

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan mengenai dasar teori yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini, mencakup teori manajemen rantai pasok dan logistik, konsep ketahanan (*resilience*), konsep keberlanjutan (*sustainability*), permasalahan pemilihan pemasok dan alokasi pesanan, pemilihan keputusan kriteria majemuk, teori bilangan *fuzzy*, program linear, fungsi kerugian taguchi, dan konsep pemodelan sistem.

2.1 MANAJEMEN RANTAI PASOK DAN LOGISTIK

Menurut Bowersox, dkk., (2002) manajemen rantai pasok (atau terkadang disebut manajemen rantai nilai atau rantai permintaan) terdiri dari berbagai perusahaan yang berkolaborasi untuk meningkatkan posisi strategis dan untuk meningkatkan efisiensi operasi. Untuk setiap perusahaan yang terlibat, hubungan rantai pasok mencerminkan pilihan strategis. Strategi rantai pasok adalah pengaturan saluran berdasarkan ketergantungan dan manajemen hubungan yang diakui oleh pihak yang terlibat. Operasi rantai pasok membutuhkan proses manajerial yang menjangkau berbagai hal, mulai dari area fungsional dalam perusahaan, hubungan mitra dagang, serta pelanggan antar batas organisasi.

Kegiatan logistik berbeda dengan manajemen rantai pasok, logistik adalah kegiatan yang diperlukan untuk memindahkan dan menempatkan inventaris di sepanjang rantai pasok. Dengan demikian, logistik adalah bagian dari dan terjadi dalam kerangka kerja rantai pasok secara luas. Logistik adalah proses yang menciptakan nilai dengan pengaturan waktu dan penentuan posisi persediaan. Hal tersebut merupakan kombinasi dari manajemen pemesanan, inventaris, transportasi, pergudangan, penanganan bahan, dan pengemasan yang terintegrasi di seluruh jaringan fasilitas perusahaan. Logistik terintegrasi berfungsi untuk menghubungkan dan menyinkronkan rantai pasok secara keseluruhan sebagai proses yang kontinu dan sangat penting untuk konektivitas rantai pasok yang efektif. Walaupun tujuan pekerjaan logistik pada dasarnya tetap sama selama beberapa dekade, cara kerja yang dilakukan terus berubah secara radikal (Bowersox, dkk., 2002).

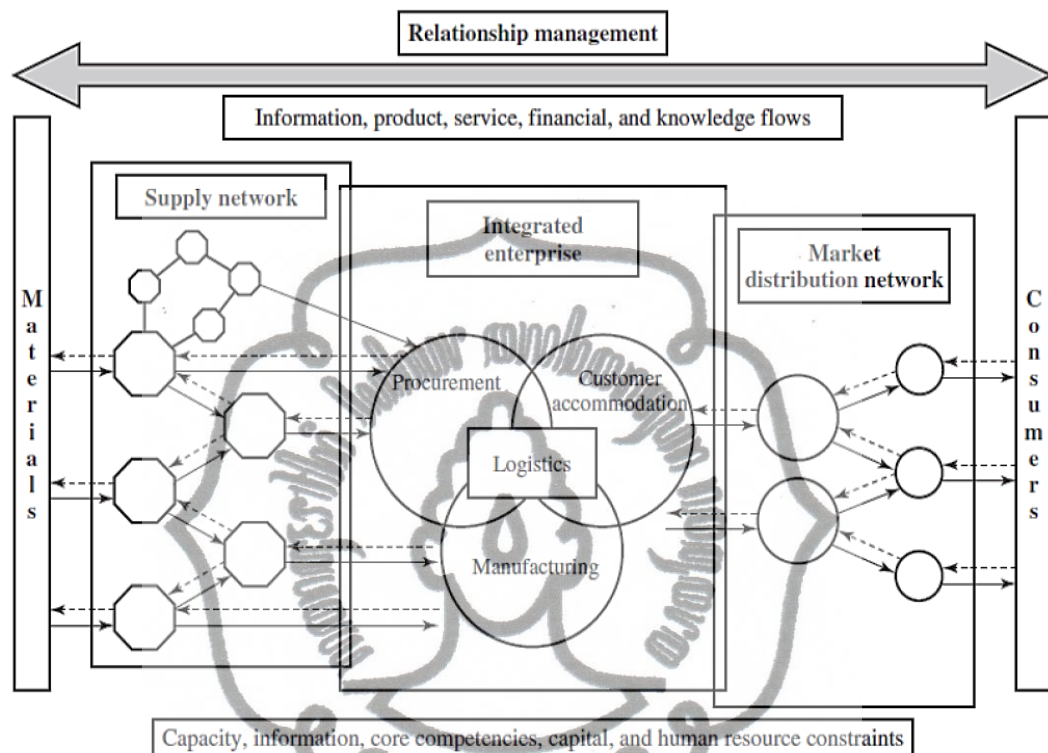
Sistem logistik memanfaatkan berbagai sumber daya dan layanan di dalam dan di luar perusahaan. Hubungan eksternal dilakukan karena pentingnya transportasi dan komunikasi dengan adanya investasi infrastruktur yang signifikan. Namun, penggunaan yang luas dari layanan eksternal juga mungkin disebabkan oleh berbagai fungsi yang harus dijalankan logistik dalam hal pengadaan dan distribusi. Selain itu, dimensi spasial-esensial dari kegiatan logistik membuat penyediaan dan kontrol kegiatan oleh perusahaan tunggal tidak mungkin untuk dilakukan. Oleh karena itu, perusahaan memikirkan dua hal yang sama-sama memiliki relevansi khusus. Hal pertama adalah pentingnya kinerja yang baik dalam mengelola hubungan timbal balik atau seberapa baik rantai pasok dikelola. Hal kedua adalah bahwa perusahaan di suatu wilayah atau negara cenderung mengalami tantangan dan peluang yang sama karena terdapatnya kondisi yang sama. Hal ini mungkin timbul mulai dari keadaan geografis yang sama seperti karakteristik infrastruktur bersama (seperti sistem informasi dan transportasi), hingga sikap budaya, politik, atau ekonomi yang dimiliki secara luas (Brewer, dkk., 2008).

Mencapai tingkat kinerja tinggi dalam kegiatan logistik sangat penting untuk profitabilitas perusahaan dan untuk efisiensi ekonomi nasional dan ekonomi global. Ketika perdagangan internasional sebagai persentase dari kegiatan domestik nasional meningkat, maka efek interaktif dari produktivitas logistik nasional dan internasional juga meningkat. Maka dapat dimengerti bahwa perusahaan dan negara tertarik pada ukuran kinerja yang terjadi di tingkat makro (Brewer, dkk., 2008).

Konsep umum dari rantai pasok (*supply chain*) terintegrasi biasanya digambarkan oleh diagram garis yang menghubungkan perusahaan yang berpartisipasi ke dalam unit kompetitif yang terkoordinasi. Gambar 2.1 menggambarkan model umum yang diadaptasi dari program manajemen rantai pasok di Michigan State University (Bowersox, dkk., 2002).

Konteks rantai pasok terintegrasi adalah manajemen hubungan multifirma dalam suatu kerangka kerja yang ditandai oleh keterbatasan kapasitas, informasi, kompetensi inti, modal, dan kendala sumber daya manusia. Dalam konteks ini, struktur dan strategi rantai pasok dibuat dalam upaya menghubungkan secara operasional antara perusahaan dengan pelanggan serta antara jaringan distribusi dengan pemasok untuk mendapatkan keunggulan kompetitif. Karena itu, operasi

bisnis diintegrasikan mulai dari pembelian bahan baku atau material hingga pengiriman produk dan/atau layanan kepada pelanggan akhir (Bowersox, dkk., 2002).



Gambar 2.1 Model Rantai Pasok Umum (Bowersox, dkk., 2002)

Nilai yang dihasilkan dari sinergi antara perusahaan yang berada dalam rantai pasok berhubungan dengan lima aliran kritis yaitu: informasi, produk, layanan, keuangan, dan pengetahuan (disimbolkan oleh panah dua arah pada Gambar 2.1). Logistik adalah saluran utama aliran produk dan layanan dalam pengaturan rantai pasok. Setiap perusahaan yang terlibat dalam rantai pasok juga terlibat dalam kegiatan logistik. Kegiatan logistik dapat diintegrasikan dalam perusahaan tersendiri maupun dalam keseluruhan kinerja rantai pasok atau tidak diintegrasikan sama sekali (Bowersox, dkk., 2002).

Globalisasi sangat berpengaruh pada perkembangan manajemen rantai pasok. Globalisasi telah membuka jalur untuk pemenuhan permintaan dari berbagai macam belahan dunia, sehingga menghasilkan potensi penjualan yang besar bagi perusahaan yang terlibat dalam bisnis global. Selain potensi penjualan, keterlibatan dalam bisnis global didorong oleh peluang yang signifikan untuk meningkatkan

efisiensi operasi. Efisiensi operasional semacam itu dapat dicapai melalui tiga bidang. Pertama, pasar global menawarkan peluang signifikan untuk sumber bahan baku dan komponen yang strategis. Kedua, keuntungan dari sisi rekrutmen pekerja dapat diperoleh dengan menempatkan fasilitas manufaktur dan distribusi di negara-negara berkembang. Ketiga, undang-undang perpajakan yang menguntungkan dapat membuat kinerja operasi pertambahan nilai (*value adding operation*) di negara-negara tertentu menjadi sangat menarik (Bowersox, dkk., 2002).

