomali atau nilai ekstrim (*outlier*). Dalam model sistem dinamik, histogram dapat digunakan untuk memahami distribusi variabel yang memengaruhi perilaku sistem, seperti distribusi umur, pendapatan, atau faktor lingkungan, yang sangat penting dalam analisis prediktif.

C. Validasi Data untuk Simulasi Dinamik

Validasi data adalah proses memastikan bahwa data yang digunakan dalam simulasi sistem dinamik memenuhi standar akurasi, relevansi, dan kualitas. Dalam konteks simulasi dinamik, validasi data menjadi krusial karena keputusan dan hasil yang dihasilkan oleh model bergantung pada integritas data yang diolah. Proses validasi mencakup verifikasi sumber data, pemeriksaan ketepatan, serta pengujian konsistensi untuk mendukung keandalan model simulasi. Validasi data dalam simulasi sistem dinamik memiliki beberapa tujuan utama:

1. Meningkatkan Akurasi Model

Data yang valid membantu meningkatkan akurasi prediksi dan analisis model sistem dinamik. Model yang didasarkan pada data yang valid lebih mampu merepresentasikan sistem nyata.

2. Meningkatkan Kepercayaan Stakeholder

Stakeholder membutuhkan bukti bahwa data yang digunakan dalam simulasi dapat dipercaya. Validasi data memberikan jaminan terhadap integritas model.

3. Mengurangi Bias dan Ketidakkonsistenan

Data yang tidak divalidasi dapat mengandung bias atau kesalahan yang berpotensi merusak hasil simulasi.

4. Mengidentifikasi Kesenjangan Data

Proses validasi membantu menemukan area di mana data tidak mencukupi atau tidak sesuai dengan kebutuhan model

a. Proses Validasi Data untuk Simulasi Dinamik

Proses validasi data melibatkan beberapa langkah sistematis untuk memastikan data memenuhi kriteria kualitas yang ditetapkan:

1) Verifikasi Sumber Data

Langkah pertama dalam validasi adalah memverifikasi bahwa sumber data dapat dipercaya.

2) Pengujian Konsistensi Data

Konsistensi data diuji dengan membandingkan data dari berbagai sumber atau periode waktu.

3) Validasi Statistik

Validasi statistik mencakup pengujian data menggunakan alat analisis statistik.

4) Pengujian Logika dan Realitas

Data harus sesuai dengan logika sistem dan fakta nyata.

b. Teknik Validasi Data dalam Simulasi Dinamik

1) *Cross-Validation*

Cross-validation adalah teknik yang digunakan untuk meningkatkan keandalan dan validitas model dalam simulasi dinamik dengan membagi dataset menjadi dua bagian: satu bagian digunakan untuk membangun model (*training set*) dan bagian lainnya digunakan untuk menguji model (*test set*). Proses ini memungkinkan peneliti untuk memeriksa bagaimana model bekerja pada data yang belum

pernah dilihat sebelumnya, sehingga mengurangi risiko overfitting, yaitu ketika model terlalu cocok dengan data pelatihan sehingga tidak mampu memprediksi data baru dengan baik. Salah satu bentuk yang paling umum dari *cross-validation* adalah *k-fold cross-validation*, di mana dataset dibagi menjadi k bagian yang lebih kecil, dan model dilatih dan diuji k kali, setiap kali menggunakan bagian yang berbeda sebagai data uji.

Proses *cross-validation* memberikan gambaran yang lebih akurat tentang kinerja model karena menguji model pada berbagai subset data yang representatif. Misalnya, jika model simulasi dinamik digunakan untuk memprediksi pola pertumbuhan populasi dalam suatu sistem ekologis, *cross-validation* akan membantu untuk memastikan bahwa model tersebut mampu menggeneralisasi hasil yang akurat di luar data yang digunakan dalam proses pelatihan. Ini penting karena dalam dunia nyata, data yang digunakan untuk membuat prediksi sering kali bervariasi dan tidak dapat sepenuhnya diprediksi hanya dengan data pelatihan yang terbatas.

2) *Data Reconciliation*

Data reconciliation adalah teknik yang digunakan untuk mengharmonisasi data yang berasal dari berbagai sumber yang mungkin memiliki perbedaan atau ketidaksesuaian kecil. Dalam konteks simulasi dinamik, data reconciliation bertujuan untuk memastikan konsistensi dan kesesuaian antara data yang digunakan dalam model dan data yang diperoleh dari berbagai observasi atau pengukuran. Teknik ini sangat penting ketika data berasal dari sistem yang kompleks, di mana beberapa data mungkin tumpang tindih atau saling bertentangan. Misalnya, dalam sistem transportasi dinamik, data lalu lintas yang diperoleh dari sensor jalan raya dapat berbeda-beda tergantung pada lokasi dan waktu pengukuran, dan teknik data reconciliation dapat digunakan untuk mengintegrasikan data tersebut sehingga mencerminkan keadaan yang lebih akurat dan konsisten.

Proses data reconciliation melibatkan pemodelan hubungan antara data yang berbeda dan mencoba menyesuaikan data tersebut agar sesuai dengan parameter sistem yang lebih luas. Teknik ini dapat melibatkan penggunaan algoritma matematika dan statistik untuk menyesuaikan nilai yang tidak konsisten dan menyarankan nilai terbaik yang mungkin. Dalam simulasi dinamik, data reconciliation memastikan bahwa input yang digunakan dalam model berasal dari data yang saling mendukung dan tidak mengandung ketidaksesuaian yang dapat merusak hasil simulasi. Sebagai contoh, dalam model prediksi perubahan iklim, data yang berasal dari satelit dan stasiun cuaca di lapangan mungkin memiliki ketidaksesuaian, dan data reconciliation akan digunakan untuk menghasilkan satu set data yang lebih akurat dan dapat diandalkan.

3) Data Fusion

Data fusion adalah teknik yang digunakan untuk menggabungkan data dari berbagai sumber untuk menghasilkan dataset yang lebih lengkap, akurat, dan konsisten. Dalam konteks simulasi dinamik, data fusion sangat penting untuk memastikan bahwa input yang digunakan dalam model berasal dari berbagai sumber yang saling melengkapi. Sumber data ini bisa berasal dari sensor, sistem informasi, atau pengamatan yang berbeda. Misalnya, dalam model sistem transportasi, data dari sensor jalan raya, satelit, dan laporan kepolisian bisa digabungkan untuk memberikan gambaran yang lebih menyeluruh tentang kondisi lalu lintas yang ada. Proses data fusion menggabungkan informasi yang mungkin saling bertentangan atau tidak lengkap, untuk menghasilkan satu set data yang lebih representatif dan dapat diandalkan.

Proses penggabungan data dalam data fusion dapat dilakukan dengan berbagai pendekatan, seperti penggabungan berbasis waktu, spasial, atau berdasarkan fitur data. Misalnya, dalam sistem pengelolaan air, data yang diperoleh dari berbagai stasiun pemantauan di berbagai lokasi dapat digabungkan untuk menciptakan peta distribusi kualitas air yang lebih akurat. Dalam hal ini, data

fusion mengatasi masalah ketidaklengkapan dan ketidakcocokan data yang sering muncul ketika data berasal dari berbagai sumber yang memiliki resolusi, format, atau waktu pengukuran yang berbeda. Dengan menggabungkan data tersebut secara efisien, kita bisa mendapatkan hasil yang lebih utuh dan lebih representatif dari realitas yang sedang dianalisis.

4) *Sensitivity Analysis*

Analisis sensitivitas adalah teknik yang digunakan untuk menguji sejauh mana perubahan kecil pada input atau parameter dalam model sistem dinamik dapat mempengaruhi hasil simulasi. Dalam simulasi dinamik, perubahan dalam variabel input dapat memiliki dampak yang signifikan pada hasil akhir, terutama dalam sistem yang kompleks dengan banyak interaksi antar elemen. Oleh karena itu, analisis sensitivitas penting untuk memahami hubungan antara variabel input dan output serta untuk mengidentifikasi parameter yang paling mempengaruhi hasil model. Dengan demikian, analisis sensitivitas memungkinkan peneliti untuk mengevaluasi ketahanan model terhadap ketidakpastian data dan mengidentifikasi elemen-elemen yang memerlukan perhatian lebih dalam proses pengumpulan dan pengolahan data.

Pada analisis sensitivitas, teknik yang umum digunakan meliputi metode *One-at-a-Time* (OAT), di mana satu parameter diubah sementara parameter lainnya tetap konstan, serta metode Monte Carlo, yang menguji variasi input berdasarkan distribusi probabilitas. Metode OAT membantu mengidentifikasi parameter yang paling sensitif terhadap perubahan, sedangkan Monte Carlo memungkinkan untuk mengevaluasi ketidakpastian dan variasi yang lebih luas dalam parameter input. Hasil dari analisis sensitivitas dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam tentang model dan membantu mengarahkan upaya untuk meningkatkan akurasi prediksi, mengurangi ketidakpastian, atau memprioritaskan data yang lebih andal.

1. Jelaskan pentingnya pengumpulan data yang terstruktur dan valid dalam proses integrasi data ke dalam model sistem dinamik.
2. Uraikan beberapa teknik pemrosesan data yang sering digunakan dalam integrasi data untuk model sistem dinamik. Bagaimana teknik-teknik ini membantu meningkatkan keakuratan model?
3. Validasi data adalah langkah krusial dalam integrasi data untuk simulasi sistem dinamik. Jelaskan metode yang dapat digunakan untuk memvalidasi data dan tantangan yang dihadapi dalam proses tersebut.
4. Diskusikan bagaimana keterbatasan data dapat memengaruhi integrasi data ke dalam sistem dinamik. Sebutkan pendekatan atau strategi yang dapat digunakan untuk mengatasi masalah ini.
5. Jelaskan pentingnya mempertimbangkan aspek etika dan keamanan dalam pengumpulan, pemrosesan, dan penggunaan data untuk simulasi sistem dinamik.

BAB XI

PERANGKAT LUNAK UNTUK SISTEM DINAMIK

Kemampuan Akhir yang Diharapkan

Mampu memahami terkait dengan pengantar ke perangkat lunak simulasi sistem dinamik, memahami ventana simulation dan alternatifnya, memahami pemilihan perangkat lunak berdasarkan kebutuhan, serta memahami contoh: membuat model dinamik menggunakan ventana simulation, sehingga pembaca dapat memanfaatkan perangkat lunak ini untuk menganalisis sistem yang lebih efektif dan efisien.

Materi Pembelajaran

- Pengantar ke Perangkat Lunak Simulasi Sistem Dinamik
- Ventana Simulation dan Alternatifnya
- Pemilihan Perangkat Lunak Berdasarkan Kebutuhan
- Contoh: Membuat Model Dinamik Menggunakan Ventana Simulation
- Soal Latihan

A. Pengantar ke Perangkat Lunak Simulasi Sistem Dinamik

Perangkat lunak simulasi sistem dinamik adalah alat berbasis komputer yang dirancang untuk membantu pengguna membuat, menjalankan, dan menganalisis model dinamik dari sistem kompleks. Model ini mencakup representasi hubungan antarvariabel dalam bentuk diagram kausal, diagram aliran, atau persamaan diferensial. Fungsi utama perangkat lunak simulasi sistem dinamik mencakup:

1. Pembangunan Model: Menyediakan antarmuka visual dan alat pemrograman untuk merancang struktur sistem dan hubungan antarvariabel.
2. Simulasi: Menjalankan model dalam berbagai skenario untuk memahami dinamika sistem.

3. Analisis Hasil: Menampilkan data dalam bentuk grafik, tabel, atau visualisasi lainnya untuk analisis lebih lanjut.
4. Eksperimen Kebijakan: Menguji dampak berbagai intervensi atau kebijakan terhadap sistem.

Perangkat lunak ini dirancang untuk mempermudah proses iterasi dalam pemodelan, sehingga memungkinkan pengguna untuk terus memperbaiki dan menyempurnakan model.

a. Manfaat Perangkat Lunak Simulasi Sistem Dinamik

- 1) Meningkatkan Pemahaman Sistem Kompleks: Perangkat lunak membantu visualisasi interaksi antarvariabel dalam sistem yang kompleks, seperti dinamika populasi, siklus ekonomi, atau perubahan lingkungan.
- 2) Dukungan untuk Pengambilan Keputusan: Dengan menggunakan simulasi, pengambil keputusan dapat mengevaluasi dampak dari berbagai kebijakan tanpa perlu menerapkannya di dunia nyata, sehingga mengurangi risiko.
- 3) Efisiensi Waktu dan Biaya: Proses simulasi memungkinkan analisis skenario yang cepat dan hemat biaya dibandingkan eksperimen langsung.
- 4) Kolaborasi Antarbidang: Perangkat lunak sistem dinamik sering digunakan dalam kolaborasi lintas disiplin, misalnya dalam penelitian perubahan iklim yang melibatkan ahli lingkungan, ekonom, dan insinyur.

b. Fitur Utama Perangkat Lunak Simulasi Sistem Dinamik

- 1) Antarmuka Pengguna: Sebagian besar perangkat lunak menyediakan antarmuka pengguna yang intuitif, seperti editor diagram dan modul analisis hasil.
- 2) Library Komponen: Perangkat lunak sering kali menyediakan library komponen yang dapat digunakan kembali, seperti fungsi matematika, variabel waktu, dan modul analisis sensitivitas.
- 3) Visualisasi Dinamis: Output model dapat divisualisasikan dalam bentuk grafik, animasi, atau peta interaktif, yang mempermudah analisis hasil.
- 4) Kemampuan Integrasi: Perangkat lunak seperti AnyLogic mendukung integrasi dengan bahasa pemrograman lain, seperti Python atau R, untuk analisis lanjutan.