Keputusan untuk terlibat dalam operasi global untuk mencapai pertumbuhan pasar dan meningkatkan efisiensi operasional dapat dilakukan seiring dengan pertumbuhan ekspansi bisnis. Biasanya, perusahaan memasuki pasar global dengan melakukan operasi impor dan ekspor. Transaksi impor dan ekspor semacam itu merupakan bagian penting dari bisnis global. Tahap selanjutnya adalah melibatkan pembentukan eksistensi perusahaan di negara-negara asing dan wilayah perdagangan. Pembentukan eksistensi perusahaan dapat berupa waralaba dan lisensi bisnis hingga pendirian fasilitas manufaktur dan distribusi. Perbedaan penting antara keterlibatan impor-ekspor dan pembentukan eksistensi perusahaan adalah tingkat investasi dan karakteristik keterlibatan manajerial. Tahap terakhir adalah pelaksanaan penuh operasi bisnis melintasi batas-batas internasional. Fase keterlibatan internasional (internasionalisasi) paling akhir ini, biasanya disebut sebagai globalisasi (Bowersox, dkk., 2002).

Logistik internasional melibatkan empat perbedaan signifikan dibandingkan dengan operasi logistik nasional atau regional. Pertama, jarak operasi pesanan ke pengiriman secara signifikan lebih besar pada skala internasional dibandingkan dengan bisnis dalam negeri. Kedua, dokumentasi transaksi bisnis yang diperlukan jauh lebih kompleks karena harus mengakomodasi undang-undang dan peraturan pada semua badan pemerintahan. Ketiga, operasi logistik internasional harus dirancang untuk menghadapi keragaman yang signifikan dalam praktik kerja dan lingkungan operasi lokal. Terakhir, akomodasi terhadap variasi budaya dalam cara konsumen menuntut produk dan layanan sangat penting untuk keberhasilan operasi logistik. Penting untuk dipahami bahwa kesuksesan rantai pasok global sesuai dengan penguasaan perusahaan mengenai tantangan logistik (Bowersox, dkk., 2002).

2.2 MANAJEMEN RESIKO RANTAI PASOK

Menurut Zsidisin dan Ritchie (2009) definisi awal dari terminologi rantai pasok biasanya mencakup keterkaitan tahap-tahap mulai dari bahan baku atau sumber komoditas yang diproses melalui kegiatan pengolahan, penyimpanan, dan transportasi sampai akhirnya dikonsumsi oleh konsumen akhir. Hal ini mungkin menunjukkan bahwa rantai pasok secara luas sangat berkaitan dengan logistik. Namun, konseptualisasi terminologi rantai pasok dalam konteks bidang *Supply Chain Management* (SCM) atau manajemen rantai pasok secara signifikan lebih beragam. Sebelumnya, manajemen rantai pasok biasanya merupakan aktivitas reaktif dari manajemen yang berusaha melindungi bisnis dari resiko gangguan atau disrupsi pada rantai pasok, terutama dari pemasok hulu utama. Hal ini juga biasanya terkait dengan penilaian persediaan penyangga (*buffer stock*) untuk meminimalkan konsekuensi yang tidak diinginkan dari gangguan tersebut.

Manajemen rantai pasok pada akhir-akhir ini menuntut pendekatan yang jauh lebih proaktif, strategis, dan korporat. Melalui keterlibatan dengan organisasi lain di seluruh rantai pasok, perusahaan dapat mencari keuntungan kompetitif yang berkelanjutan dan berprofitabilitas tinggi dengan menggunakan strategi yang lebih ramping (*lean*), tangkas (*agile*), tangguh (*resilient*), efisien, komprehensif, dan berfokus pada pelanggan. Perkembangan strategi ini mungkin tidak secara otomatis mengurangi resiko tetapi dapat mengubah profil resiko yang dihadapi. Oleh karena itu, SCRM (*Supply Chain Risk Management*) atau manajemen resiko rantai pasok adalah konsep yang diperlukan sejalan dengan perkembangan pesat pada bidang manajemen rantai pasok (Zsidisin dan Ritchie, 2009).

Singkatnya, manajemen rantai pasok bukan lagi kegiatan reaktif murni yang berupaya meningkatkan kapasitas organisasi untuk menyerap potensi gelombangkejut eksternal sembari berupaya meminimalkan disrupsi. Melainkan aktivitas yang lebih proaktif dengan melibatkan jaringan kompleks mitra pada hulu (*upstream*) dan hilir (*downstream*) yang secara kolektif mencari cara untuk meningkatkan keunggulan kompetitif, nilai tambah, kerampingan dan ketangkasan operasi, serta profitabilitas yang tinggi bersamaan dengan mengelola interaksi resiko yang lebih kompleks (Zsidisin dan Ritchie, 2009).

Menurut Donald Waters (2007) manajemen resiko rantai pasok adalah proses mengidentifikasi, menganalisis, dan menangani resiko secara sistematis terhadap rantai pasok. Tujuan umum dari manajemen resiko rantai pasok adalah untuk memastikan bahwa rantai pasok terus bekerja sesuai rencana, dengan aliran material yang lancar dan tidak terputus dari pemasok awal hingga pelanggan akhir.

Manajemen resiko rantai pasok bertanggung jawab atas semua aspek resiko pada rantai pasok. Secara khusus, memastikan bahwa prinsip-prinsip yang ditetapkan oleh manajer senior diterapkan pada resiko logistik. Jadi titik awal yang masuk akal untuk menerapkan kegiatan manajemen resiko rantai pasok adalah melakukan analisis strategi resiko pada keseluruhan organisasi dan mengidentifikasi persyaratan logistiknya. Kemudian manajemen dapat merancang rencana jangka panjang dan strategi untuk resiko dalam rantai pasok, yang berisi semua tujuan jangka panjang, rencana, kebijakan, budaya, sumber daya, keputusan, dan tindakan yang berkaitan dengan resiko dalam rantai pasok. Unsur-unsur utama dari strategi ini biasanya disajikan dalam dokumen tertulis, yang disebut kebijakan resiko, rencana strategis, atau rencana manajemen (Waters, 2007).

Menurut Donald Waters (2007) terdapat lima tingkat integrasi untuk manajemen resiko rantai pasok:

1. Tingkat 1: Tidak ada manajemen resiko signifikan yang dilakukan di mana pun dalam rantai pasok.
2. Tingkat 2: Beberapa manajemen resiko dasar dilakukan dalam kegiatan logistik yang terpisah dalam beberapa organisasi.
3. Tingkat 3: Manajemen resiko dilakukan untuk fungsi logistik yang luas, tetapi dilakukan dalam beberapa organisasi yang terpisah.
4. Tingkat 4: Manajemen resiko diperluas dan dikoordinasikan disepanjang rantai pasok dengan melibatkan pemasok dan pelanggan tingkat pertama.
5. Tingkat 5: Manajemen resiko diperluas ke rantai pasok yang lebih besar.

Menurut Zsidisin dan Ritchie (2009) resiko dalam konteks rantai pasok dapat dikategorikan dalam sejumlah dimensi:

1. Disrupsi atau gangguan pada pasokan barang atau jasa, termasuk kualitas buruk dan kecacatan, yang menyebabkan *downtime* dan kegagalan memenuhi kebutuhan pelanggan dengan tepat waktu.
2. Volatilitas harga dapat mengakibatkan kesulitan untuk menyesuaikan perubahan harga kepada pelanggan dan memiliki konsekuensi pada kehilangan laba.
3. Produk atau layanan yang berkualitas buruk baik di hulu maupun di hilir, dapat berdampak pada tingkat kepuasan pelanggan dan memiliki konsekuensi pengaruh pada pendapatan di masa depan serta kemungkinan meningkatnya klaim langsung untuk kompensasi finansial.
4. Reputasi perusahaan yang biasanya dihasilkan oleh isu-isu yang tidak terkait langsung dengan rantai pasok itu sendiri namun dapat menimbulkan resiko. Komentar buruk yang tidak disengaja oleh eksekutif senior atau kegagalan untuk mendukung protokol tertentu dapat merusak reputasi organisasi.

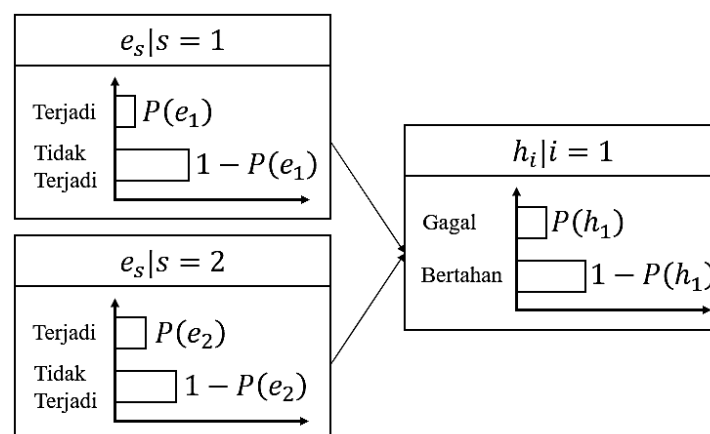
Kerentanan (*vulnerability*) adalah konsep yang dapat digunakan untuk mengkarakterisasi kurangnya kekokohan (*robustness*) atau ketahanan (*resilience*) sistem rantai pasok sehubungan dengan berbagai ancaman yang berasal baik di dalam maupun di luar batas-batas sistemnya. Kekokohan didefinisikan sebagai kemampuan sistem untuk menahan suatu peristiwa disrupsi dan kembali berjalan untuk melakukan fungsi yang dimaksud dan mempertahankan situasi stabil yang sama seperti sebelum kejadian disrupsi terjadi. Ketahanan dapat didefinisikan sebagai kemampuan sistem untuk kembali ke situasi stabil yang baru setelah peristiwa disrupsi terjadi. Dengan demikian, sistem yang kokoh (*robust*) memiliki kemampuan untuk melawan, sementara sistem yang tangguh (*resilient*) memiliki kemampuan untuk beradaptasi (Zsidisin dan Ritchie, 2009).

Resiko mengarah pada kerentanan fungsi yang mengancam sistem logistik atau rantai pasok. Untuk mengatasi kerentanan ini, manajemen harus membuat sistem logistik dan rantai pasok yang tangguh (*resilient*). Sehingga, manajemen harus mempelajari dan memiliki pengetahuan yang baik agar dapat mengarahkan perencanaan dan manajemen logistik yang tangguh. Teori keselamatan (*safety*

theory) dan salah satu pendekatan kontempornya, rekayasa ketahanan (*resilience engineering*) merupakan sumber pengetahuan yang baik untuk melakukan pengembangan dan perencanaan (Zsidisin dan Ritchie, 2009). Menurut Hollnagel, dkk. (2006) rekayasa ketahanan adalah paradigma dalam manajemen keselamatan yang berfokus pada bagaimana membantu sistem mengatasi kompleksitas di bawah tekanan untuk mencapai suatu tujuan.

Resiko dalam sistem rantai pasok dapat berupa resiko operasional maupun resiko disrupti. Resiko operasional merupakan resiko yang mungkin terjadi setiap hari dan melekat dalam proses rantai pasok, seperti ketidakpastian biaya, *lead time*, kapabilitas produksi pemasok, ketidakhadiran personel, pemadaman listrik, dan lain sebagainya. Sementara, resiko disrupti mengacu pada peristiwa gangguan yang besar (Hosseini dan Baker, 2016). Kecelakaan kerja, sabotasi, demonstrasi dan mogok kerja (*labor strike*) merupakan sebagian kecil dari banyaknya resiko disrupti internal (*internal-driven risk*). Sedangkan, epidemi, konflik militer, serangan terorisme, ketidakstabilan sosial-politik, kerusuhan sipil, maupun bencana alam seperti gempa bumi, tsunami, banjir, dan angin topan merupakan beberapa jenis resiko disrupti eksternal (*external-driven risk*) (Bode, dkk., 2013).

Dalam beberapa model rantai pasok tangguh (*resilient supplier chain*), seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Hosseini, dkk. (2019), digunakan model grafis probabilistik (*probabilistic graphical model*) untuk memodelkan kemungkinan terjadinya skenario disrupti.



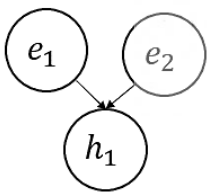
Gambar 2.2 *Probabilistic Graphical Model* Disrupti pada Sistem Produksi Pemasok (Hosseini, dkk., 2019)

Model grafis probabilistik didasarkan pada teori jaringan Bayesian. Jaringan Bayesian adalah grafik asiklik berarah yang terdiri dari satu himpunan simpul (*node*) dan busur (*arc*), di mana simpul mewakili variabel acak dan busur mewakili ketergantungan di antara variabel acak tersebut. Busur dari simpul A ke simpul B merepresentasikan asumsi bahwa terdapat ketergantungan kausal atau pengaruh langsung dari A ke B. Simpul A kemudian dikatakan sebagai simpul *parent* dari simpul B dan simpul B merupakan simpul *child* dari simpul A.

Dalam kasus gangguan pemasok, simpul merepresentasikan h_i yang merupakan kondisi (*state*) pemasok i yang dapat berupa dua *state*, di mana pemasok bertahan dan beroperasi ($h_i = \text{bertahan}$) dan di mana pemasok gagal beroperasi ($h_i = \text{gagal}$) setelah beberapa kejadian gangguan (e_1 dan e_2) terjadi.

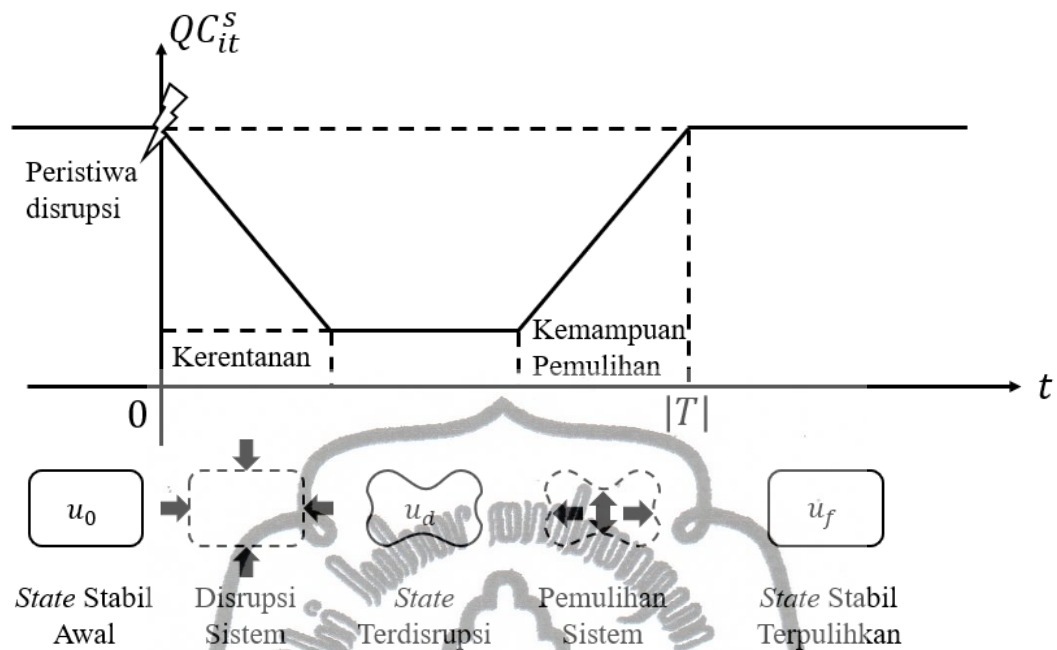
Untuk menghitung kemungkinan probabilitas gangguan pada pemasok, digunakan teknik *Noisy-OR* (*Operational Research*). Pada tabel berikut, dijelaskan penentuan probabilitas gangguan pemasok yang disebabkan oleh dua kejadian disruptif.

Tabel 2.1 Probabilitas Disrupsi Pemasok (Hosseini, dkk., 2019)

Jaringan	State	$P(h_1 u_i)$	$P(u_i)$
	$u_1 = \{\sim e_1, \sim e_2\}$	α_{h_1}	$(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)$
	$u_2 = \{\sim e_1, e_2\}$	$1 - (1 - \alpha_{h_1})(1 - \beta_{h_1 e_2})$	$(1 - \alpha_1)\alpha_2$
	$u_3 = \{e_1, \sim e_2\}$	$1 - (1 - \alpha_{h_1})(1 - \beta_{h_1 e_1})$	$\alpha_1(1 - \alpha_2)$
	$u_4 = \{e_1, e_2\}$	$1 - (1 - \alpha_{h_1})(1 - \beta_{h_1 e_1})(1 - \beta_{h_1 e_2})$	$\alpha_1\alpha_2$
	$F_{h_1} = \sum_{u_i} P(h_1 u_i) \times P(u_i)$		

Di mana, α_{e_1} dan α_{e_2} merupakan probabilitas terjadinya kejadian e_1 dan e_2 . α_{h_1} adalah probabilitas di mana pemasok terdisrupsi bila kejadian e_1 dan e_2 tidak terjadi. $\beta_{h_1|e_1}$ dan $\beta_{h_1|e_2}$ adalah probabilitas di mana pemasok terdisrupsi bila kejadian e_1 atau e_2 terjadi.

Dalam model yang dikembangkan oleh Hosseini, dkk. (2019), digunakan prinsip kerentanan (*vulnerability*) dan kemampuan pemulihan (*recoverability*) dari kapasitas pemasok saat menghadapi gangguan. Grafik berikut menjelaskan keadaan sistem selama menghadapi gangguan.