B. Ventana Simulation dan Alternatifnya

Pada dunia simulasi sistem dinamik, *Ventana Simulation* yang lebih dikenal melalui perangkat lunaknya, Vensim, merupakan salah satu alat yang paling populer dan andal. Selain Vensim, ada banyak perangkat lunak alternatif yang digunakan untuk simulasi sistem dinamik dengan fokus dan keunggulan berbeda-beda.

1. Vensim: Perangkat Lunak dari Ventana Systems

Vensim adalah perangkat lunak simulasi sistem dinamik yang dikembangkan oleh Ventana Systems. Perangkat ini dirancang untuk membantu pengguna membangun, mensimulasikan, menganalisis, dan memvalidasi model sistem dinamik. Keunggulan Utama Vensim:

- a. Kemudahan Penggunaan: Antarmuka berbasis diagram aliran dan variabel yang intuitif.
- b. Analisis Sensitivitas: Memungkinkan pengguna untuk mengevaluasi sensitivitas model terhadap parameter tertentu.
- c. Validasi Model: Menyediakan alat untuk mendeteksi kesalahan dalam model dan memvalidasi keandalannya.
- d. Fleksibilitas: Mendukung pembangunan model sederhana hingga kompleks.

Vensim adalah perangkat lunak yang dikembangkan oleh Ventana Systems untuk membangun dan mensimulasikan model sistem dinamik. Perangkat lunak ini digunakan secara luas dalam berbagai bidang, mulai dari kebijakan publik hingga ekonomi, kesehatan, dan lingkungan. Dengan kemampuannya untuk mengembangkan model berbasis umpan balik dan stok, Vensim memungkinkan pengguna untuk memahami dan memprediksi perilaku kompleks dalam sistem dinamik yang melibatkan berbagai elemen yang saling berinteraksi. Salah satu keunggulan utama Vensim adalah kemampuannya untuk menangani model dengan kompleksitas tinggi, termasuk model yang melibatkan berbagai tingkat interaksi dan ketergantungan waktu yang panjang (Åström & Murray, 2021).

Sebagai contoh dalam bidang kesehatan, Vensim telah digunakan untuk mensimulasikan penyebaran penyakit menular dan mengevaluasi dampak dari berbagai intervensi kesehatan. Dengan

menggunakan Vensim, peneliti dapat melihat bagaimana kebijakan tertentu dapat memperlambat penyebaran penyakit, serta memperkirakan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai herd immunity. Kemampuan ini memungkinkan pembuat kebijakan untuk membuat keputusan yang lebih baik berdasarkan simulasi yang akurat dan berbasis data.

1) Vensim PLE (*Personal Learning Edition*)

Vensim PLE (*Personal Learning Edition*) adalah versi gratis dari perangkat lunak Vensim yang dirancang khusus untuk tujuan pendidikan dan pembelajaran. Diperkenalkan oleh Ventana Systems, Vensim PLE memberikan akses kepada mahasiswa, pengajar, dan individu yang tertarik untuk memahami sistem dinamik tanpa biaya lisensi yang tinggi. Meskipun fitur yang tersedia dalam Vensim PLE lebih terbatas dibandingkan dengan versi komersialnya, versi ini tetap menyediakan banyak alat yang diperlukan untuk membangun dan mensimulasikan model sistem dinamik yang sederhana hingga kompleks. Dengan demikian, Vensim PLE memungkinkan pengguna untuk mengembangkan keterampilan dalam menggunakan perangkat lunak ini dan menerapkan konsep-konsep sistem dinamik dalam berbagai disiplin ilmu.

2) Vensim DSS (*Decision Support System*)

Vensim DSS (*Decision Support System*) adalah versi berbayar dari perangkat lunak Vensim yang menawarkan berbagai fitur lanjutan untuk mendukung analisis sistem dinamik dalam pengambilan keputusan yang lebih kompleks. Dikhususkan untuk profesional dan organisasi, Vensim DSS dilengkapi dengan alat dan fungsionalitas tambahan yang memungkinkan pengguna untuk membangun model yang lebih detail dan melakukan simulasi yang lebih mendalam. Salah satu fitur utamanya adalah kemampuan untuk melakukan pemrograman optimasi, yang memungkinkan pengguna untuk mengidentifikasi solusi terbaik dari berbagai skenario yang ada berdasarkan tujuan tertentu, seperti minimisasi biaya atau maksimisasi keuntungan dalam konteks bisnis atau kebijakan.

2. Alternatif Perangkat Lunak untuk Simulasi Sistem Dinamik

a. Stella Architect

Pengembang: isee systems

Keunggulan:

- 1) Menawarkan antarmuka visual yang menarik untuk membangun model sistem dinamik.
- 2) Mendukung pembelajaran interaktif dengan fitur simulasi waktu nyata.
- 3) Cocok untuk pendidikan dan pelatihan di bidang manajemen dan kebijakan.

Stella Architect adalah perangkat lunak sistem dinamik yang sangat populer, terutama di bidang pendidikan dan analisis kebijakan. Aplikasi ini banyak digunakan dalam berbagai disiplin ilmu, seperti ekologi, ekonomi, dan manajemen. Salah satu contohnya adalah studi oleh Sterman (2002) yang menggunakan Stella untuk menggambarkan dinamika siklus ekonomi dalam konteks pembelajaran interaktif. Dengan antarmuka yang ramah pengguna, Stella memungkinkan mahasiswa dan praktisi untuk dengan mudah membangun dan mensimulasikan model sistem dinamik yang kompleks tanpa memerlukan keterampilan pemrograman yang mendalam. Hal ini menjadikannya alat yang ideal untuk pengajaran konsep-konsep dasar dalam sistem dinamik, seperti umpan balik positif dan negatif, serta konsep stok dan aliran.

b. AnyLogic

Pengembang: AnyLogic Company

Keunggulan:

- 1) Mendukung berbagai pendekatan simulasi, termasuk berbasis agen, diskret, dan dinamik.
- 2) Dapat diintegrasikan dengan big data dan bahasa pemrograman seperti Python.
- 3) Mendukung simulasi berbasis cloud untuk kolaborasi global.

AnyLogic adalah perangkat lunak simulasi yang digunakan untuk membangun model dinamik dalam berbagai domain, terutama dalam logistik, manajemen rantai pasokan, dan transportasi. Salah satu aplikasi utamanya adalah optimasi proses

pengiriman dan distribusi barang. Dengan menggunakan AnyLogic, para peneliti dapat menciptakan model simulasi yang mereplikasi proses distribusi yang rumit, mengidentifikasi variabel-variabel kunci yang mempengaruhi efisiensi pengiriman, dan menguji berbagai skenario untuk menemukan solusi terbaik yang mengurangi biaya dan waktu pengiriman (Bauer *et al.*, 2019).

c. Powersim Studio

Pengembang: Powersim Software

Keunggulan:

- 1) Fokus pada simulasi bisnis dan analisis proyek.
- 2) Mendukung integrasi data real-time untuk analisis operasional.

Powersim Studio adalah perangkat lunak simulasi yang banyak digunakan dalam berbagai bidang, termasuk manajemen proyek, untuk memahami dan memprediksi dinamika sumber daya dan jadwal proyek. Dalam konteks manajemen proyek, Powersim memungkinkan para manajer untuk membangun model yang mensimulasikan berbagai variabel yang mempengaruhi jalannya proyek, seperti alokasi sumber daya, waktu, biaya, dan risiko. Dengan menggunakan Powersim, manajer proyek dapat mengevaluasi berbagai skenario dan strategi pengelolaan proyek untuk memaksimalkan efisiensi dan mengurangi potensi masalah yang mungkin muncul.

d. Insight Maker

Pengembang: InsightMaker.com

Keunggulan:

- 1) Perangkat lunak berbasis web yang gratis dan open source.
- 2) Mudah digunakan untuk simulasi sederhana tanpa instalasi perangkat lunak.

Insight Maker adalah perangkat lunak simulasi berbasis web yang sangat populer digunakan dalam pendidikan dan penelitian eksploratif. Dengan antarmuka yang sederhana dan ramah pengguna, Insight Maker memungkinkan para pengguna, baik pemula maupun profesional, untuk membangun model sistem dinamik dan simulasi tanpa memerlukan keterampilan pemrograman yang mendalam. Aplikasi ini sangat cocok untuk digunakan dalam pendidikan, terutama dalam memahami konsep-konsep dasar dinamika sistem dan keterkaitan antar elemen dalam

sistem kompleks. Hal ini membuatnya menjadi alat yang ideal untuk mengajarkan mahasiswa atau pelajar mengenai cara kerja sistem dinamik dengan cara yang interaktif dan mudah diakses.

e. Simulink (MATLAB)

Pengembang: MathWorks

Keunggulan:

- 1) Cocok untuk simulasi berbasis persamaan diferensial.
- 2) Banyak digunakan dalam simulasi teknik dan fisika.

Simulink, yang merupakan bagian dari perangkat lunak MATLAB, adalah alat simulasi yang digunakan secara luas dalam desain sistem kontrol dan simulasi dinamik teknik mesin. Dengan antarmuka berbasis blok diagram, Simulink memungkinkan insinyur dan peneliti untuk merancang, memodelkan, dan mensimulasikan sistem dinamik yang kompleks dalam berbagai disiplin ilmu, terutama dalam bidang teknik. Aplikasi utamanya termasuk merancang sistem kontrol untuk berbagai aplikasi, mulai dari kendaraan otonom hingga sistem kendali pesawat terbang. Dalam konteks teknik mesin, Simulink membantu para insinyur merancang dan menguji model-model dinamik untuk berbagai sistem mekanik, seperti mesin, kendaraan, dan robot.

C. Pemilihan Perangkat Lunak Berdasarkan Kebutuhan

Pemilihan perangkat lunak yang tepat untuk simulasi sistem dinamik sangat penting karena dapat memengaruhi efisiensi proses pemodelan, akurasi hasil, dan produktivitas pengguna. Pemilihan ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti tujuan model, tingkat kompleksitas sistem, keahlian pengguna, anggaran, serta kebutuhan spesifik seperti integrasi data atau visualisasi.

1. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Pemilihan Perangkat Lunak

a. Kompleksitas Model

Kompleksitas sistem yang akan dimodelkan menjadi salah satu pertimbangan utama. Perangkat lunak seperti AnyLogic dan Simulink cocok untuk model yang kompleks dengan interaksi multidimensional, sedangkan perangkat lunak seperti Vensim

PLE atau Insight Maker lebih sesuai untuk model sederhana atau pendidikan.

b. Tujuan Model

Tujuan model misalnya analisis kebijakan, peramalan, atau optimasi operasional mempengaruhi pilihan perangkat lunak.

- 1) Stella Architect: Ideal untuk pendidikan dan pelatihan karena menyediakan visualisasi intuitif dan pembelajaran interaktif.
- 2) Powersim Studio: Dirancang untuk analisis bisnis dan manajemen proyek.
- 3) Simulink: Digunakan untuk simulasi berbasis persamaan diferensial, sering digunakan di bidang teknik.

c. Tingkat Keahlian Pengguna

Keahlian pengguna menentukan perangkat lunak yang dapat digunakan secara efektif.

- 1) Pengguna Pemula: Perangkat lunak seperti Stella Architect dan Vensim PLE menawarkan antarmuka intuitif.
- 2) Pengguna Ahli: AnyLogic atau Simulink memungkinkan analisis yang lebih kompleks namun membutuhkan pemahaman pemrograman.

d. Biaya dan Lisensi

Biaya lisensi sering menjadi kendala, terutama bagi lembaga pendidikan atau organisasi dengan anggaran terbatas.

- 1) Alternatif Gratis: Insight Maker dan Vensim PLE.
- 2) Perangkat Berbayar: Stella Architect, AnyLogic, dan Powersim Studio.

e. Kemampuan Integrasi Data

Kemampuan perangkat lunak untuk mengintegrasikan data eksternal, seperti data real-time atau big data, menjadi penting dalam aplikasi tertentu.

- 1) AnyLogic mendukung integrasi data besar dan simulasi berbasis cloud.
- 2) Vensim DSS memungkinkan integrasi data eksternal melalui fitur data import.

2. Tahapan Pemilihan Perangkat Lunak

a. Analisis Kebutuhan

Langkah pertama adalah menganalisis kebutuhan spesifik dari proyek atau organisasi. Hal ini mencakup:

- 1) Identifikasi tujuan simulasi.
 - 2) Penentuan kompleksitas sistem.
 - 3) Penilaian keahlian tim pengguna.
- b. Evaluasi Fitur Perangkat Lunak
- Membandingkan fitur utama perangkat lunak, seperti antarmuka pengguna, kemampuan simulasi, visualisasi, dan analisis data.
- 1) Visualisasi: Stella Architect unggul dalam penyajian visual.
 - 2) Simulasi Multimode: AnyLogic mendukung simulasi berbasis agen, diskret, dan dinamik.
- c. Uji Coba dan Demonstrasi
- Sebagian besar perangkat lunak menyediakan versi uji coba atau demo. Pengguna dapat mencoba berbagai perangkat lunak untuk menilai kecocokan dengan kebutuhan.
- d. Dukungan Teknis dan Komunitas
- Dukungan teknis dari pengembang perangkat lunak dan komunitas pengguna dapat membantu memecahkan masalah teknis atau memahami fitur tertentu.
- 1) Vensim dan Stella: Memiliki komunitas akademik yang kuat.
 - 2) AnyLogic: Dukungan teknis profesional tersedia, namun lebih mahal.

D. Contoh: Membuat Model Dinamik Menggunakan Ventana Simulation

Vensim adalah perangkat lunak yang banyak digunakan untuk memodelkan sistem dinamik. Dikembangkan oleh Ventana Systems, Vensim menawarkan berbagai fitur untuk membuat model sistem kompleks, seperti simulasi berbasis persamaan, analisis sensitivitas, dan validasi model.