Gambar 2.3 Kerentanan dan Kemampuan Pemulihan Kapasitas Produksi Pemasok (Hosseini, dkk., 2019)

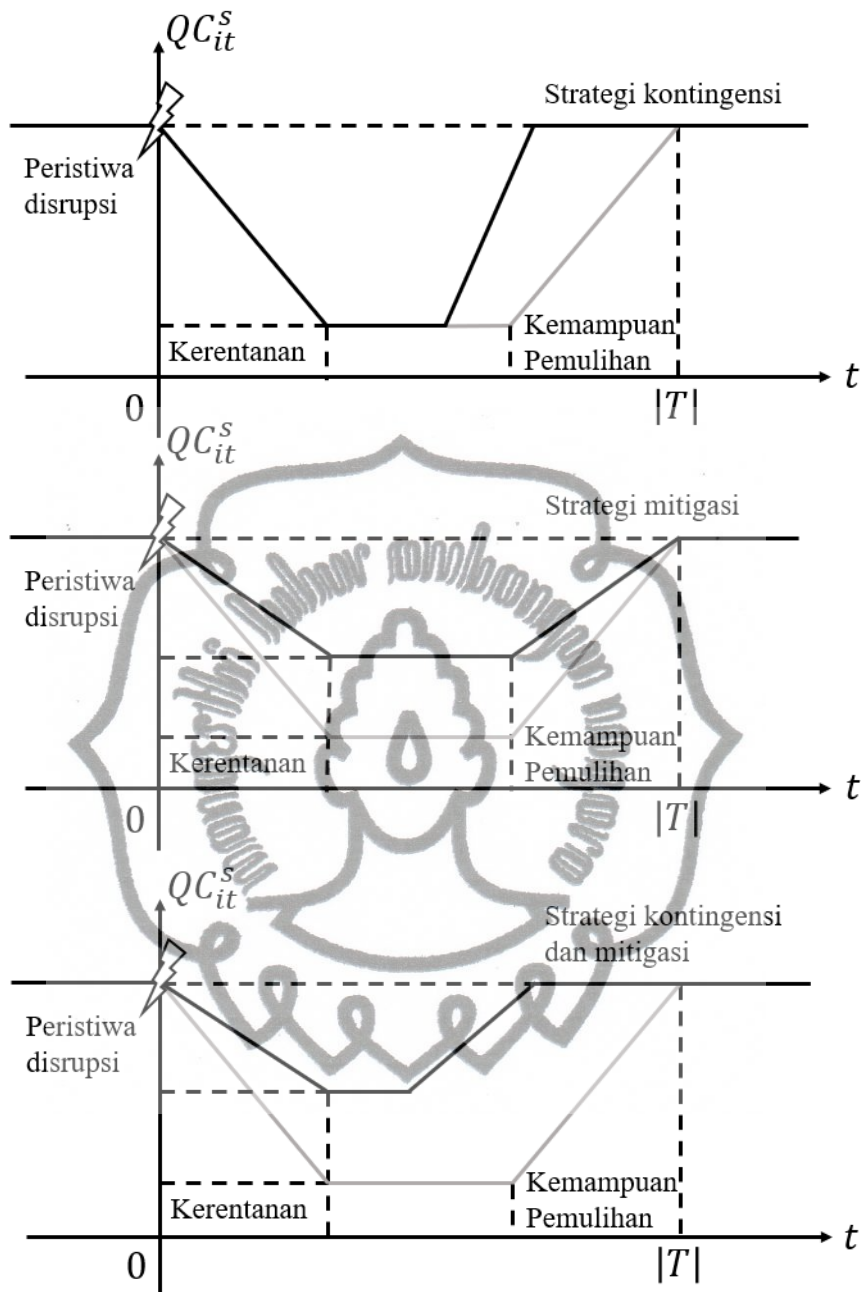
Kejadian disruptsi dapat mengurangi kapasitas pemasok seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.3. Penurunan kapasitas ditentukan oleh kerentanan sistem terhadap disruptsi sementara peningkatan kapasitas ditentukan oleh kemampuan pemulihan sistem.

Terdapat tiga kondisi (*state*) sistem selama terjadinya disruptsi, kondisi ini mencakup kondisi stabil awal (*stable original state*), kondisi terdisrupsi (*disrupted state*), dan kondisi stabil terpulihkan (*stable recovered state*). Di mana, disruptsi sistem dipengaruhi oleh kerentanan sistem dan pemulihan sistem dipengaruhi oleh kemampuan pemulihan sistem.

Biaya ketahanan (*resilience cost*) pada umumnya terdiri dari biaya mitigasi dan biaya kontingensi. Biaya kontingensi dikeluarkan pamanufaktur untuk meningkatkan kemampuan pemulihan. Sementara biaya mitigasi dikeluarkan pamanufaktur untuk mengurangi kerentanan sistem.

Alokasi biaya untuk melaksanakan strategi kontingensi dan mitigasi sangat berdampak pada perilaku sistem saat menghadapi peristiwa disruptsi. Oleh karena itu, pemilihan proporsi biaya yang tepat sangat penting untuk dilakukan.

Berikut adalah pengaruh dari alokasi biaya untuk strategi kontingensi dan investasi untuk strategi mitigasi.



Gambar 2.4 Strategi Kontingensi dan Mitigasi pada Kerentanan dan Kemampuan Pemulihan (Hosseini, dkk., 2019)

2.3 SISTEM RANTAI PASOK BERKELANJUTAN

Menurut Cetinkaya, dkk. (2011), definisi rantai pasok berkelanjutan (*sustainable supply chain*) tidak terbatas pada apa yang disebut dengan rantai pasok hijau (*green supply chain*), tetapi dengan menyadari bahwa untuk benar-benar berkelanjutan, rantai pasok harus beroperasi dalam struktur keuangan yang realistis, serta memberikan nilai tambah bagi masyarakat sekitar. Rantai pasok tidak akan

berkelanjutan kecuali mereka didanai dan dinilai secara realistis. Dengan demikian, definisi akhir manajemen rantai pasok berkelanjutan harus memperhitungkan semua masalah ekonomi, sosial, dan lingkungan yang relevan.

Menurut Grant, dkk. (2015) rantai pasok berkelanjutan juga harus mempertimbangkan perusahaan hulu (*upstream*) dan hilir (*downstream*) pada jaringan rantai pasok. Persyaratan dan kode perilaku pemasok dapat digunakan untuk memastikan bahwa pemasok dan pelanggan berperilaku dengan cara yang bertanggung jawab secara sosial dan lingkungan. Selain itu, keberlanjutan juga berarti bahwa perusahaan dapat membuktikan apakah sumber dari produk (*product sourcing*) benar-benar didapatkan dengan cara yang sesuai dengan prinsip keberlanjutan (*sustainability*).

Definisi untuk keberlanjutan (*sustainability*) pada Collins English Dictionary adalah mampu mempertahankan sesuatu pada tingkat yang stabil tanpa menghabiskan sumber daya alam atau menyebabkan kerusakan ekologis yang parah. Makna ini menyorot hal penting bahwa inisiatif perusahaan untuk keberlanjutan lingkungan alam juga perlu mempertimbangkan perihal ekonomi untuk keberlanjutan perusahaan jangka panjang (Grant, dkk., 2015).

Keberlanjutan dikaitkan pula dengan tanggung jawab sosial perusahaan atau *Corporate Social Responsibility* (CSR) karena perusahaan yang bertanggung jawab secara sosial harus memastikan bahwa dampak yang ditimbulkannya terhadap lingkungan alam adalah minimum. CSR juga memasukkan aspek-aspek seperti perdagangan yang adil, praktik ketenagakerjaan yang baik, dan hubungan yang sesuai dengan pelanggan, pemasok, dan pemangku kepentingan lainnya.

Keterkaitan dengan keberlanjutan dimanifestasikan oleh Elkington (1994) dalam konsep *Triple Bottom Line* (TBL) yang mencakup keuntungan (*profits*), bumi (*planet*), dan manusia (*people*). TBL berpendapat bahwa perusahaan harus berfokus dalam memaksimalkan kekayaan pemegang saham atau nilai ekonomi yang mereka ciptakan selagi memastikan bahwa dilakukan pula penambahan nilai lingkungan dan sosial untuk mencapai keamanan lingkungan alam jangka panjang serta menjamin standar kerja dan kehidupan yang layak untuk masyarakat. Konsep TBL telah diterima secara luas di perusahaan, pemerintah, dan organisasi non-pemerintah (Grant, dkk., 2015).

Giannakis dan Papadopoulos (2016) menjelaskan bahwa keberlanjutan (*sustainability*) dapat didefinisikan sebagai kemampuan organisasi dalam membuat keputusan saat ini sehingga keputusan ini tidak akan memiliki efek yang merugikan bagi situasi masa depan lingkungan alam, masyarakat, dan kelayakan bisnis. Definisi ini menyatakan bahwa keberlanjutan memiliki tiga dimensi yang dapat diklasifikasikan sebagai lingkungan (*environmental*), ekonomi (*economical*) dan masyarakat (*social*).

Keberlanjutan sosial (*social sustainability*) berfokus pada hak asasi manusia, pendidikan, dan pelatihan pekerja sedangkan keberlanjutan ekonomi (*economical sustainability*) bermaksud untuk memaksimalkan aliran pendapatan yang dapat dihasilkan selagi meminimalkan stok aset atau modal yang berfungsi sebagai penghasil pendapatan ini (Molamohamadi, dkk., 2013). Di sisi lain, keberlanjutan atau kelestarian lingkungan (*environmental sustainability*) secara umum terkait dengan tingkat kelangkaan sumber daya, baik yang terbarukan maupun tidak terbarukan serta pencemaran lingkungan.