1. Langkah-Langkah Membuat Model Dinamik di Vensim

- a. Menentukan Tujuan Model

Langkah pertama adalah menentukan tujuan model. Dalam kasus ini, tujuan adalah memahami bagaimana faktor kelahiran, kematian, dan kapasitas lingkungan memengaruhi populasi.

b. Menentukan Variabel

Variabel dibagi menjadi:

- 1) Stock (Stok): Variabel akumulatif, seperti populasi.
- 2) Flow (Aliran): Perubahan dalam stok, seperti kelahiran dan kematian.
- 3) Auxiliary (Pendukung): Variabel tambahan yang membantu menghitung aliran, seperti laju kelahiran.

c. Menggambar Diagram Model

Vensim menyediakan alat untuk menggambar diagram kausal.

Langkah-langkah:

- 1) Tambahkan Stok: Tambahkan stok *Population*.
- 2) Tambahkan Aliran: Hubungkan stok dengan aliran *Birth Rate* (laju kelahiran) dan *Death Rate* (laju kematian).
- 3) Tambahkan Auxiliary: Masukkan variabel seperti *Birth Fraction* dan *Death Fraction*.
- 4) Hubungkan Variabel: Buat koneksi kausal antara variabel.

d. Menambahkan Persamaan Matematika

Setiap aliran dan stok diberi persamaan:

- 1) $Birth Rate = Population \times Birth Fraction$
- 2) $Death Rate = Population \times Death Fraction$
- 3) $Population(t) = Population(t-1) + (Birth Rate - Death Rate)$

e. Menentukan Parameter Awal

Masukkan parameter seperti:

- 1) Populasi awal: 1000.
- 2) *Birth Fraction*: 0,02 (2%).
- 3) *Death Fraction*: 0,01 (1%).

f. Menjalankan Simulasi

Setelah diagram selesai dan parameter ditentukan, simulasi dapat dijalankan untuk periode tertentu, misalnya 50 tahun.

2. Studi Kasus: Langkah Praktis di Vensim

a. Membuka Vensim PLE

Unduh dan instal Vensim PLE dari situs resmi. Buka program dan buat proyek baru.

b. Membuat Diagram Alur

- 1) Pilih ikon stok dan tambahkan variabel *Population*.
 - 2) Pilih ikon aliran, tambahkan *Birth Rate* dan *Death Rate*.
 - 3) Hubungkan stok dengan aliran menggunakan panah kausal.
 - 4) Tambahkan variabel pendukung *Birth Fraction* dan *Death Fraction*.
- c. Menambahkan Persamaan
- Klik dua kali pada setiap variabel untuk memasukkan persamaan. Gunakan editor persamaan untuk mendefinisikan hubungan antar variabel.
- d. Simulasi dan Visualisasi Hasil
- 1) Jalankan simulasi untuk periode 50 tahun.
 - 2) Lihat hasil dalam bentuk grafik. Grafik populasi menunjukkan bagaimana populasi tumbuh hingga mencapai kapasitas lingkungan tertentu.

3. Analisis Model

- a. Analisis Sensitivitas
- Gunakan fitur *Sensitivity Testing* untuk melihat bagaimana perubahan parameter memengaruhi hasil. Misalnya:
- 1) Jika *Birth Fraction* meningkat menjadi 0,03, populasi tumbuh lebih cepat.
 - 2) Jika *Death Fraction* meningkat menjadi 0,02, populasi menurun lebih cepat.
- b. Validasi Model
- Pastikan model realistis dengan membandingkan hasil simulasi dengan data historis atau literatur terkait.

E. Soal Latihan

1. Jelaskan peran perangkat lunak simulasi dalam pengembangan model sistem dinamik!
2. Bandingkan fitur utama dari perangkat lunak Vensim, Stella Architect, dan AnyLogic dalam konteks sistem dinamik!
3. Apa saja faktor yang harus dipertimbangkan saat memilih perangkat lunak untuk proyek sistem dinamik tertentu?
4. Dalam konteks akademik, perangkat lunak apa yang paling cocok untuk pembelajaran sistem dinamik? Berikan alasannya.

5. Bagaimana cara memvalidasi hasil simulasi yang dihasilkan oleh perangkat lunak seperti Vensim?

BAB XII

STUDI EVALUASI KINERJA SISTEM DINAMIK

Kemampuan Akhir yang Diharapkan

Mampu memahami terkait dengan indikator kinerja model sistem dinamik, serta memahami teknik evaluasi hasil simulasi, sehingga pembaca dapat memiliki keterampilan dalam memancarkan kinerja model sistem dinamis dan menganalisis hasil simulasi dengan berbagai teknik yang memungkinkan untuk memperbaiki model dan memastikan bahwa hasil simulasi mendukung tujuan pengambilan keputusan yang lebih baik.

Materi Pembelajaran

- Indikator Kinerja Model Sistem Dinamik
- Teknik Evaluasi Hasil Simulasi
- Soal Latihan

A. Indikator Kinerja Model Sistem Dinamik

Indikator kinerja model adalah metrik atau parameter yang digunakan untuk mengevaluasi bagaimana model simulasi dinamik beroperasi dan sejauh mana hasilnya sesuai dengan tujuan pemodelan. Indikator ini membantu:

1. Validasi model: Memastikan bahwa model mencerminkan sistem nyata berdasarkan data historis.
2. Verifikasi model: Memastikan bahwa logika dan algoritma dalam model bebas dari kesalahan.
3. Optimasi kebijakan: Mengidentifikasi langkah strategis berdasarkan simulasi untuk meningkatkan performa sistem.

Literatur terbaru menekankan bahwa indikator kinerja harus mencakup aspek kuantitatif dan kualitatif untuk mendapatkan hasil evaluasi yang komprehensif (Stermann, 2002).

a. Keakuratan Model (*Accuracy*)

Keakuratan menunjukkan sejauh mana hasil model cocok dengan data historis atau sistem nyata. Indikator keakuratan meliputi:

1) *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE)

- Rumus:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right| \times 100$$

- MAPE digunakan untuk menilai perbedaan antara nilai aktual (Y_i) dan nilai model ($\hat{Y}_i$) sebagai persentase.

2) *Root Mean Square Error* (RMSE)

- Rumus:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}}$$

- Mengukur penyimpangan rata-rata antara prediksi model dan data aktual.

3) *Theil's Inequality Coefficient*

- Mengukur kesalahan relatif antara prediksi model dan data aktual, dengan nilai 0 menunjukkan performa sempurna.

b. Stabilitas Model (*Stability*)

Stabilitas mengukur kemampuan model untuk memberikan hasil yang konsisten ketika parameter tertentu dimodifikasi dalam batas yang wajar.

1) *Sensitivity Analysis*

Analisis sensitivitas adalah teknik yang digunakan untuk mengukur bagaimana perubahan kecil dalam input data dapat mempengaruhi hasil dari suatu model. Dalam konteks model sistem dinamik, analisis sensitivitas memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi variabel mana yang memiliki dampak terbesar terhadap perilaku sistem. Hal ini sangat penting dalam menguji stabilitas model, karena memberikan wawasan mengenai ketahanan model terhadap variasi input. Sebagai contoh, dalam model yang mensimulasikan pertumbuhan ekonomi, analisis

sensitivitas dapat mengungkapkan bagaimana perubahan tingkat investasi atau tingkat pengangguran memengaruhi hasil jangka panjang seperti PDB atau tingkat inflasi.

Metode analisis sensitivitas biasanya dilakukan dengan mengubah satu variabel input pada suatu waktu, lalu mengamati bagaimana hasil model berubah. Jika perubahan kecil dalam input menghasilkan fluktuasi yang besar dalam output, ini menandakan bahwa model tersebut sensitif terhadap variabel tersebut dan mungkin tidak stabil. Sebaliknya, jika perubahan input tidak mengubah hasil secara signifikan, model dianggap lebih stabil dan mungkin lebih robust terhadap variasi data. Dalam sistem yang kompleks, memahami sensitivitas ini sangat krusial karena dapat membantu merancang kebijakan atau keputusan yang lebih aman dan lebih dapat diprediksi.

2) *Dynamic Stability Metrics*

Metrik stabilitas dinamik digunakan untuk menilai apakah suatu sistem dinamik dapat mencapai keseimbangan dalam jangka waktu tertentu setelah mengalami gangguan atau perubahan input. Dalam konteks model sistem dinamik, stabilitas mengacu pada kemampuan sistem untuk kembali ke keadaan keseimbangan setelah adanya fluktuasi atau gangguan eksternal. Metrik ini sangat penting untuk memastikan bahwa model yang dibangun menggambarkan perilaku sistem yang realistis dan dapat diprediksi, terutama ketika digunakan untuk meramalkan hasil atau mendukung pengambilan keputusan dalam jangka panjang. Sebagai contoh, dalam model yang mensimulasikan sistem ekologi atau ekonomi, metrik stabilitas dinamik dapat membantu menilai apakah sistem tersebut akan tetap stabil atau justru mengalami kehancuran setelah terjadi perubahan besar seperti kebijakan pemerintah atau bencana alam.

c. Efisiensi Model (*Efficiency*)

Efisiensi berfokus pada sumber daya yang digunakan untuk menjalankan simulasi, termasuk waktu komputasi dan kompleksitas algoritma.

1) *Runtime Efficiency*

Runtime efficiency adalah salah satu aspek penting dalam penilaian performa model sistem dinamik. Metrik ini mengukur waktu yang dibutuhkan untuk menjalankan simulasi model di berbagai skenario atau kondisi, yang sangat berpengaruh terutama pada model-model besar atau kompleks. Dalam banyak aplikasi, seperti perencanaan kebijakan, optimisasi rantai pasokan, atau simulasi ekologi, simulasi yang cepat dan efisien sangat penting untuk mendukung pengambilan keputusan yang tepat waktu. Waktu eksekusi yang lama dapat membatasi kemampuan pengguna untuk menjalankan simulasi dalam jumlah besar atau menguji berbagai alternatif keputusan secara cepat. Oleh karena itu, memahami dan meningkatkan efisiensi waktu sangat penting dalam pengembangan model.

Untuk meningkatkan *runtime efficiency*, beberapa teknik dapat diterapkan, seperti penggunaan algoritma numerik yang lebih efisien, optimasi kode, atau pembatasan jumlah variabel yang diproses dalam setiap iterasi simulasi. Salah satu teknik yang sering digunakan adalah pengurangan skala waktu (*time scaling*), di mana model disederhanakan dengan mengurangi resolusi waktu untuk mempercepat proses simulasi. Namun, pengurangan skala waktu ini harus dilakukan dengan hati-hati agar tidak mengorbankan akurasi hasil simulasi. Selain itu, komputasi paralel atau penggunaan perangkat keras yang lebih kuat, seperti unit pemrosesan grafis (GPU), juga dapat membantu mempercepat runtime dengan membagi proses perhitungan ke dalam banyak unit pemrosesan secara bersamaan.

2) *Computational Resource Usage*

Penggunaan sumber daya komputasi (*computational resource usage*) adalah metrik penting dalam menilai efisiensi model sistem dinamik, terutama dalam konteks model yang kompleks atau besar. Penggunaan sumber daya ini mencakup kapasitas memori (RAM) dan prosesor (CPU) yang diperlukan untuk menjalankan simulasi model. Dalam model yang melibatkan banyak variabel atau data besar, kebutuhan sumber daya komputasi bisa meningkat

secara signifikan, yang dapat mempengaruhi kinerja dan waktu eksekusi simulasi. Oleh karena itu, memahami penggunaan sumber daya ini sangat penting untuk memastikan bahwa model dapat dijalankan secara efektif tanpa membebani sistem komputer, terutama dalam aplikasi yang memerlukan simulasi berulang atau real-time. Untuk meningkatkan penggunaan sumber daya komputasi, berbagai teknik dapat diterapkan. Salah satunya adalah optimasi algoritma, di mana algoritma yang digunakan dalam model diperbaiki agar lebih efisien dalam memanfaatkan memori dan prosesor. Pengurangan kompleksitas model, seperti mengurangi jumlah parameter yang dihitung atau menyederhanakan hubungan antar variabel, juga dapat mengurangi kebutuhan sumber daya. Selain itu, teknik komputasi paralel, di mana proses komputasi dibagi menjadi beberapa tugas yang dapat dijalankan secara bersamaan, dapat mempercepat waktu eksekusi dan mengurangi beban pada satu unit prosesor. Penggunaan perangkat keras yang lebih kuat, seperti prosesor multi-core atau kartu grafis (GPU), juga dapat membantu meningkatkan efisiensi pemrosesan.

d. Relevansi dan Kebijakan (*Policy Relevance*)

Indikator ini mengevaluasi apakah hasil model memberikan wawasan yang relevan bagi pengambil keputusan. Contohnya:

1) *Policy Sensitivity*

Sensitivitas kebijakan (*policy sensitivity*) adalah salah satu aspek penting dalam menilai relevansi kebijakan dari model sistem dinamik. Konsep ini merujuk pada sejauh mana model merespons perubahan dalam kebijakan yang diterapkan. Dalam konteks kebijakan publik, perubahan kebijakan dapat mempengaruhi dinamika sistem secara signifikan, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Oleh karena itu, model yang baik harus mampu mengidentifikasi dan mensimulasikan dampak perubahan kebijakan terhadap sistem yang dianalisis, baik itu dalam bidang ekonomi, kesehatan, lingkungan, atau sektor lainnya. Sebagai contoh, dalam model sistem dinamik yang digunakan untuk mengkaji kebijakan fiskal, sensitivitas

kebijakan akan menunjukkan bagaimana perubahan tingkat pajak atau pengeluaran pemerintah mempengaruhi variabel ekonomi seperti pertumbuhan ekonomi, pengangguran, atau inflasi.

Untuk mengukur sensitivitas kebijakan, model harus dirancang sedemikian rupa agar dapat menangkap interaksi yang kompleks antara berbagai variabel dalam sistem. Model yang dapat menunjukkan respons dinamis terhadap kebijakan yang diterapkan akan lebih berguna dalam memberikan wawasan bagi pembuat kebijakan. Misalnya, dalam simulasi yang melibatkan kebijakan lingkungan, model yang sensitif terhadap perubahan dalam regulasi emisi atau kebijakan pengelolaan sumber daya alam akan memberikan informasi yang penting tentang efektivitas kebijakan tersebut dalam mengurangi dampak lingkungan atau mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan.

2) Scenario Analysis

Analisis skenario adalah pendekatan penting dalam evaluasi kebijakan yang memungkinkan peneliti untuk membahas berbagai kemungkinan hasil dengan mengubah kondisi awal dan variabel input dalam model sistem dinamik. Dalam konteks kebijakan, analisis skenario digunakan untuk menguji dampak dari berbagai pilihan kebijakan atau peristiwa yang tidak pasti, serta untuk memahami bagaimana sistem dapat bereaksi terhadap perubahan dalam kondisi eksternal atau kebijakan yang diterapkan. Dengan menggunakan analisis skenario, pembuat kebijakan dapat mengidentifikasi potensi risiko dan peluang yang dapat terjadi di masa depan, serta mempersiapkan diri untuk menghadapi ketidakpastian.

Dengan analisis skenario, model dapat mensimulasikan berbagai hipotesis kebijakan dengan mengubah satu atau lebih variabel kunci, seperti tingkat pajak, pengeluaran publik, atau kebijakan lingkungan. Hasil dari simulasi ini memberikan wawasan mengenai bagaimana kebijakan yang berbeda dapat mempengaruhi hasil sistem dalam berbagai konteks. Misalnya, dalam analisis skenario kebijakan perubahan iklim, model dapat mensimulasikan

dampak dari berbagai kebijakan pengurangan emisi gas rumah kaca dan melihat bagaimana skenario yang berbeda memengaruhi suhu global, pertumbuhan ekonomi, atau kesejahteraan sosial.

B. Teknik Evaluasi Hasil Simulasi

Evaluasi hasil simulasi adalah proses untuk menilai keakuratan, relevansi, dan kegunaan hasil simulasi dalam konteks sistem dinamik yang dibangun. Tujuan utama dari evaluasi ini adalah untuk memastikan bahwa model yang dikembangkan dapat merepresentasikan perilaku sistem yang sebenarnya, serta untuk mengevaluasi dampak kebijakan atau perubahan variabel dalam sistem tersebut. Evaluasi dilakukan melalui beberapa teknik yang dapat mengukur kesesuaian antara hasil simulasi dan realitas, serta mengevaluasi efektivitas kebijakan yang diuji.

Menurut Sterman (2002), evaluasi hasil simulasi sangat penting dalam konteks model sistem dinamik karena model ini sering digunakan untuk merancang kebijakan atau prediksi jangka panjang yang memerlukan akurasi tinggi dan relevansi dalam konteks dunia nyata. Berikut adalah beberapa teknik evaluasi hasil simulasi yang sering digunakan dalam studi sistem dinamik.

1. Validasi dan Verifikasi Model

Validasi Model adalah proses untuk memastikan bahwa model yang dibangun merepresentasikan sistem nyata dengan tepat. Indikator utama dalam validasi model adalah keakuratan hasil simulasi dalam merepresentasikan data dunia nyata. Teknik validasi ini dapat menggunakan metrik seperti *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) atau *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk menilai kesalahan antara hasil simulasi dan data aktual. Validasi dapat dilakukan melalui dua pendekatan utama:

a. Validasi Data Historis

Validasi data historis adalah proses penting dalam verifikasi model simulasi, di mana hasil simulasi model dibandingkan dengan data historis yang telah diketahui kebenarannya. Tujuan utama dari validasi ini adalah untuk menilai seberapa akurat model dalam merepresentasikan perilaku sistem yang

sebenarnya dalam periode waktu tertentu. Misalnya, dalam model sistem dinamik yang digunakan untuk memprediksi pertumbuhan ekonomi, data historis seperti PDB (Produk Domestik Bruto) atau tingkat pengangguran dapat digunakan untuk melihat apakah model dapat mereproduksi tren dan pola yang ada dalam data tersebut.

b. Validasi dengan Pengalaman Ahli

Validasi dengan pengalaman ahli adalah metode penting dalam proses validasi model, di mana pakar atau profesional yang berpengalaman dalam bidang terkait dilibatkan untuk menilai sejauh mana hasil model mencerminkan pemahaman tentang sistem yang dimodelkan. Proses ini penting karena model simulasi, meskipun didasarkan pada data dan teori, mungkin tidak sepenuhnya menangkap kompleksitas dan dinamika sistem yang sesungguhnya. Dalam hal ini, pengetahuan praktis yang dimiliki oleh ahli sangat berguna untuk mengevaluasi apakah hasil simulasi sesuai dengan pengalaman dunia nyata atau praktik terbaik yang berlaku di lapangan.

2. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas adalah teknik yang digunakan untuk mengevaluasi bagaimana perubahan kecil pada parameter input model dapat mempengaruhi hasil simulasi. Teknik ini digunakan untuk mengidentifikasi parameter yang paling berpengaruh terhadap perilaku model dan untuk menilai sejauh mana model stabil terhadap variasi input. Beberapa teknik analisis sensitivitas yang digunakan dalam sistem dinamik termasuk:

a. *One-way Sensitivity Analysis*

One-way Sensitivity Analysis adalah metode yang digunakan untuk menilai dampak perubahan satu parameter input terhadap output model. Proses ini melibatkan pengubahan nilai satu variabel input pada satu waktu, sementara variabel lainnya tetap konstan. Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengidentifikasi seberapa sensitif hasil model terhadap perubahan dalam variabel tersebut. Dalam konteks sistem dinamik, hal ini sangat penting untuk mengetahui variabel mana yang memiliki pengaruh terbesar terhadap perilaku sistem, sehingga dapat mengarahkan fokus penelitian atau pengambilan keputusan.

Prosedur *One-way Sensitivity Analysis* dimulai dengan memilih parameter input yang dianggap krusial untuk model, seperti tingkat pertumbuhan populasi, tingkat inflasi, atau variabel ekonomi lainnya. Nilai parameter tersebut kemudian dimodifikasi dalam rentang yang realistis, dan hasil output model diamati untuk setiap perubahan. Misalnya, dalam model pengelolaan sumber daya alam, perubahan dalam tingkat konsumsi sumber daya dapat dianalisis untuk melihat bagaimana hal tersebut memengaruhi keberlanjutan ekosistem atau hasil ekonomi. Dengan memeriksa output untuk berbagai nilai parameter, peneliti dapat menentukan sensitivitas model terhadap perubahan dalam parameter tersebut.

b. *Multi-way Sensitivity Analysis*

Multi-way Sensitivity Analysis adalah metode yang digunakan untuk menguji dampak perubahan beberapa parameter input secara simultan terhadap output model. Berbeda dengan *one-way sensitivity analysis*, yang hanya mengubah satu parameter pada satu waktu, pendekatan ini melibatkan modifikasi berbagai parameter sekaligus untuk memahami bagaimana interaksi antar variabel memengaruhi hasil simulasi. Dalam sistem dinamik, banyak faktor yang saling terkait, dan perubahan dalam satu parameter mungkin mempengaruhi parameter lainnya. Oleh karena itu, menganalisis beberapa parameter secara bersamaan memberikan gambaran yang lebih lengkap mengenai kompleksitas hubungan dalam model.

Langkah pertama dalam *multi-way sensitivity analysis* adalah memilih beberapa parameter yang diperkirakan memiliki pengaruh signifikan terhadap output model. Misalnya, dalam model ekonomi, parameter seperti tingkat pengangguran, inflasi, dan suku bunga mungkin saling berinteraksi dan memengaruhi pertumbuhan ekonomi. Peneliti kemudian akan mengubah nilai parameter-parameter tersebut dalam berbagai kombinasi dan mengamati dampaknya terhadap hasil model. Dengan menggunakan teknik seperti desain eksperimen atau metode Monte Carlo, peneliti dapat memetakan bagaimana variasi dalam beberapa parameter secara bersamaan memengaruhi output sistem.

c. Monte Carlo Simulation

Monte Carlo Simulation adalah teknik analisis sensitivitas yang digunakan untuk mengevaluasi ketidakpastian dalam model dengan mensimulasikan berbagai skenario berdasarkan distribusi probabilitas dari parameter input. Berbeda dengan pendekatan deterministik yang hanya mengandalkan satu set nilai parameter, Monte Carlo menggunakan sampling acak untuk menghasilkan banyak kemungkinan hasil dari simulasi. Proses ini melibatkan pengulangan simulasi model dengan parameter yang diambil secara acak dari distribusi yang telah ditentukan, seperti distribusi normal, uniform, atau lognormal, sesuai dengan karakteristik data atau sistem yang dimodelkan. Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk memperoleh distribusi kemungkinan dari output model, bukan hanya satu hasil tunggal. Misalnya, dalam model ekonomi, Monte Carlo Simulation dapat digunakan untuk mensimulasikan berbagai hasil inflasi, pengangguran, atau pertumbuhan GDP berdasarkan berbagai skenario kebijakan yang ditentukan oleh distribusi probabilitas yang berbeda. Dengan melibatkan ribuan atau bahkan jutaan simulasi, Monte Carlo memberikan gambaran yang lebih realistis mengenai variabilitas dan ketidakpastian yang ada dalam sistem yang dianalisis.

3. Pengujian Skenario

Pengujian skenario adalah teknik evaluasi di mana berbagai kebijakan atau perubahan kondisi dalam sistem diuji untuk melihat bagaimana hasilnya akan dipengaruhi. Teknik ini memungkinkan perbandingan antara berbagai kebijakan atau keputusan dalam konteks sistem dinamik dan memberikan wawasan mengenai dampak jangka panjang dari kebijakan tersebut.

a. Skenario Kebijakan

Skenario Kebijakan adalah salah satu metode penting dalam pengujian model simulasi, yang digunakan untuk mengevaluasi dampak dari berbagai kebijakan atau perubahan yang diterapkan dalam sebuah sistem. Dalam konteks pengelolaan sumber daya alam, misalnya, pengujian skenario kebijakan dapat melibatkan simulasi dampak dari perubahan kebijakan alokasi anggaran, pembatasan penggunaan sumber daya, atau

peraturan baru terkait konservasi lingkungan. Skenario ini memungkinkan peneliti atau pembuat kebijakan untuk membahas berbagai kemungkinan hasil dari tindakan tertentu sebelum kebijakan tersebut diterapkan di dunia nyata. Dengan demikian, pengujian skenario kebijakan dapat memberikan wawasan yang lebih dalam tentang efek jangka panjang dan implikasi dari kebijakan yang direncanakan.

b. Skenario "*What-If*"

Skenario "*What-If*" adalah salah satu teknik analisis yang digunakan untuk membahas dampak dari berbagai perubahan atau kejadian yang mungkin terjadi dalam suatu sistem. Pendekatan ini bertujuan untuk mengidentifikasi hasil yang mungkin muncul jika kondisi atau parameter tertentu dalam model diubah. Misalnya, dalam konteks model ekonomi, pengujian "*What-If*" dapat digunakan untuk melihat bagaimana perubahan dalam permintaan pasar atau peningkatan harga suatu barang akan mempengaruhi keseimbangan ekonomi secara keseluruhan. Dengan melakukan simulasi berbagai kondisi hipotetis, pengujian ini memberikan wawasan tentang rentang kemungkinan hasil yang bisa terjadi.

4. Perbandingan dengan Data Eksperimental atau Observasional

Perbandingan model dengan data eksperimental atau observasional adalah salah satu teknik yang paling kuat dalam evaluasi hasil simulasi. Dalam banyak kasus, model yang dikembangkan digunakan untuk memprediksi hasil yang belum terjadi, sehingga perbandingan dengan data observasional atau eksperimen sebelumnya memberikan bukti kuat mengenai akurasi model.

a. Data Observasional

Data Observasional adalah data yang diperoleh dari pengamatan langsung terhadap fenomena atau sistem nyata tanpa adanya intervensi eksperimen atau manipulasi. Dalam konteks model simulasi, data observasional sering digunakan sebagai acuan untuk memvalidasi dan mengevaluasi hasil simulasi. Misalnya, dalam model yang memprediksi dampak kebijakan ekonomi, data pasar nyata, seperti harga barang, tingkat pengangguran, atau data perdagangan internasional, dapat digunakan untuk membandingkan dan menilai seberapa baik model mereplikasi

keadaan dunia nyata. Menggunakan data observasional memungkinkan peneliti atau pembuat kebijakan untuk memastikan bahwa model yang dikembangkan mampu memberikan prediksi yang relevan dan akurat berdasarkan kondisi yang sebenarnya.

b. Data Eksperimental

Data Eksperimental merujuk pada data yang diperoleh melalui eksperimen terkontrol, di mana variabel-variabel yang relevan dimanipulasi secara sistematis untuk mengamati dampaknya terhadap sistem atau fenomena yang sedang dipelajari. Dalam konteks simulasi dinamik, data eksperimen digunakan sebagai dasar untuk menguji apakah model yang dikembangkan dapat mereproduksi hasil yang diperoleh dari percobaan yang dilakukan di dunia nyata. Salah satu keuntungan utama dari data eksperimen adalah kontrol yang lebih ketat terhadap variabel-variabel yang diuji, sehingga memungkinkan peneliti untuk mengisolasi dan memahami hubungan kausal yang lebih jelas antara faktor-faktor yang berpengaruh. Misalnya, dalam model simulasi yang mengkaji dampak kebijakan ekonomi terhadap pasar tenaga kerja, data eksperimen dari uji coba kebijakan ekonomi di tingkat kecil atau regional dapat digunakan untuk memvalidasi prediksi model terhadap hasil yang diamati.