Rantai pasok berkelanjutan membantu untuk memastikan bahwa kebutuhan generasi saat ini dapat terpenuhi tanpa mengorbankan kemampuan generasi masa depan untuk memenuhi kebutuhan mereka sendiri (Morelli, 2011). Dalam konteks manajemen rantai pasok, keberlanjutan lingkungan dapat diatur dalam undang-undang lingkungan serta memastikan bahwa kegiatan organisasi harus mematuhi undang-undang lingkungan tersebut. Perusahaan tidak boleh menempatkan resiko pada ekosistem serta diharuskan untuk meminimalkan penggunaan air dan energi sehingga dapat mengurangi polusi lingkungan, cacatan, dan kelebihan produksi (*over-production*) (Goren, 2018).

Abukhader dan Jonson (2004) mengajukan dua pertanyaan menarik mengenai logistik, manajemen rantai pasok, dan lingkungan alam. Pertama, adalah apa dampak logistik terhadap lingkungan dan yang kedua adalah apa dampak lingkungan terhadap logistik. Dampak logistik terhadap lingkungan adalah pertanyaan yang lebih mudah dijawab tetapi pertanyaan kedua agak lebih sulit untuk dikonseptualisasi. Namun, sebuah contoh dapat menggambarkan pertanyaan ini. Kapas tidak tumbuh secara alami di banyak negara di garis lintang utara. Jadi, jika orang yang tinggal di negara-negara Eropa Utara atau Kanada menginginkan

pakaian katun atau produk kapas lainnya, beberapa bentuk kegiatan logistik seperti transportasi dan/atau pergudangan akan diperlukan untuk membawa kapas ke negara-negara ini. Namun, masalah utama mengenai logistik atau rantai pasok di sini adalah apakah kapas yang dikirimkan harus dalam bentuk bahan baku atau barang jadi. Jawabannya bergantung pada desain sistem logistik dan rantai pasok yang ada. Abukhader dan Jonson (2004) juga mengemukakan bahwa ada tiga tema utama mengenai logistik dan manajemen rantai pasok berkelanjutan, yaitu:

1. *Reverse logistic*
2. Penilaian emisi
3. Penghijauan kegiatan logistik dan rantai pasok

Ketika Abukhader dan Jonson menulis artikel mereka, sedikit disinggung mengenai penggunaan penilaian siklus hidup atau *Life Cycle Assessment (LCA)* dalam logistik dan manajemen rantai pasok serta terdapat sedikit pertimbangan dampak lingkungan di luar analisis biaya-manfaat (*cost-benefit analysis*).

2.4 PEMILIHAN PEMASOK DAN ALOKASI PESANAN

Bahan baku dan komponen mewakili persentase yang signifikan dari total biaya produk, sehingga pemilihan pemasok (*supplier selection*) adalah masalah kritis yang dihadapi perusahaan. Pentingnya pemilihan pemasok juga meningkat karena inisiatif *outsourcing* di mana perusahaan lebih mengandalkan pemasok untuk meningkatkan kualitas produk, mengurangi biaya, atau berfokus pada bagian tertentu dari operasi mereka. Dengan demikian, pemilihan pemasok merupakan keputusan strategis. Masalah pemilihan pemasok (*supplier selection problem*) dapat berupa masalah sumber tunggal (*single sourcing*), di mana satu pemasok dipilih untuk memenuhi seluruh permintaan perusahaan, atau masalah sumber jamak (*multi sourcing*), di mana lebih dari satu pemasok dipilih (Hamdan dan Cheaitou, 2016).

Dalam *multi sourcing*, masing-masing pemasok menyediakan sejumlah produk dengan serangkaian kendala. Mengandalkan satu pemasok hanya meningkatkan resiko disrupsi dalam rantai pasok, sementara bergantung pada banyak pemasok dapat menimbulkan peningkatan biaya pemesanan, seperti biaya administrasi dan negosiasi. Namun, pemasok jamak lebih dipilih daripada pemasok

tunggal karena dapat memungkinkan fleksibilitas pesanan. Pemilihan pemasok adalah proses pengambilan keputusan kriteria majemuk atau *Multi-Criteria Decision-Making* (MCDM) yang kompleks di mana dipertimbangkan faktor kualitatif dan kuantitatif untuk memilih pemasok yang dapat diandalkan. Kompleksitas ini berasal dari faktor-faktor yang tidak dapat diprediksi (*unpredictable*) dan tidak terkendali (*uncontrollable*) yang tidak pasti (*uncertain*) dan saling bertentangan (Hamdan dan Cheaitou, 2016).

Pemilihan pemasok adalah kegiatan yang terpenting dari fungsi pembelian (*purchasing*) karena berkontribusi dalam meningkatkan strategi kompetitif dan pangsa pasar global karena dapat mengurangi biaya operasional seperti biaya pemeliharaan, memperbesar total laba rantai pasok, menawarkan produk-produk berkualitas tinggi, dan meningkatkan kinerja rantai pasok. Dalam kompetisi global saat ini, ekspektasi pelanggan telah meningkat, ekspektasi ini tidak dapat dijelaskan hanya dengan biaya produk yang lebih rendah, karena pelanggan juga menginginkan keunggulan pada kualitas, waktu tunggu (*lead time*), jaminan, dan banyak kriteria lain yang menjadikan pemilihan pemasok sebagai masalah multi-kriteria. Pada kasus konvensional, masalah pemilihan pemasok dan alokasi pemesanan atau *Supplier Selection and Order Allocation Problem* (SS-OAP) tidak mempertimbangkan efek dan masalah lingkungan serta sosial. Kasus ini hanya berfokus pada biaya produk, waktu pengiriman, dan kualitas, yang dianggap sebagai bagian dari kriteria tradisional (Hamdan dan Cheaitou, 2016).

SS-OAP terdiri dari dua tahapan yaitu pemilihan pemasok atau *supplier selection* dan alokasi kuantitas pesanan atau *order allocation*. Langkah pertama adalah menentukan kriteria yang diperlukan untuk mengevaluasi pemasok, dan melakukan pembobotan pada setiap pemasok melalui kriteria yang telah didefinisikan. Pada langkah kedua, dilakukan penyelesaian masalah alokasi pesanan agar ukuran pesanan yang dialokasikan pada pemasok yang terpilih dapat ditentukan dengan tepat yaitu sesuai dengan tujuannya, baik meminimalkan biaya, memaksimalkan nilai pembelian (*value of purchasing*), atau memaksimalkan keuntungan (Goren, 2018).

Banyak pendekatan yang dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan SS-OAP. Mulai dari pendekatan MADM (*Multi Attribute Decision*

Making), optimisasi, hingga pendekatan hibrid dari keduanya (Hamdan dan Cheaitou, 2016). Berikut adalah contoh model dasar untuk SS-OAP menggunakan optimisasi program linear bilangan bulat campuran multi-objektif atau *Multi-Objective Mixed Integer Linear Programming* (MO-MILP) yang dikembangkan oleh Demirtas dan Ustun (2008). Model ini memiliki tiga fungsi tujuan, yaitu untuk meminimalkan total biaya, memaksimalkan nilai pembelian (*value of purchasing*), dan meminimalkan rasio kecacatan pada produk.

$$\min f_1(X, Y) = \sum_{i=1}^n C_i X_i + \sum_{i=1}^n O_i Y_i \quad (2.1)$$

$$\min f_2(X) = \sum_{i=1}^n X_i q_i \quad (2.2)$$

$$\max f_3(X) = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (2.3)$$

Dibatasi oleh:

$$X_i \leq V_i Y_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.4)$$

$$\sum_{i=1}^n X_i \geq D \quad (2.5)$$

Di mana W_i merupakan bobot (*weight*) normal pemasok ke- i yang didapatkan dari penentuan bobot melalui pendekatan MADM. X_i adalah kuantitas pesan pada pemasok ke- i . V_i merupakan kapasitas pemasok ke- i . Y_i adalah bilangan biner yang bernilai nol jika dilakukan pemesanan pada pemasok ke- i dan bernilai satu jika tidak dilakukan pemesanan pada pemasok ke- i . C_i merupakan biaya unit (*unit cost*) barang pada pemasok ke- i . O_i adalah biaya pesan (*ordering cost*) pada pemasok ke- i . D merupakan banyaknya permintaan (*demand*) pada suatu periode. Sementara, q_i adalah rasio kecacatan produk.

2.5 TEORI HIMPUNAN FUZZY

Menurut Hans J. Zimmermann (2010), teori himpunan *fuzzy* pada dasarnya adalah teori konsep bertingkat, teori di mana segala sesuatu adalah permasalahan mengenai tingkatan, atau jika dikatakan secara figuratif semuanya memiliki elastisitas. Permasalahan penting dalam teori himpunan *fuzzy* yang tidak memiliki

padanan dalam teori himpunan *crisp* berkaitan dengan kombinasi himpunan *fuzzy* melalui disjungsi dan konjungsi.