5. Pengukuran Kinerja Sistem

Pada beberapa kasus, evaluasi hasil simulasi tidak hanya berfokus pada keakuratan model, tetapi juga pada kinerja sistem yang dimodelkan. Pengukuran kinerja sistem melibatkan pemantauan berbagai indikator kunci seperti throughput, biaya, waktu siklus, dan penggunaan sumber daya. Beberapa metrik pengukuran kinerja yang digunakan dalam sistem dinamik termasuk:

a. Throughput

Throughput adalah salah satu ukuran kinerja yang digunakan untuk menilai efisiensi suatu sistem berdasarkan laju keluaran yang dihasilkan dalam periode waktu tertentu. Dalam konteks manufaktur atau industri, throughput sering kali diukur sebagai jumlah produk yang dihasilkan oleh sebuah lini produksi dalam satu jam, sehari, atau dalam periode waktu lainnya. Ukuran ini penting untuk memahami seberapa cepat sistem dapat

beroperasi dan seberapa efisien sumber daya digunakan untuk menghasilkan output. Dalam model sistem dinamik, throughput menggambarkan hasil akhir dari interaksi antara berbagai komponen dan proses dalam sistem, seperti mesin, tenaga kerja, dan bahan baku. Dengan memantau throughput, organisasi dapat mengetahui apakah sistem bekerja sesuai dengan harapan atau jika ada hambatan yang menghambat aliran produksi.

b. Utilisasi Sumber Daya

Utilisasi sumber daya adalah ukuran penting dalam menilai sejauh mana sumber daya yang tersedia, seperti tenaga kerja, mesin, atau bahan baku, digunakan dalam suatu sistem. Pengukuran ini menunjukkan sejauh mana kapasitas yang ada dimanfaatkan secara maksimal dalam produksi atau operasional sehari-hari. Dalam konteks industri atau organisasi, tingkat pemanfaatan sumber daya yang tinggi biasanya menandakan efisiensi operasional, di mana sumber daya yang tersedia digunakan secara optimal. Sebaliknya, tingkat utilisasi yang rendah dapat menunjukkan pemborosan atau kapasitas yang tidak terpakai, yang pada gilirannya dapat mempengaruhi profitabilitas dan kinerja keseluruhan sistem. Oleh karena itu, pengukuran utilisasi sumber daya sering digunakan untuk mengidentifikasi bottleneck atau potensi perbaikan dalam proses.

c. Biaya Total

Biaya total adalah salah satu metrik kunci dalam mengukur kinerja sistem, karena mencerminkan seluruh biaya yang dikeluarkan dalam proses operasional, produksi, atau layanan suatu organisasi. Pengukuran ini mencakup berbagai jenis biaya, seperti biaya tetap, variabel, dan tidak terduga, yang semuanya berkontribusi pada total pengeluaran. Biaya tetap meliputi biaya yang tidak berubah terlepas dari volume produksi, seperti sewa atau gaji tetap, sementara biaya variabel berfluktuasi seiring dengan perubahan dalam produksi atau operasional, seperti biaya bahan baku atau tenaga kerja. Selain itu, biaya tidak terduga bisa mencakup kerusakan peralatan atau biaya untuk menangani kegagalan sistem. Memahami biaya total sangat penting untuk menilai efisiensi suatu sistem, karena

dapat membantu dalam identifikasi area yang memerlukan pengendalian biaya lebih lanjut.

C. Soal Latihan

1. Jelaskan perbedaan antara verifikasi dan validasi dalam konteks sistem dinamik. Apa tujuan dari setiap proses ini dalam pengembangan model, dan mengapa keduanya sangat penting untuk memastikan akurasi dan kegunaan model?
2. Pada konteks simulasi sistem dinamik, analisis sensitivitas membantu untuk mengetahui seberapa sensitif hasil simulasi terhadap perubahan parameter input. Jelaskan metode analisis sensitivitas yang umum digunakan, seperti one-way analysis dan Monte Carlo simulation.
3. Berikan penjelasan mengenai pengujian skenario kebijakan dalam sistem dinamik. Pilihlah satu sektor ekonomi, seperti sektor energi atau transportasi, dan jelaskan bagaimana model sistem dinamik dapat digunakan untuk menguji berbagai skenario kebijakan.
4. Pada sistem dinamik, pengukuran kinerja sistem merupakan bagian integral dari evaluasi hasil simulasi. Jelaskan berbagai indikator kinerja yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam model dinamik.
5. Salah satu teknik evaluasi model sistem dinamik adalah perbandingan dengan data eksperimen atau observasional. Jelaskan bagaimana teknik ini digunakan untuk menguji validitas model.

BAB XIII

TANTANGAN DAN MASA DEPAN SISTEM DINAMIK DALAM SPK

Kemampuan Akhir yang Diharapkan

Mampu memahami terkait dengan tantangan dalam implementasi sistem dinamik, memahami tren masa depan sistem dinamik untuk SPK, serta memahami integrasi sistem dinamik dengan AI dan big data, sehingga pembaca dapat mengatasi tantangan implementasi sistem dinamis, mengenali tren masa depan dalam aplikasi sistem pendukung keputusan, dan memanfaatkan integrasi dengan teknologi terkini seperti AI dan big data untuk meningkatkan efektivitas dan analisis yang cermat serta pengambilan keputusan.

Materi Pembelajaran

- Tantangan dalam Implementasi Sistem Dinamik
- Tren Masa Depan Sistem Dinamik untuk SPK
- Integrasi Sistem Dinamik dengan AI dan Big Data
- Soal Latihan

A. Tantangan dalam Implementasi Sistem Dinamik

Sistem Dinamik (SD) merupakan alat yang kuat untuk memahami dan menganalisis perilaku sistem yang kompleks, seperti sistem ekonomi, sosial, kesehatan, dan lingkungan. Dalam konteks Sistem Pendukung Keputusan (SPK), sistem dinamik digunakan untuk memodelkan dan mensimulasikan dampak kebijakan, merencanakan strategi jangka panjang, dan mengevaluasi kinerja berbagai skenario. Meskipun memiliki potensi besar, implementasi sistem dinamik dalam SPK menghadapi berbagai tantangan yang perlu diatasi agar sistem ini dapat diterapkan secara efektif dalam pengambilan keputusan di berbagai sektor.

1. Kompleksitas Model dan Representasi Sistem

Salah satu tantangan terbesar dalam implementasi sistem dinamik adalah kompleksitas model. Sistem dinamik digunakan untuk memodelkan sistem yang sering kali terdiri dari banyak variabel dan interaksi yang saling bergantung. Meskipun sistem ini sangat efektif dalam menggambarkan perilaku jangka panjang dari sistem, model yang terlalu kompleks bisa mengarah pada kesulitan dalam pemahaman dan penggunaan model tersebut. Beberapa faktor yang memperburuk kompleksitas ini meliputi:

- a. Interaksi yang tidak linier antara variabel-variabel dalam sistem.
- b. *Feedback loops* yang sulit diprediksi dan memerlukan pemahaman yang mendalam tentang bagaimana satu perubahan dapat mempengaruhi seluruh sistem.
- c. Keterbatasan dalam pengumpulan data untuk mendukung semua komponen model yang kompleks.

Sebagai contoh dalam perencanaan kebijakan energi, model sistem dinamik yang menggambarkan hubungan antara konsumsi energi, produksi, harga, dan kebijakan pemerintah bisa menjadi sangat kompleks dan sulit untuk divalidasi. Mengelola dan memvalidasi model seperti ini membutuhkan pengetahuan mendalam tentang masing-masing komponen dan keterbatasan data yang sering kali sulit didapatkan.

2. Ketersediaan dan Kualitas Data

Sistem dinamik sangat bergantung pada data yang akurat untuk memvalidasi model dan melakukan simulasi yang realistis. Salah satu tantangan utama adalah ketersediaan dan kualitas data. Dalam banyak kasus, data yang diperlukan untuk mendukung model sistem dinamik tidak selalu tersedia atau mungkin tidak lengkap. Masalah ini sering terjadi dalam sektor-sektor seperti kesehatan, lingkungan, dan ekonomi, di mana data historis yang relevan mungkin tidak ada atau sulit diperoleh.

Data yang tidak lengkap atau cacat dapat menyebabkan model yang tidak akurat, yang berpotensi menghasilkan rekomendasi kebijakan yang salah. Misalnya, dalam sektor transportasi, data terkait perilaku pengguna jalan atau waktu perjalanan yang akurat bisa sangat terbatas, yang mempengaruhi keandalan simulasi sistem dinamik yang mengoptimalkan rute atau alokasi sumber daya. Selain itu, ada tantangan dalam memperbarui data secara real-time, terutama dalam

model yang memerlukan informasi dinamis untuk memperkirakan dampak dari perubahan kebijakan. Data yang terlambat atau tidak relevan dapat mengurangi efektivitas sistem dinamik dalam mendukung pengambilan keputusan.

3. Persyaratan Keterampilan dan Sumber Daya Manusia

Implementasi sistem dinamik dalam SPK juga memerlukan sumber daya manusia yang memiliki keterampilan khusus, baik dalam pembuatan model maupun dalam pemahaman teoritis sistem dinamik itu sendiri. Salah satu tantangan yang sering dihadapi adalah keterbatasan keterampilan dan pemahaman pengguna akhir, terutama dalam hal penggunaan perangkat lunak simulasi yang kompleks dan analisis hasil simulasi. Dalam banyak organisasi, tidak semua pengambil keputusan memiliki pengetahuan yang cukup tentang teori sistem dinamik atau keterampilan teknis untuk mengembangkan dan menganalisis model secara efektif. Hal ini dapat menyebabkan kesulitan dalam mengimplementasikan sistem dinamik secara efektif sebagai alat pendukung keputusan, karena model yang dibuat mungkin tidak dapat dipahami atau diterima oleh pemangku kepentingan yang tidak terbiasa dengan pendekatan ini. Pelatihan dan pengembangan keterampilan menjadi kunci untuk mengatasi tantangan ini. Namun, investasi dalam pelatihan ini memerlukan waktu dan biaya yang signifikan.

4. Validasi dan Verifikasi Model

Validasi dan verifikasi model adalah proses kritis dalam sistem dinamik. Model yang belum tervalidasi dengan baik tidak dapat diandalkan dalam membuat keputusan yang akurat. Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan data empiris atau dengan teori yang ada. Namun, proses ini sering kali sulit dilakukan, terutama ketika data yang diperlukan tidak tersedia atau sulit didapatkan, atau ketika model tersebut beroperasi dalam domain yang kurang dipahami. Verifikasi, di sisi lain, mengonfirmasi bahwa model tersebut dikembangkan dengan benar sesuai dengan spesifikasi. Kedua proses ini membutuhkan waktu, sumber daya, dan keterampilan yang cukup, yang sering kali menjadi tantangan besar dalam implementasi sistem dinamik. Kegagalan dalam validasi dan verifikasi dapat

menyebabkan keputusan yang salah dan biaya yang lebih tinggi dalam jangka panjang.

5. Kesulitan dalam Interpretasi dan Pengambilan Keputusan

Meskipun sistem dinamik dapat memberikan wawasan berharga melalui simulasi, interpretasi hasil simulasi bisa menjadi tantangan tersendiri. Simulasi yang menghasilkan berbagai skenario mungkin memberikan hasil yang bervariasi, tergantung pada parameter input yang digunakan. Hal ini bisa menyebabkan kebingungan atau ketidakpastian di kalangan pengambil keputusan, terutama ketika tidak ada pemahaman yang jelas tentang bagaimana memanfaatkan hasil simulasi untuk merumuskan kebijakan yang optimal. Kesulitan ini sering muncul ketika pengambil keputusan merasa bahwa ia tidak dapat sepenuhnya mengandalkan hasil yang diperoleh dari model. Oleh karena itu, penjelasan hasil simulasi yang mudah dipahami menjadi penting. Pengambilan keputusan yang berbasis pada simulasi membutuhkan pendekatan yang hati-hati, dengan pemahaman yang mendalam tentang ketidakpastian dan asumsi dalam model.

B. Tren Masa Depan Sistem Dinamik untuk SPK

Sistem Dinamik (SD) telah menjadi alat yang sangat penting dalam bidang Sistem Pendukung Keputusan (SPK), memungkinkan analisis yang mendalam tentang perilaku sistem yang kompleks dan dinamis dalam berbagai sektor, seperti ekonomi, kesehatan, lingkungan, dan transportasi. Namun, seiring dengan perkembangan teknologi dan meningkatnya kebutuhan untuk pengambilan keputusan yang lebih efisien dan berbasis data, tren masa depan sistem dinamik dalam SPK diprediksi akan mengarah pada integrasi yang lebih besar dengan teknologi terkini, pengembangan metode yang lebih canggih, serta peningkatan aksesibilitas bagi para pengguna.