Sebagian besar alat tradisional untuk pemodelan formal, penalaran, dan komputasi sifatnya *crisp*, deterministik, dan tepat. *Crispness* merujuk pada istilah dikotomis, yaitu nilai ya atau tidak, bukan nilai lebih atau kurang. Dalam logika biner konvensional, misalnya, pernyataan bisa benar atau salah dan tidak ada nilai lain di antaranya. Situasi nyata seringkali tidak *crisp* dan deterministik, serta tidak dapat dideskripsikan dengan tepat. Deskripsi lengkap tentang sistem nyata seringkali membutuhkan data yang jauh lebih terperinci daripada yang bisa dikenali secara terus-menerus, diproses, dan dipahami oleh manusia. Oleh karena itu, terdapat beberapa pendekatan yang dilakukan, diantaranya adalah dengan menggunakan konsep probabilitas. Probabilitas Kolmogoroff pada dasarnya bersifat *frequentistic* dan didasarkan pada pertimbangan *set-theoretic*. Sementara, probabilitas Koopman merujuk pada kebenaran pernyataan dan karenanya didasarkan pada logika. Dalam kedua jenis pendekatan probabilistik tersebut, diasumsikan bahwa masing-masing peristiwa (anggota dari himpunan) atau pernyataan terdefinisi dengan baik. Kita akan menyebut jenis ketidakpastian (*uncertainty*) atau ketidakjelasan (*vagueness*) ini sebagai ketidakpastian stokastik. Berbeda dengan ketidakjelasan mengenai deskripsi makna semantik dari peristiwa, fenomena, atau pernyataan itu sendiri, yang disebut sebagai *fuzziness* (ketidakjelasan) (Zimmermann, 2010).

Menurut Hans J. Zimmermann (2010), gagasan himpunan *fuzzy* memberikan titik tolak yang baik untuk pembangunan kerangka kerja konseptual. Pada dasarnya, kerangka kerja (*framework*) ini memberikan cara untuk menangani permasalahan di mana sumber ketidaktepatan (*imprecision*) adalah tidak adanya kriteria keanggotaan yang terdefinisi secara tajam daripada adanya variabel acak. Ketidaktepatan disini mengacu pada ketidakjelasan daripada kurangnya informasi mengenai nilai parameter.

2.5.1 Definisi Dasar Himpunan Fuzzy

Himpunan klasik (*crisp*) biasanya didefinisikan sebagai kumpulan anggota, elemen, atau objek $x \in X$ yang dapat memiliki sifat terbatas (*finite*), dapat dihitung (*countable*), atau dapat dihitung tanpa batas (*over-countable*). Setiap anggota atau

elemen tunggal dalam himpunan X dapat termasuk atau tidak termasuk dalam himpunan A , $A \subseteq X$. Dalam kasus pertama, pernyataan “ x termasuk pada A ” atau “ x merupakan anggota A ” adalah benar, sedangkan dalam kasus kedua pernyataan ini salah. Himpunan klasik tersebut dapat dijelaskan dengan beberapa cara yang berbeda, seperti (Zimmermann, 2010):

1. Menyebutkan (daftar) anggota yang terdapat pada himpunan, seperti $X = \{1,2,3,4,5\}$.
2. Menggambarkan himpunan secara analitis, misalnya, dengan menyatakan kondisi untuk keanggotaan, seperti $A = \{x|x \leq 5\}$
3. Mendefinisikan anggota dengan menggunakan fungsi karakteristik, di mana 1 menunjukkan keanggotaan dan 0 menunjukkan ketidak-anggotaan.

Untuk himpunan *fuzzy*, fungsi karakteristik memungkinkan berbagai tingkat keanggotaan untuk anggota himpunan tertentu. Jika X adalah himpunan objek yang dilambangkan secara umum oleh x , maka himpunan *fuzzy* \tilde{A} dalam X adalah himpunan pasangan berurutan:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) | x \in X\} \quad (2.6)$$

$\mu_{\tilde{A}}(x)$ disebut sebagai fungsi keanggotaan atau tingkat keanggotaan (dapat pula disebut tingkat kompatibilitas atau derajat kebenaran) dari x dalam A yang memetakan X ke ruang keanggotaan M . Ketika M hanya berisi dua titik 0 dan 1, \tilde{A} adalah himpunan *nonfuzzy* dan $\mu_{\tilde{A}}(x)$ identik dengan fungsi karakteristik dari himpunan *nonfuzzy*. Rentang fungsi keanggotaan adalah himpunan bagian dari bilangan real tidak negatif yang supremum-nya terbatas. Anggota atau elemen dengan derajat keanggotaan nol biasanya tidak terdaftar (Zimmermann, 2010). Supremum himpunan bagian S ($\sup\{S\}$) dari himpunan dengan tatanan parsial (*poset*) T adalah anggota terkecil dalam T yang lebih besar dari atau sama dengan semua anggota S , jika anggota tersebut ada. Supremum juga disebut sebagai batas atas paling rendah atau *Least Upper Bound* (LUB). Infimum himpunan bagian S ($\inf\{S\}$) dari himpunan dengan tatanan parsial (*poset*) T adalah anggota terbesar dalam T yang kurang dari atau sama dengan semua anggota S , jika anggota tersebut

ada. Oleh karena itu, istilah batas bawah terbesar atau *Greatest Lower Bound* (GLB) juga umum digunakan.

Menurut Hans J. Zimmermann (2010), dalam literatur dapat ditemukan beberapa cara yang berbeda untuk menunjukkan atau mendefinisikan himpunan *fuzzy*.

1. Representasi pasangan berurutan

Pada representasi ini, himpunan *fuzzy* dilambangkan dengan himpunan pasangan berurutan di mana anggota pertama menunjukkan anggota himpunan dan anggota kedua menunjukkan tingkat keanggotaan. Berikut merupakan contoh pemberian definisi pada himpunan *fuzzy* untuk himpunan bilangan real yang jauh lebih besar dari 10.

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) | x \in X\} \quad (2.7)$$

Di mana,

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 10 \\ (1 + (x - 10)^{-2})^{-1}, & x > 10 \end{cases} \quad (2.8)$$

Berikut merupakan contoh pemberian definisi pada himpunan *fuzzy* untuk himpunan bilangan real yang dekat dengan 10.

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) | \mu_{\tilde{A}}(x) = (1 + (x - 10)^2)^{-1}\} \quad (2.9)$$

2. Representasi fungsi keanggotaan

Pada representasi ini, himpunan *fuzzy* didefinisikan semata-mata hanya dengan menyatakan fungsi keanggotaannya misalnya,

$$\tilde{A} = \mu_{\tilde{A}}(x_1)/x_1 + \mu_{\tilde{A}}(x_2)/x_2 + \dots = \sum_{i=1}^n \mu_{\tilde{A}}(x_i)/x_i \text{ or } \int_x \mu_{\tilde{A}}(x)/x \quad (2.10)$$

Berikut merupakan contoh pemberian definisi pada himpunan *fuzzy* untuk himpunan bilangan bulat yang dekat dengan 10.

$$\tilde{A} = 0.1/7 + 0.5/8 + 0.8/9 + 1/10 + 0.8/11 + 0.5/12 + 0.1/13 \quad (2.11)$$

Berikut merupakan contoh pemberian definisi pada himpunan *fuzzy* untuk himpunan bilangan real yang dekat dengan 10.

$$\tilde{A} = \int_{\mathbb{R}} \frac{1}{1 + (x - 10)^2} / x \quad (2.12)$$

Telah disebutkan bahwa fungsi keanggotaan tidak terbatas pada nilai antara 0 dan 1. Jika $\sup_x \mu_{\tilde{A}}(x_1) = 1$, himpunan *fuzzy* \tilde{A} disebut normal.

Himpunan *fuzzy* tak kosong \tilde{A} dapat selalu dinormalisasi dengan membagi $\mu_{\tilde{A}}(x_1)$ dengan $\sup_x \mu_{\tilde{A}}(x)$. Umumnya himpunan akan dianggap himpunan *fuzzy* ternormalisasi.

Himpunan *fuzzy* jelas merupakan generalisasi dari himpunan klasik dan fungsi keanggotaan merupakan generalisasi dari fungsi karakteristik. Karena secara umum mengacu pada himpunan semesta (*crisp*) X , beberapa anggota dari himpunan *fuzzy* mungkin memiliki derajat keanggotaan nol. Seringkali perlu untuk mempertimbangkan anggota himpunan semesta yang memiliki tingkat keanggotaan nol dalam himpunan *fuzzy* (Zimmermann, 2010).

Support dari himpunan *fuzzy* \tilde{A} , $S(\tilde{A})$ adalah himpunan *crisp* dari semua $x \in X$ sehingga $\mu_{\tilde{A}}(x) > 0$. Himpunan anggota *crisp* yang termasuk dalam himpunan *fuzzy* \tilde{A} setidaknya sampai pada derajat α disebut sebagai himpunan α -level atau himpunan α -cut (A_α). Sementara A'_α disebut sebagai himpunan α -level kuat (*strong α -level set*) (Zimmermann, 2010).