1. Integrasi dengan Big Data dan *Internet of Things* (IoT)

Salah satu tren paling signifikan dalam masa depan sistem dinamik adalah integrasi dengan big data dan *Internet of Things* (IoT). Big data mengacu pada kumpulan data yang sangat besar dan kompleks yang tidak dapat diolah menggunakan alat manajemen data tradisional. IoT, di sisi lain, mengacu pada jaringan perangkat yang saling

terhubung yang dapat mengumpulkan dan berbagi data secara real-time. Integrasi kedua teknologi ini dengan sistem dinamik dapat membawa kemampuan baru dalam analisis dan peramalan sistem yang lebih akurat dan dinamis. Dengan menggunakan data yang dihasilkan oleh perangkat IoT (misalnya sensor di pabrik, kendaraan, atau bahkan rumah), model sistem dinamik dapat diperbarui secara real-time untuk menggambarkan kondisi terkini sistem. Ini memungkinkan pengambil keputusan untuk memantau perubahan dalam sistem secara langsung dan membuat keputusan yang lebih cepat dan lebih tepat.

2. Penggunaan Kecerdasan Buatan (AI) dan Pembelajaran Mesin (*Machine Learning*)

Kecerdasan Buatan (AI) dan Pembelajaran Mesin (*Machine Learning*) diperkirakan akan semakin berperan penting dalam evolusi sistem dinamik, terutama dalam meningkatkan kemampuan analisis dan peramalan. Dengan AI dan pembelajaran mesin, sistem dinamik dapat "belajar" dari data historis dan terus memperbarui model secara otomatis berdasarkan pola yang ditemukan dalam data. Sebagai contoh, dalam sistem dinamik yang digunakan untuk meramalkan permintaan pasar, pembelajaran mesin dapat digunakan untuk mengenali pola dalam data konsumen dan memperbarui parameter model untuk lebih akurat mencerminkan tren pasar yang baru muncul. Hal ini dapat mengurangi ketergantungan pada asumsi yang dibuat sebelumnya dan meningkatkan kemampuan model untuk merespons perubahan yang cepat.

3. Peningkatan Kemampuan Visualisasi Data dan Simulasi Interaktif

Visualisasi data dan simulasi interaktif akan menjadi elemen kunci dalam perkembangan sistem dinamik masa depan. Pengguna sering kali menghadapi tantangan dalam memahami dan menginterpretasikan output dari simulasi sistem dinamik yang kompleks. Oleh karena itu, kemampuan visualisasi yang lebih baik akan menjadi salah satu tren penting. Visualisasi berbasis grafik, peta panas (*heat maps*), dan diagram interaktif akan memungkinkan pengguna untuk melihat perubahan dalam sistem secara lebih intuitif, sehingga mempermudah pengambilan keputusan. Alat visualisasi ini akan diintegrasikan dengan simulasi sistem dinamik untuk memungkinkan

pengambil keputusan untuk mengubah variabel model secara langsung dan melihat dampaknya secara real-time.

4. Integrasi dengan Teknologi Cloud dan Komputasi Awan

Integrasi sistem dinamik dengan teknologi cloud computing memberikan dampak besar dalam pengembangan dan penerapan Sistem Pendukung Keputusan (SPK). Dengan menggunakan cloud computing, perangkat lunak dan model simulasi dapat dijalankan tidak hanya di server lokal, tetapi juga di server berbasis cloud. Hal ini memungkinkan akses yang lebih fleksibel dan efisien dari berbagai lokasi, menghilangkan batasan fisik yang sering kali terjadi dengan infrastruktur tradisional. Tim yang tersebar di berbagai lokasi dapat bekerja secara kolaboratif pada model yang sama, berbagi data, dan memperbarui hasil simulasi secara real-time, meningkatkan dinamika pengambilan keputusan yang lebih cepat dan terkoordinasi.

Penggunaan *cloud computing* mengurangi kebutuhan akan perangkat keras yang mahal dan kapasitas penyimpanan lokal yang besar. Cloud menyediakan penyimpanan data yang lebih efisien, memungkinkan organisasi untuk menyimpan dan mengelola data besar dengan biaya yang lebih rendah. Proses pemrosesan komputasi yang dilakukan di cloud memungkinkan simulasi sistem dinamik yang lebih kompleks dan lebih cepat, tanpa perlu mengkhawatirkan keterbatasan kapasitas hardware yang ada pada server lokal. Hal ini memungkinkan analisis data yang lebih mendalam dan perhitungan model yang lebih besar tanpa membebani infrastruktur internal.

5. Sistem Dinamik untuk Perencanaan Berkelanjutan dan Adaptasi Perubahan Iklim

Untuk menghadapi tantangan perubahan iklim dan perencanaan berkelanjutan, sistem dinamik dapat menjadi alat yang sangat efektif untuk merancang kebijakan yang lebih holistik dan berbasis bukti. Dengan menggabungkan model sistem dinamik dengan data iklim, ekologi, dan ekonomi, para perencana dapat membahas berbagai skenario dan kebijakan yang mungkin diambil untuk mengurangi dampak negatif perubahan iklim. Misalnya, model ini dapat digunakan untuk mengevaluasi kebijakan pengurangan emisi gas rumah kaca atau untuk merencanakan langkah-langkah mitigasi terhadap bencana alam yang semakin sering terjadi, seperti banjir dan kekeringan.

Sistem dinamik memberikan cara untuk memodelkan interaksi kompleks antara faktor-faktor yang saling terkait, seperti perubahan suhu, pola curah hujan, penggunaan lahan, dan aktivitas manusia. Dengan mempertimbangkan variabel lingkungan, sosial, dan ekonomi dalam model, para perencana dapat lebih memahami bagaimana perubahan satu variabel dapat mempengaruhi seluruh sistem. Hal ini sangat penting dalam perencanaan perubahan iklim, di mana dampaknya seringkali bersifat jangka panjang dan memiliki banyak ketidakpastian.

6. Perkembangan Alat dan Perangkat Lunak Sistem Dinamik

Perkembangan perangkat lunak sistem dinamik, seperti Vensim, Stella, dan AnyLogic, diperkirakan akan terus berlanjut, dengan fitur-fitur baru yang dirancang untuk meningkatkan kemampuan model dan mempermudah penggunaan. Beberapa tren perkembangan perangkat lunak ini meliputi:

- a. Antarmuka pengguna yang lebih ramah pengguna: Meningkatkan aksesibilitas bagi pengguna yang tidak memiliki latar belakang teknis.
- b. Fitur otomatisasi untuk mempercepat proses pembuatan model dan simulasi.
- c. Kemampuan untuk menangani data besar dan kompleks dengan lebih efisien, meningkatkan akurasi dan kecepatan simulasi.

Perangkat lunak yang lebih terintegrasi dan fleksibel ini akan memungkinkan pengambil keputusan untuk menggunakan sistem dinamik lebih mudah, tanpa harus bergantung pada ahli model atau programmer.

C. Integrasi Sistem Dinamik dengan AI dan Big Data

Integrasi Sistem Dinamik (SD) dengan Artificial Intelligence (AI) dan Big Data telah menjadi salah satu aspek yang semakin penting dalam meningkatkan efektivitas Sistem Pendukung Keputusan (SPK) di berbagai sektor. Dalam konteks SPK, kemampuan untuk menangani kompleksitas, ketidakpastian, dan perubahan yang cepat dalam lingkungan bisnis atau operasional memerlukan pengolahan data yang lebih canggih dan prediktabilitas yang lebih akurat. Kombinasi antara SD, AI, dan Big Data menawarkan potensi untuk meningkatkan

pengambilan keputusan melalui model yang lebih responsif, dinamis, dan berbasis data. Integrasi ini tidak hanya memberikan alat yang lebih kuat untuk menganalisis dan memprediksi perilaku sistem, tetapi juga memungkinkan SPK untuk berkembang dengan cara yang lebih adaptif dan responsif terhadap perubahan yang terjadi dalam sistem yang dianalisis.

1. Konsep Sistem Dinamik, AI, dan Big Data dalam SPK

Sistem Dinamik (SD) adalah pendekatan berbasis simulasi yang digunakan untuk menganalisis interaksi dalam sistem yang kompleks, dengan mempertimbangkan perubahan waktu dan hubungan antara elemen-elemen dalam sistem tersebut. SD umumnya digunakan untuk memahami dinamika dalam sistem yang melibatkan *feedback loops* dan *time delays*, seperti dalam perencanaan kebijakan ekonomi, perencanaan transportasi, dan pengelolaan sumber daya alam. Namun, SD menghadapi tantangan dalam menangani ketidakpastian yang tinggi dan kemampuan untuk memperbarui model dengan data yang dinamis dan besar.

Artificial Intelligence (AI), di sisi lain, mengacu pada kemampuan mesin untuk meniru kecerdasan manusia dalam memproses informasi, belajar dari data, dan membuat keputusan. AI dalam konteks SPK memungkinkan analisis yang lebih cepat dan lebih efisien, meningkatkan kemampuan untuk menangani data besar dan menemukan pola yang tidak terdeteksi oleh metode tradisional. Big Data adalah kumpulan data yang sangat besar, terstruktur, maupun tidak terstruktur, yang dapat memberikan wawasan yang lebih dalam jika dianalisis dengan teknik yang tepat. Dalam konteks SPK, Big Data merujuk pada data yang dikumpulkan dari berbagai sumber, seperti sensor IoT, transaksi bisnis, media sosial, dan data pelanggan, yang kemudian digunakan untuk meningkatkan akurasi prediksi dan keputusan.

2. Mengapa Integrasi Ini Penting dalam SPK?

SPK berfungsi untuk membantu pengambil keputusan dalam merancang kebijakan atau strategi dengan menganalisis berbagai alternatif yang tersedia. Salah satu tantangan terbesar dalam SPK adalah menangani ketidakpastian dan dinamika sistem yang dapat berubah-ubah dalam waktu singkat. Untuk itu, integrasi SD dengan AI

dan Big Data memiliki potensi untuk mengatasi beberapa masalah yang sering terjadi dalam SPK.

- a. Prediksi yang lebih akurat: Big Data memberikan banyak informasi yang dapat digunakan untuk memperbarui model sistem dinamik secara real-time. Misalnya, dalam sektor kesehatan, data yang terkumpul dari rumah sakit, laboratorium, dan sistem informasi kesehatan dapat digunakan untuk memperbarui model penyebaran penyakit atau distribusi sumber daya medis.
- b. Adaptasi terhadap perubahan: Dengan menggunakan AI, model SD dapat belajar dari data historis dan memperbarui parameter secara otomatis ketika ada perubahan dalam sistem. Hal ini menjadikan sistem lebih responsif terhadap perubahan lingkungan, kebijakan, atau intervensi eksternal.
- c. Pengurangan ketidakpastian: Ketidakpastian sering menjadi masalah utama dalam pengambilan keputusan yang didasarkan pada sistem dinamik. Big Data dan AI memungkinkan analisis data dalam skala besar dan waktu nyata, yang dapat membantu memitigasi ketidakpastian dan memberikan informasi yang lebih akurat untuk pengambilan keputusan yang berbasis bukti.

3. Penggabungan AI dengan Sistem Dinamik

Integrasi AI dengan SD dapat memperkuat kemampuan analisis dan peramalan dalam berbagai jenis sistem. AI berfungsi untuk memperbaiki model SD dengan memanfaatkan teknik pembelajaran mesin (*machine learning*) dan optimasi untuk memperkirakan hasil dan mengoptimalkan keputusan dalam simulasi. Ada beberapa cara AI dapat diterapkan dalam sistem dinamik:

- a. Pembelajaran Mesin untuk Meningkatkan Model Simulasi

Pembelajaran mesin (*machine learning*) menawarkan potensi besar untuk meningkatkan keakuratan dan efisiensi model simulasi dalam sistem dinamik (SD). Dengan kemampuannya untuk mempelajari pola-pola dalam data dan menyesuaikan prediksi tanpa intervensi manusia, pembelajaran mesin memungkinkan model sistem dinamik untuk menjadi lebih adaptif dan responsif terhadap perubahan yang terjadi di dunia nyata. Salah satu aplikasinya adalah dalam kalibrasi model, di mana pembelajaran mesin digunakan untuk memperbarui parameter-parameter model berdasarkan data

terbaru yang tersedia. Hal ini sangat penting, mengingat banyak sistem dinamik yang melibatkan data yang berubah seiring waktu, seperti dalam perencanaan energi, kebijakan lingkungan, atau manajemen sumber daya alam.

Sebagai contoh dalam model sistem dinamik untuk perencanaan energi, pembelajaran mesin dapat digunakan untuk memprediksi permintaan energi di masa depan. Data historis, seperti konsumsi energi, cuaca, dan kebijakan pemerintah, dapat dianalisis oleh algoritma pembelajaran mesin untuk memahami tren dan pola. Berdasarkan pola-pola ini, model dapat terus memperbarui proyeksi permintaan energi secara real-time, memberikan prediksi yang lebih akurat dan relevan. Hal ini memungkinkan pembuat kebijakan untuk merespons perubahan kondisi lebih cepat dan lebih tepat, dengan memperbarui kebijakan energi yang sesuai untuk memenuhi kebutuhan yang berkembang.

b. Optimasi Keputusan dalam Simulasi Sistem Dinamik

Optimasi keputusan dalam simulasi sistem dinamik (SD) merupakan tantangan yang signifikan, terutama ketika melibatkan banyak variabel dan kompleksitas tinggi. Dalam konteks ini, kecerdasan buatan (AI) menawarkan pendekatan yang sangat efektif untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi keputusan. Salah satu metode yang digunakan adalah algoritma optimasi berbasis AI, seperti algoritma genetika, yang mampu membahas berbagai skenario dan mencari solusi terbaik dalam lingkungan yang dinamis dan penuh ketidakpastian. Algoritma ini bekerja dengan cara meniru proses seleksi alam, di mana solusi terbaik dipilih dan diperbaiki melalui iterasi untuk mencapai hasil yang optimal.

Pada simulasi sistem dinamik, AI memungkinkan untuk mengatasi tantangan ketidakpastian dan kompleksitas yang seringkali dihadapi dalam perencanaan kebijakan dan strategi. Misalnya, dalam perencanaan energi, keputusan yang melibatkan alokasi sumber daya, pengaturan harga energi, atau pengurangan emisi gas rumah kaca memerlukan analisis dari berbagai variabel yang saling berinteraksi. Algoritma genetika dapat digunakan untuk membahas kombinasi kebijakan dan parameter yang berbeda, mencari solusi yang tidak hanya optimal dalam jangka pendek tetapi juga berkelanjutan dalam jangka panjang.

4. Big Data dan Sistem Dinamik

Salah satu tantangan besar dalam menggunakan SD adalah keterbatasan dalam memperoleh dan menganalisis data yang diperlukan untuk memodelkan sistem secara akurat. Dengan munculnya Big Data, banyak dari kendala tersebut dapat diatasi. Big Data menawarkan data dalam jumlah besar yang dapat memperkaya model SD dan memberikan wawasan yang lebih dalam tentang perilaku sistem.

a. Peningkatan Akurasi dan Ketepatan Prediksi

Big Data membawa revolusi signifikan dalam berbagai bidang, termasuk sistem dinamik (SD), dengan meningkatkan akurasi dan ketepatan prediksi. Dengan kemajuan teknologi, data kini dapat dikumpulkan dalam jumlah besar dari berbagai sumber, seperti media sosial, sensor IoT (Internet of Things), transaksi bisnis, dan data historis. Sebelumnya, pengumpulan data dalam jumlah besar ini sering kali terbatas oleh kapasitas penyimpanan dan pengolahan yang ada. Namun, dengan kemampuan komputasi modern dan platform Big Data, informasi yang sebelumnya sulit dijangkau kini dapat dianalisis dalam skala besar. Integrasi data ini ke dalam model SD memungkinkan pemodelan yang lebih komprehensif dan akurat, sehingga meningkatkan kualitas pengambilan keputusan.

Salah satu contoh penerapan Big Data dalam SD adalah dalam perencanaan distribusi energi. Sensor yang tersebar di berbagai lokasi dapat memberikan data real-time mengenai beban energi, suhu, dan variabel lainnya yang mempengaruhi permintaan energi. Dengan mengintegrasikan data tersebut dalam model sistem dinamik, para pengambil kebijakan dapat memodelkan permintaan energi secara lebih akurat dan menyesuaikan distribusi serta alokasi sumber daya energi secara real-time. Hal ini mengurangi ketidakpastian dalam peramalan permintaan energi dan memungkinkan pengelolaan sumber daya yang lebih efisien.

b. *Real-Time Analytics*

Pada lingkungan yang dinamis dan cepat berubah, kemampuan untuk memperbarui model sistem dinamik (SD) secara real-time sangat penting untuk membuat keputusan yang cepat dan tepat. Big Data memberikan kemampuan untuk memantau sistem secara langsung dan mengumpulkan informasi yang terus-menerus diperbarui dari berbagai sumber, seperti sensor, media

sosial, dan perangkat IoT (*Internet of Things*). Dengan akses ke data waktu nyata, model SD dapat disesuaikan dengan kondisi terbaru, memungkinkan prediksi dan rekomendasi yang lebih akurat dalam menghadapi perubahan yang cepat.

Sebagai contoh dalam sektor transportasi, data yang dikumpulkan dari sensor jalan, GPS kendaraan, dan sistem pemantauan lalu lintas memungkinkan model SD untuk terus memantau keadaan lalu lintas dan pola perjalanan. Dengan real-time analytics, model ini dapat memperbarui simulasi dan prediksi secara langsung, memberikan gambaran yang lebih akurat tentang kemacetan, waktu perjalanan, atau kebutuhan pengaturan lalu lintas. Pengambil kebijakan atau operator sistem transportasi dapat menggunakan informasi ini untuk membuat keputusan yang lebih efisien, seperti mengalihkan rute atau merencanakan perbaikan infrastruktur secara real-time.

D. Soal Latihan

1. Jelaskan tantangan-tantangan utama yang dihadapi dalam penerapan sistem dinamik dalam SPK.
2. Jelaskan bagaimana AI dan Big Data dapat digunakan untuk meningkatkan akurasi dan kecepatan simulasi dalam sistem dinamik, serta tantangan apa yang mungkin timbul dari integrasi teknologi ini dalam SPK.
3. Jelaskan bagaimana integrasi antara sistem dinamik, AI, dan Big Data dapat meningkatkan kualitas pengambilan keputusan dalam suatu organisasi.
4. Apa saja keuntungan dan risiko yang muncul ketika sistem dinamik diintegrasikan dengan teknologi baru seperti AI dan Big Data dalam SPK?
5. Bagaimana sistem dinamik dapat digunakan untuk merancang kebijakan yang efektif dalam menghadapi tantangan lingkungan atau ekonomi yang berubah cepat?

BAB XIV

KESIMPULAN

Sistem pendukung keputusan (SPK) berbasis model dinamik merupakan alat yang sangat penting dalam pengambilan keputusan, terutama untuk situasi yang melibatkan kompleksitas tinggi dan ketidakpastian. Dengan pendekatan sistem dinamik, model yang digunakan mampu menggambarkan interaksi dinamis antar elemen dalam suatu sistem secara berkesinambungan. Hal ini memungkinkan perencanaan yang lebih tepat dan efisien, terutama dalam berbagai sektor yang membutuhkan analisis mendalam seperti perencanaan kebijakan, manajemen rantai pasokan, dan sektor kesehatan.

Pendekatan sistem dinamik memberikan keunggulan dalam memodelkan sistem kompleks yang melibatkan banyak elemen saling berinteraksi. Dalam konteks SPK, pendekatan ini memungkinkan pengguna untuk memahami hubungan temporal antar elemen dalam sistem serta dampak keputusan terhadap sistem dalam jangka panjang. Dengan simulasi berbasis model dinamik, pengambil keputusan dapat mengenali pola yang tidak terlihat oleh metode konvensional, sehingga menghasilkan strategi yang lebih efektif dan adaptif terhadap perubahan.

Seiring perkembangan teknologi, model dinamik kini mencakup lebih banyak variabel dan simulasi yang semakin canggih. Dalam SPK, model ini tidak hanya menawarkan simulasi berbasis data tetapi juga mendukung pengembangan skenario untuk mengantisipasi berbagai kemungkinan di masa depan. Misalnya, dalam manajemen rantai pasokan, model dinamik dapat membantu mengoptimalkan operasional perusahaan dengan mensimulasikan dampak dari perubahan pada berbagai variabel seperti permintaan pasar, ketersediaan bahan baku, atau distribusi produk.

Teknologi seperti kecerdasan buatan (AI), pembelajaran mesin, dan Big Data semakin memperkuat kemampuan sistem dinamik dalam SPK. Dengan integrasi teknologi ini, analisis menjadi lebih akurat, cepat, dan dapat menangani volume data yang besar. Buku ini

menyoroti pentingnya teknologi tersebut dalam meningkatkan kecepatan pengambilan keputusan berbasis bukti serta mengurangi ketidakpastian dalam perencanaan kebijakan publik dan strategi bisnis.

Penerapan sistem dinamik dalam SPK juga menghadapi sejumlah tantangan. Salah satu kendala utama adalah kebutuhan akan data yang berkualitas tinggi dan keterampilan teknis yang memadai untuk merancang dan memelihara model. Selain itu, keterbatasan perangkat keras atau perangkat lunak di beberapa organisasi dapat menghambat implementasi yang efektif. Oleh karena itu, keberhasilan penerapan SPK berbasis sistem dinamik memerlukan kolaborasi antara berbagai disiplin ilmu, seperti manajemen, teknik, dan ilmu komputer, serta pelatihan bagi para pengguna dan pengembang.

Di masa depan, sistem dinamik diperkirakan akan menjadi semakin penting dalam mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan responsif terhadap kompleksitas global. Integrasi dengan teknologi real-time akan mempercepat simulasi dan analisis, membantu organisasi membuat keputusan berbasis bukti dengan lebih efisien. Dengan mengatasi tantangan implementasi dan memanfaatkan kemajuan teknologi, sistem pendukung keputusan berbasis model dinamik dapat berkontribusi signifikan terhadap efektivitas kebijakan, keberlanjutan bisnis, dan kesejahteraan masyarakat secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

- Afanasyev, M., Pervukhin, D., Kotov, D., Davardoost, H., & Smolenchuk, A. (2023). System modeling in solving mineral complex logistic problems with the anylogic software environment. *Transportation Research Procedia*, 68, 483–491.
- Ahmad, T., Madonski, R., Zhang, D., Huang, C., & Mujeeb, A. (2022). Data-driven probabilistic machine learning in sustainable smart energy/smart energy systems: Key developments, challenges, and future research opportunities in the context of smart grid paradigm. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112128.
- Altioek, T., & Melamed, B. (2010). *Simulation Modeling and Analysis with ARENA*. Academic Press. <https://books.google.co.id/books?id=5SezxR5q4mYC>
- Anderson, J. E., Daniels, J., McDonald, D., & Edvalson, R. (2014). The Current State of Business Intelligence and Analytics in Utah. *Issues in Information Systems*, 15(2).
- Åström, K. J., & Murray, R. (2021). *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers, Second Edition*. Princeton University Press. <https://books.google.co.id/books?id=l50DEAAAQBAJ>
- Azar, A. T. (2012). System dynamics as a useful technique for complex systems. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 10(4), 377–410.
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, 12(3), 183–210.
- Basílio, M. P., Pereira, V., Costa, H. G., Santos, M., & Ghosh, A. (2022). A systematic review of the applications of multi-criteria decision aid methods (1977–2022). *Electronics*, 11(11), 1720.
- Bataweel, D. S. (2015). *Business intelligence: Evolution and future trends*.
- Bauer, V. I., Bazanov, A. V, Kozin, E. S., Nemkov, V. M., & Mukhortov, A. A. (2019). Optimization of technological transport sets using AnyLogic simulation environment. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 42(2), 41–43.

- Bellman, R. E., & Dreyfus, S. E. (2015). *Applied Dynamic Programming*. Princeton University Press. <https://books.google.co.id/books?id=ZgbWCgAAQBAJ>
- Bonczek, R. H., Holsapple, C. W., Whinston, A. B., & Schmidt, J. W. (2014). *Foundations of Decision Support Systems*. Academic Press. <https://books.google.co.id/books?id=bzGjBQAAQBAJ>
- Cantero, J. D., Saorin, J. L., Melian, D., & Meier, C. (2015). STELLA 3D: Introducing art and creativity in engineering graphics education. *International Journal of Engineering Education*, 31(3), 805–813.
- Carter, M., Price, C. C., & Rabadi, G. (2018). *Operations Research: A Practical Introduction*. CRC Press. <https://books.google.co.id/books?id=ZD0PEAAAQBAJ>
- Chen, H., Chiang, R. H. L., & Storey, V. C. (2012). Business intelligence and analytics: From big data to big impact. *MIS Quarterly*, 1165–1188.
- Clemen, R. T., & Reilly, T. (1999). *Making hard decisions with DecisionTools Suite*. Duxbury.
- Comai, A. (2014). Decision-making support: the role of data visualization in analyzing complex systems. *World Future Review*, 6(4), 477–484.
- Currie, D. J., Smith, C., & Jagals, P. (2018). The application of system dynamics modelling to environmental health decision-making and policy-a scoping review. *BMC Public Health*, 18, 1–11.
- Dawson, C. (2014). *Dynamics of World History*. Intercollegiate Studies Institute (ORD). <https://books.google.co.id/books?id=dFyOAwAAQBAJ>
- Falanga, A., & Cartenì, A. (2023). Revolutionizing Mobility: Big Data Applications in Transport Planning. *Transportation*, 34, 35.
- Fick, G., & Sprague, R. H. (2013). *Decision Support Systems: Issues and Challenges: Proceedings of an International Task Force Meeting June 23-25, 1980*. Pergamon. <https://books.google.co.id/books?id=LF0hBQAAQBAJ>
- Forrester, J. W. (1997). Industrial dynamics. *Journal of the Operational Research Society*, 48(10), 1037–1041.
- Forrester, J. W. (2007). System dynamics—a personal view of the first fifty years. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, 23(2-3), 345–358.

- González, E. J., Castro, A. F. H., & Sánchez, L. A. (2011). *Artificial Intelligence Resources in Control and Automation Engineering*. Bentham Books.
<https://books.google.co.id/books?id=mJbbAwAAQBAJ>
- Gregory, R., Failing, L., Harstone, M., Long, G., McDaniels, T., & Ohlson, D. (2012). *Structured Decision Making: A Practical Guide to Environmental Management Choices*. Wiley.
https://books.google.co.id/books?id=bT1_LFuK6LMC
- Grösser, S. N. (2017). Complexity management and system dynamics thinking. *Dynamics of Long-Life Assets: From Technology Adaptation to Upgrading the Business Model*, 69–92.
- Gysi, T., Osuna, C., Fuhrer, O., Bianco, M., & Schulthess, T. C. (2015). STELLA: A domain-specific tool for structured grid methods in weather and climate models. *Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, 1–12.
- Hammond, D. (2010). *The Science of Synthesis: Exploring the Social Implications of General Systems Theory*. University Press of Colorado.
<https://books.google.co.id/books?id=TBvjCwAAQBAJ>
- Hannon, B., Meadows, D. H., & Ruth, M. (2001). *Dynamic Modeling*. Springer New York.
<https://books.google.co.id/books?id=Y5ZkO-wb0zoC>
- Hao, B., & Feng, Y. (2016). How networks influence radical innovation: the effects of heterogeneity of network ties and crowding out. *Journal of Business & Industrial Marketing*, 31(6), 758–770.
- Hashemizadeh, A., Ju, Y., & Abadi, F. Z. B. (2024). Policy design for renewable energy development based on government support: A system dynamics model. *Applied Energy*, 376, 124331.
- Hovmand, P. S. (2013). *Community Based System Dynamics*. Springer New York.
<https://books.google.co.id/books?id=EQ0JAgAAQBAJ>
- Jenkins, D. A., Sperrin, M., Martin, G. P., & Peek, N. (2018). Dynamic models to predict health outcomes: current status and methodological challenges. *Diagnostic and Prognostic Research*, 2, 1–9.
- Jones, L. (2014). Vensim and the development of system dynamics.