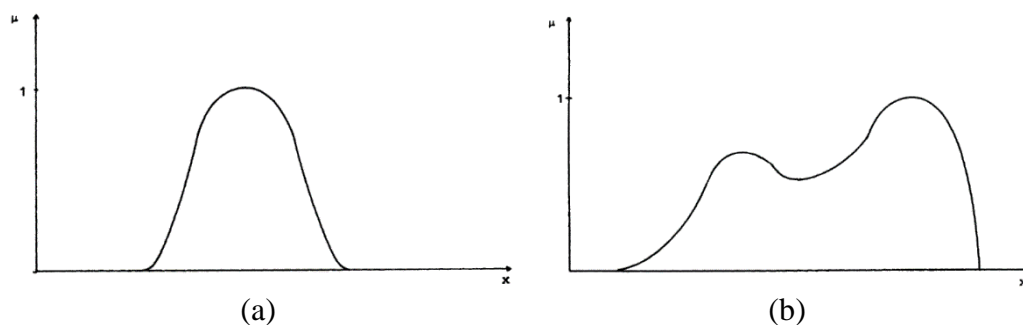
$$A_\alpha = \{x \in X | \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\} \quad (2.13)$$

$$A'_\alpha = \{x \in X | \mu_{\tilde{A}}(x) > \alpha\} \quad (2.14)$$

Konveksitas (*convexity*) juga berperan dalam teori himpunan *fuzzy*. Berbeda dengan teori himpunan klasik, kondisi konveksitas didefinisikan dengan mengacu pada fungsi keanggotaan daripada mengacu pada *support* himpunan *fuzzy*. Suatu himpunan *fuzzy* \tilde{A} konveks jika:

$$\mu_{\tilde{A}}(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \min\{\mu_{\tilde{A}}(x_1), \mu_{\tilde{A}}(x_2)\}, x_1, x_2 \in X, \lambda \in [0,1] \quad (2.15)$$

Atau, himpunan *fuzzy* konveks jika semua himpunan α -level juga konveks (Zimmermann, 2010).



Gambar 2.5 Grafik Fungsi, sumbu $y = \mu$ di mana: (a) Himpunan *Fuzzy* Konveks dan (b) Himpunan *Fuzzy* Tak Konveks (Zimmermann, 2010)

Untuk himpunan *fuzzy* \tilde{A} , kardinalitas $|\tilde{A}|$ didefinisikan sebagai:

$$|\tilde{A}| = \sum_{x \in X} \mu_{\tilde{A}}(x) \quad (2.16)$$

dan kardinalitas relatif dari \tilde{A} adalah:

$$\|\tilde{A}\| = \frac{|\tilde{A}|}{|X|} \quad (2.17)$$

Jelas, kardinalitas relatif dari himpunan *fuzzy* bergantung pada kardinalitas himpunan semesta. Jadi, harus memilih semesta yang sama jika ingin membandingkan himpunan *fuzzy* dengan kardinalitas relatif mereka (Zimmermann, 2010).

2.5.2 Operasi Dasar *Set-Theoretic*

Fungsi keanggotaan jelas merupakan komponen penting dari himpunan *fuzzy*. Oleh karena itu, tidak mengherankan bahwa operasi dengan himpunan *fuzzy* didefinisikan melalui fungsi keanggotaannya (Zimmermann, 2010).

Fungsi keanggotaan $\mu_{\tilde{C}}(x)$ dari irisan $\tilde{C} = \tilde{A} \cap \tilde{B}$ searah didefinisikan sebagai:

$$\mu_{\tilde{C}}(x) = \min\{\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)\}, \quad x \in X \quad (2.18)$$

Fungsi keanggotaan $\mu_{\tilde{D}}(x)$ dari gabungan $\tilde{D} = \tilde{A} \cup \tilde{B}$ searah didefinisikan sebagai:

$$\mu_{\tilde{D}}(x) = \max\{\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)\}, \quad x \in X \quad (2.19)$$

Fungsi keanggotaan dari komplemen himpunan *fuzzy* \tilde{A} , $\mu_{\tilde{A}^c}(x)$ didefinisikan sebagai:

$$\mu_{\tilde{A}^c}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x), \quad x \in X \quad (2.20)$$

Dengan menggunakan simbol \wedge untuk operasi irisan dan \vee untuk gabungan, dapat didefinisikan sifat-sifat operasi dari himpunan *fuzzy*, sebagai berikut:

1. Sifat komutatif

$$\mu_S \wedge \mu_T = \mu_T \wedge \mu_S \quad (2.21)$$

$$\mu_S \vee \mu_T = \mu_T \vee \mu_S \quad (2.22)$$

2. Sifat asosiatif

$$(\mu_S \wedge \mu_T) \wedge \mu_U = \mu_S \wedge (\mu_T \wedge \mu_U) \quad (2.23)$$

$$(\mu_S \vee \mu_T) \vee \mu_U = \mu_S \vee (\mu_T \vee \mu_U) \quad (2.24)$$

3. Sifat distributif

$$\mu_S \wedge (\mu_T \vee \mu_U) = (\mu_S \wedge \mu_T) \vee (\mu_S \wedge \mu_U) \quad (2.25)$$

$$\mu_S \vee (\mu_T \wedge \mu_U) = (\mu_S \vee \mu_T) \wedge (\mu_S \vee \mu_U) \quad (2.26)$$

Operasi di atas dapat dilakukan dengan beberapa syarat, yaitu:

4. $\mu_S \wedge \mu_T$ dan $\mu_S \vee \mu_T$ kontinu dan tidak menurun pada setiap komponen
5. $\mu_S \wedge \mu_S$ dan $\mu_S \vee \mu_S$ meningkat dengan ketat pada μ_S
6. $\mu_S \wedge \mu_T \leq \min(\mu_S, \mu_T)$ dan $\mu_S \vee \mu_T \geq \max(\mu_S, \mu_T)$
7. $1 \wedge 1 = 1$ dan $0 \vee 0 = 0$

Dari operasi di atas juga dapat diketahui bahwa,

$$\mu_{S \wedge T} = \min(\mu_S, \mu_T) \quad \text{dan} \quad \mu_{S \vee T} = \max(\mu_S, \mu_T) \quad (2.27)$$

Untuk komplement, akan masuk akal untuk mengasumsikan bahwa jika pernyataan S benar, komplementnya S^c adalah salah, atau jika $\mu_S = 1$ lalu $\mu_{S^c} = 0$ dan sebaliknya (Zimmermann, 2010).

2.5.3 Bilangan Fuzzy

Ketika interval didefinisikan pada bilangan real \mathbb{R} , interval ini dikatakan sebagai himpunan bagian dari \mathbb{R} . Misalnya, jika interval dinotasikan sebagai $A = [a_1, a_3]$, $a_1, a_3 \in \mathbb{R}$, $a_1 < a_3$, interval ini dapat dianggap sebagai satu himpunan. Ekspresi interval sebagai fungsi keanggotaan ditunjukkan sebagai berikut.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ 1, & a_1 \leq x \leq a_3 \\ 0, & x > a_3 \end{cases} \quad (2.28)$$

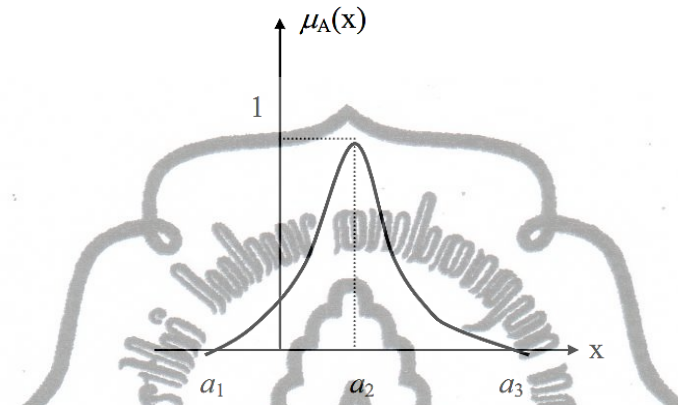
Jika $a_1 = a_3$ maka interval ini mengindikasikan sebuah titik, yaitu titik $[a_1, a_1] = a_1$ (Lee, 2005).

Menurut Kwang H. Lee (2005), bilangan fuzzy dinyatakan sebagai himpunan fuzzy yang mendefinisikan interval fuzzy dalam bilangan real \mathbb{R} . Karena batas interval ambigu, intervalnya juga merupakan himpunan fuzzy. Umumnya interval fuzzy diwakili oleh dua titik akhir a_1 dan a_3 serta titik puncak a_2 sebagai $[a_1, a_2, a_3]$, diilustrasikan seperti pada Gambar 2.6. Operasi α -cut juga dapat diterapkan dalam bilangan fuzzy. Jika dinyatakan interval α -cut untuk bilangan fuzzy A sebagai A_α , interval A_α didefinisikan sebagai:

$$A_\alpha = [\alpha_1^{(\alpha)}, \alpha_3^{(\alpha)}] \quad (2.29)$$

Definisi bilangan *fuzzy* adalah himpunan *fuzzy* yang sesuai dengan kondisi berikut (Lee, 2005):

1. Himpunan *fuzzy* konveks
2. Himpunan *fuzzy* telah dinormalisasi
3. Fungsi keanggotaannya masing-masing kontinu
4. Terdefinisikan dalam bilangan real



Gambar 2.6 Grafik Bilangan Fuzzy $A = a_1, a_2, a_3$ (Lee, 2005)