- Discrete-Event Simulation and System Dynamics for Management Decision Making*, 215–247.
- Kang, B. G., Park, H.-M., Jang, M., & Seo, K.-M. (2021). Hybrid model-based simulation analysis on the effects of social distancing policy of the COVID-19 epidemic. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(21), 11264.
- Karnopp, D. C., Margolis, D. L., & Rosenberg, R. C. (2012). *System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems*. Wiley.
<https://books.google.co.id/books?id=rSVHAAAAQBAJ>
- Laudon, K. C., & Laudon, J. P. (2004). *Management Information Systems: Managing the Digital Firm*. Prentice Hall.
<https://books.google.co.id/books?id=KD8ZZ66PF-gC>
- Leleur, S. (2012). *Complex Strategic Choices: Applying Systemic Planning for Strategic Decision Making*. Springer London.
<https://books.google.co.id/books?id=Du1EIIZQhCsC>
- Macal, C. M., & North, M. J. (2009). Agent-based modeling and simulation. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC)*, 86–98.
- McAfee, A., & Brynjolfsson, E. (2017). *Machine, Platform, Crowd: Harnessing Our Digital Future*. W. W. Norton.
<https://books.google.co.id/books?id=zh1DDQAAQBAJ>
- Meadows, D. H., & Wright, D. (2008). *Thinking in Systems: A Primer*. Chelsea Green Publishing.
<https://books.google.co.id/books?id=CpbLAgAAQBAJ>
- Meadows, D., Randers, J., & Meadows, D. (2004). *Limits to Growth: The 30-Year Update*. Chelsea Green Publishing.
<https://books.google.co.id/books?id=QRyQiINGW6oC>
- Morecroft, J. D. W. (2015). *Strategic Modelling and Business Dynamics: A feedback systems approach*. Wiley.
<https://books.google.co.id/books?id=0xSzCQAAQBAJ>
- Mosavi, A., Salimi, M., Faizollahzadeh Ardabili, S., Rabczuk, T., Shamshirband, S., & Varkonyi-Koczy, A. R. (2019). State of the art of machine learning models in energy systems, a systematic review. *Energies*, 12(7), 1301.
- Munda, G. (2007). *Social Multi-Criteria Evaluation for a Sustainable Economy*. Springer Berlin Heidelberg.
<https://books.google.co.id/books?id=8kXFyfQsd44C>

- Oliva, R. (2003). Model calibration as a testing strategy for system dynamics models. *European Journal of Operational Research*, 151(3), 552–568.
- Pahl, G., Wallace, K., Blessing, L. T. M., Beitz, W., & Bauert, F. (2013). *Engineering Design: A Systematic Approach*. Springer London. <https://books.google.co.id/books?id=4uvSBwAAQBAJ>
- Power, D., & Heavin, C. (2017). *Decision Support, Analytics, and Business Intelligence*.
- Rahmandad, H., & Sterman, J. (2008). Heterogeneity and network structure in the dynamics of diffusion: Comparing agent-based and differential equation models. *Management Science*, 54(5), 998–1014.
- Rebs, T., Brandenburg, M., & Seuring, S. (2019). System dynamics modeling for sustainable supply chain management: A literature review and systems thinking approach. *Journal of Cleaner Production*, 208, 1265–1280.
- Richardson, G. P., & Pugh III, A. L. (1997). Introduction to system dynamics modeling with DYNAMO. *Journal of the Operational Research Society*, 48(11), 1146.
- Rossetti, M. D. (2015). *Simulation Modeling and Arena*. Wiley. <https://books.google.co.id/books?id=j2xuCAAAQBAJ>
- Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F., & Ratto, M. (2004). *Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models*. Wiley. <https://books.google.co.id/books?id=NsAVmohPNpQC>
- Sauter, V. L. (2014). *Decision Support Systems for Business Intelligence*. Wiley. <https://books.google.co.id/books?id=t09YBAAAQBAJ>
- Schaap, A., Marks, G., Pantelic, V., Lawford, M., Selim, G., Wassyng, A., & Patcas, L. (2018). Documenting Simulink designs of embedded systems. *Proceedings of the 21st ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems: Companion Proceedings*, 47–51.
- Schoeman, I. M. (2017). *Transportation, Land Use and Integration: Applications in Developing Countries*. WIT Press. <https://books.google.co.id/books?id=0eomDwAAQBAJ>
- Scolozzi, R., & Schirpke, U. (2016). Insight Maker (S) to support the management of protected areas and related ecosystem services:

- Examples for recreational value. *The 34th International Conference of the System Dynamics Society*, 17–21.
- Senge, P. M. (2014). *The Fifth Discipline Fieldbook: Strategies and Tools for Building a Learning Organization*. Crown.
<https://books.google.co.id/books?id=-zBkAwAAQBAJ>
- Sharda, R., Delen, D., & Turban, E. (2014). *Business intelligence and analytics: systems for decision support*. Pearson.
- Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., & Simchi-Levi, E. (1999). *Designing and managing the supply chain: Concepts, strategies, and cases*. McGraw-hill New York.
- Sterman, J. (2002). *System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*.
- Tzeng, G. H., & Huang, J. J. (2011). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Taylor & Francis.
https://books.google.co.id/books?id=_C7n1ar4f8IC
- Wang, R., Milisavljevic-Syed, J., Guo, L., Huang, Y., & Wang, G. (2021). Knowledge-based design guidance system for cloud-based decision support in the design of complex engineered systems. *Journal of Mechanical Design*, 143(7), 72001.
- Weisbuch, G. (2018). *Complex Systems Dynamics*. CRC Press.
<https://books.google.co.id/books?id=uF0PEAAAQBAJ>

GLOSARIUM

Data:	Kumpulan fakta, angka, atau informasi mentah yang belum diolah, digunakan sebagai bahan dasar untuk analisis, pengambilan keputusan, atau pengembangan sistem.
Basis:	Landasan atau fondasi yang menjadi tempat berdiri atau sistem tempat data dan informasi disimpan, dikelola, serta diakses.
Model:	Representasi abstrak, baik dalam bentuk matematis, grafis, maupun konseptual, yang digunakan untuk menggambarkan, menganalisis, atau memprediksi perilaku sistem atau proses.
Skor:	Angka atau nilai yang diberikan sebagai hasil penilaian berdasarkan kriteria tertentu dalam suatu sistem.
Nilai:	Besaran kuantitatif atau kualitatif yang menunjukkan hasil evaluasi, pengukuran, atau pengolahan data dalam sistem.
Sistem:	Kumpulan elemen, komponen, atau proses yang saling berinteraksi dan terorganisasi untuk mencapai tujuan tertentu secara efisien.
Simulasi:	Proses meniru atau memodelkan perilaku suatu sistem nyata dalam lingkungan virtual untuk keperluan analisis, pengujian, atau pelatihan.

Input:	Informasi, data, atau elemen yang dimasukkan ke dalam sistem sebagai bahan awal untuk diproses.
Output:	Hasil akhir dari proses dalam sistem, berupa informasi, produk, atau tindakan yang dihasilkan berdasarkan input.
Dinamis:	Bersifat fleksibel, berubah-ubah, dan beradaptasi dengan kondisi, parameter, atau waktu dalam sistem.
Algor:	Serangkaian langkah logis dan terstruktur yang dirancang untuk menyelesaikan masalah tertentu secara sistematis.
Rinci:	Penjelasan atau uraian yang mendalam dan terperinci, mencakup setiap aspek secara lengkap.
Opsi:	Pilihan atau alternatif yang tersedia dalam suatu proses atau pengambilan keputusan.
Predik:	Perkiraan atau proyeksi mengenai hasil atau kondisi masa depan berdasarkan analisis data atau pola tertentu.
Fungsi:	Peran, tugas, atau kegunaan dari suatu elemen dalam sistem untuk mencapai tujuan tertentu.

INDEKS

A

akademik, 193, 195
aksesibilitas, 5, 14, 213, 216

B

big data, 6, 189, 192, 213, 226
blockchain, 9

C

cloud, 7, 8, 152, 189, 192, 215,
230

D

diskonto, 115
distribusi, 14, 35, 38, 40, 41,
47, 63, 69, 79, 88, 89, 90, 94,
118, 122, 128, 132, 179, 182,
183, 189, 205, 218, 220

E

E-Business, vi
ekonomi, 17, 18, 19, 20, 22,
23, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 33,
34, 36, 38, 39, 41, 43, 44, 45,
47, 48, 50, 51, 52, 53, 55, 56,

59, 63, 64, 65, 68, 70, 72, 73,
75, 80, 81, 86, 93, 102, 115,
116, 123, 125, 127, 131, 132,
133, 136, 138, 143, 147, 156,
157, 162, 164, 165, 167, 174,
179, 186, 187, 189, 197, 198,
200, 202, 203, 204, 205, 206,
207, 209, 210, 211, 213, 215,
216, 217, 221

emisi, 13, 14, 21, 31, 47, 49,
55, 70, 90, 115, 120, 123,
131, 139, 147, 172, 201, 202,
215, 219

empiris, 18, 28, 59, 76, 77, 78,
95, 97, 98, 103, 104, 105,
106, 108, 135, 137, 159, 166,
212

entitas, 37, 49, 50, 54, 57, 71,
72, 84

F

finansial, 71, 138
fiskal, 22, 23, 25, 32, 45, 46,
59, 68, 70, 75, 81, 200
fleksibilitas, 8, 115, 116, 133

fluktuasi, 11, 13, 18, 27, 33,
35, 46, 52, 89, 102, 107, 110,
128, 138, 179, 198
fundamental, 116, 169

G

genetika, 219
geografis, 5, 162, 163

I

implikasi, 20, 22, 206
inflasi, 17, 19, 22, 28, 31, 46,
51, 68, 74, 156, 174, 198,
201, 204, 205
informasional, 30, 71, 120, 126
infrastruktur, 8, 76, 91, 128,
131, 136, 138, 140, 152, 215,
221
integrasi, 7, 9, 14, 27, 170,
172, 173, 174, 183, 184, 186,
190, 191, 192, 213, 217, 221
integritas, 173, 179
interaktif, 6, 7, 10, 186, 189,
191, 192, 214
investasi, 8, 12, 17, 19, 20, 23,
28, 31, 34, 36, 38, 41, 55, 59,
63, 64, 65, 70, 91, 115, 116,
135, 138, 198, 212
investor, 38, 41

K

kolaborasi, 5, 97, 186, 189
komparatif, 97, 103
komprehensif, 7, 38, 111, 160,
167, 168, 174, 196, 220
komputasi, 4, 7, 118, 151, 152,
157, 177, 178, 198, 199, 200,
215, 220
konsistensi, 100, 101, 174,
175, 179, 181
kredit, 116

M

manajerial, 82
manipulasi, 10, 172, 206
manufaktur, 5, 9, 20, 35, 39,
68, 140, 207
metodologi, 155, 156, 160,
161, 165, 167, 168
moneter, 22, 46, 81

O

otoritas, 138

P

proyeksi, 110, 113, 126, 219,
232

R

real-time, 5, 6, 10, 172, 190,
192, 200, 211, 214, 215, 218,
219, 220, 221
regulasi, 92, 201
relevansi, 16, 99, 111, 165,
175, 179, 200, 202
revolusi, 220

S

stabilitas, 13, 46, 60, 101, 109,
143, 197, 198

stakeholder, 56

suku bunga, 12, 19, 25, 29, 41,
46, 59, 204

T

tarif, 92

transformasi, 5, 7, 8, 9, 172,
173, 174

transparansi, 9

BIOGRAFI PENULIS



Natalia Magdalena R. Mamulak, S.T., M.M.

Lahir di Kupang, 28 Desember 1985. Lulus S1 di Jurusan Teknik Informatika-Universitas Katolik Widya Mandira Tahun 2007 dan S2 di Program Studi Magister Manajemen-Universitas Bina Nusantara Tahun 2009. Saat ini sebagai Dosen di Universitas Katolik Widya Mandira pada Program Studi Ilmu Komputer, Fakultas Teknik

SISTEM PENDUKUNG KEPUTUSAN BERBASIS MODEL DINAMIK

Buku ajar "Sistem Pendukung Keputusan Berbasis Model Dinamik" membahas konsep, metode, dan aplikasi praktis dari sistem pendukung keputusan (SPK) yang menggunakan pendekatan model dinamik. Buku ajar ini ditujukan bagi mahasiswa, dosen, peneliti, serta praktisi yang ingin mendalami cara kerja dan penerapan teknologi SPK untuk mendukung pengambilan keputusan yang kompleks dan berbasis data. Buku ajar ini bertujuan untuk mempermudah dalam memahami materi sekaligus memotivasi untuk menerapkan SPK berbasis model dinamik dalam lingkungan kerja maupun penelitian. Dengan kombinasi teori dan praktik yang seimbang, buku ajar ini menjadi referensi yang relevan dan bermanfaat bagi siapa saja yang ingin mengembangkan kemampuan analitis dan mendukung pengambilan keputusan yang lebih efektif.