Bilangan *fuzzy* harus ternormalisasi dan konveks, berikut adalah kondisi dari normalisasi yang menyiratkan bahwa nilai fungsi keanggotaan harus sama dengan 1 (Lee, 2005).

$$\exists x \in \mathbb{R}, \quad \mu_A(x) = 1 \quad (2.30)$$

Kondisi untuk konveksitas adalah bahwa garis α -cut kontinu dan interval α -cut memenuhi relasi berikut.

$$A_\alpha = [\alpha_1^{(\alpha)}, \alpha_3^{(\alpha)}], \quad (\alpha' < \alpha) \Rightarrow (\alpha_1^{(\alpha')} \leq \alpha_1^{(\alpha)}, \alpha_3^{(\alpha')} \geq \alpha_3^{(\alpha)}) \quad (2.31)$$

Atau,

$$(\alpha' < \alpha) \Rightarrow (A_\alpha \subset A_{\alpha'}) \quad (2.32)$$

Pengoperasian bilangan *fuzzy* dapat digeneralisasi dari interval *crisp*. Misal, diketahui interval sebagai berikut.

$$A = [a_1, a_3], B = [b_1, b_3], \forall a_1, a_3, b_1, b_3 \in \mathbb{R} \quad (2.33)$$

Dengan asumsi A dan B sebagai bilangan yang dinyatakan sebagai interval, operasi utama dari interval tersebut adalah (Lee, 2005):

1. Penjumlahan (adisi)

$$A \oplus B = [a_1, a_3] \oplus [b_1, b_3] = [a_1 + b_1, a_3 + b_3] \quad (2.34)$$

2. Pengurangan (subtraksi)

$$A \ominus B = [a_1, a_3] \ominus [b_1, b_3] = [a_1 - b_1, a_3 - b_3] \quad (2.35)$$

3. Perkalian

$$\begin{aligned} A \odot B &= [a_1, a_3] \odot [b_1, b_3] \\ &= [a_1 \cdot b_1 \wedge a_1 \cdot b_3 \wedge a_3 \cdot b_1 \wedge a_3 \cdot b_3, \\ &\quad a_1 \cdot b_1 \vee a_1 \cdot b_3 \vee a_3 \cdot b_1 \vee a_3 \cdot b_3] \end{aligned} \quad (2.36)$$

4. Pembagian

$$\begin{aligned} A \oslash B &= [a_1, a_3] \oslash [b_1, b_3] \\ &= [a_1/b_1 \wedge a_1/b_3 \wedge a_3/b_1 \wedge a_3/b_3, \\ &\quad a_1/b_1 \vee a_1/b_3 \vee a_3/b_1 \vee a_3/b_3] \end{aligned} \quad (2.37)$$

Pembagian komponen terkait tidak dilakukan bila $b_1 = 0$ atau $b_3 = 0$.

5. Invers

$$A^{-1} = [a_1, a_3]^{-1} = [1/a_1 \wedge 1/a_3, 1/a_1 \vee 1/a_3] \quad (2.38)$$

Operasi interval sebelumnya juga berlaku untuk operasi bilangan *fuzzy*. Karena hasil bilangan *fuzzy* dinyatakan dalam bentuk himpunan *fuzzy*, hasilnya dapat dinyatakan dalam fungsi keanggotaan. Untuk $\forall a_1, a_3, b_1, b_3 \in \mathbb{R}$, berikut adalah operasi yang dapat dilakukan dalam bilangan *fuzzy* (Lee, 2005):

1. Penjumlahan (adisi)

$$A \oplus B = \mu_{A \oplus B}(z) = \bigcup_{z=x+y} (\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)) \quad (2.39)$$

2. Pengurangan (subtraksi)

$$A \ominus B = \mu_{A \ominus B}(z) = \bigcup_{z=x-y} (\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)) \quad (2.40)$$

3. Perkalian

$$A \odot B = \mu_{A \odot B}(z) = \bigcup_{z=x \cdot y} (\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)) \quad (2.41)$$

4. Pembagian

$$A \oslash B = \mu_{A \oslash B}(z) = \bigcup_{z=x/y} (\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)) \quad (2.42)$$

5. Nilai Minimum

$$A(\wedge)B = \mu_{A(\wedge)B}(z) = \bigcup_{z=x\wedge y} (\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)) \quad (2.43)$$

6. Nilai Maksimum

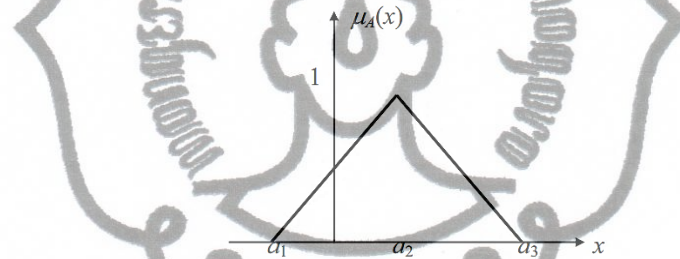
$$A(\vee)B = \mu_{A(\vee)B}(z) = \bigcup_{z=x\vee y} (\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)) \quad (2.44)$$

Terdapat berbagai macam bentuk bilangan *fuzzy*, diantaranya adalah sebagai berikut (Lee, 2005):

1. Bilangan *fuzzy* segitiga atau *triangular fuzzy number*

Triangular fuzzy number adalah bilangan *fuzzy* yang direpresentasikan dengan tiga titik seperti berikut.

$$A = (a_1, a_2, a_3) \quad (2.45)$$



Gambar 2.7 Grafik Bilangan Fuzzy Segitiga (Lee, 2005)

Representasi ini diinterpretasikan dalam fungsi keanggotaan berikut.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2}, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & x > a_3 \end{cases} \quad (2.46)$$

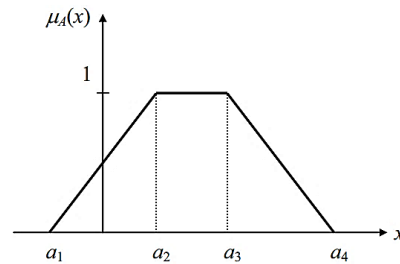
Jika didapatkan interval *crisp* dengan operasi α -cut, interval A_α akan diperoleh sebagai berikut, untuk $\forall \alpha \in [0,1]$.

$$A_\alpha = [a_1^{(\alpha)}, a_3^{(\alpha)}] = [(a_2 - a_1)\alpha + a_1, -(a_3 - a_2)\alpha + a_3] \quad (2.47)$$

2. Bilangan *fuzzy* trapesium atau *trapezoidal fuzzy number*

Trapezoidal fuzzy number adalah bilangan *fuzzy* yang direpresentasikan dengan empat titik seperti berikut.

$$A = (a_1, a_2, a_3, a_4) \quad (2.48)$$



Gambar 2.8 Grafik Bilangan *Fuzzy* Trapesium (Lee, 2005)

Representasi ini diinterpretasikan dalam fungsi keanggotaan berikut.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3}, & a_3 \leq x \leq a_4 \\ 0, & x > a_4 \end{cases} \quad (2.49)$$

Jika didapatkan interval *crisp* dengan operasi α -cut, interval A_α akan diperoleh sebagai berikut, untuk $\forall \alpha \in [0,1]$.

$$A_\alpha = [(a_2 - a_1)\alpha + a_1, -(a_4 - a_3)\alpha + a_4] \quad (2.50)$$

Bila $a_2 = a_3$, bilangan *fuzzy* trapesium akan membentuk bilangan *fuzzy* segitiga.

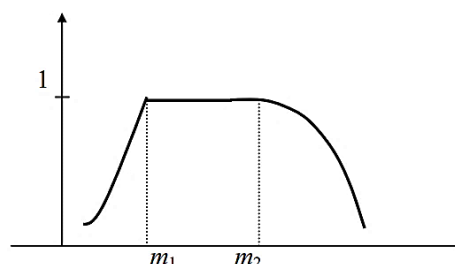
3. Bilangan *fuzzy* datar atau *flat fuzzy number*

Dengan menggeneralisasikan bilangan *fuzzy* trapesium, didapatkan bilangan *fuzzy* datar atau *flat fuzzy number*. Dengan kata lain, bilangan *fuzzy* datar adalah suatu bilangan *fuzzy* A yang memuaskan kondisi berikut.

$$\exists m_1, m_2 \in \mathbb{R}, \quad m_1 < m_2 \quad (2.51)$$

$$\mu_A(x) = 1, \quad m_1 \leq x \leq m_2 \quad (2.52)$$

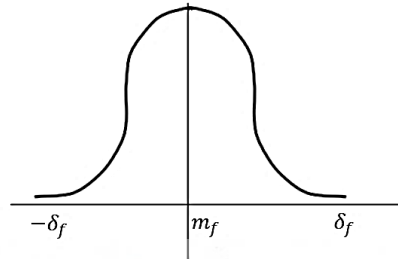
Dalam hal ini, tidak seperti bentuk trapesium, fungsi keanggotaan dalam $x < m_1$ dan $x > m_2$ tidak perlu berupa garis, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Grafik Bilangan *Fuzzy* Datar (Lee, 2005)

4. Bilangan *fuzzy* lonceng atau *bell-shape fuzzy number*

Bell-shape fuzzy number merupakan bilangan *fuzzy* yang sering digunakan dalam praktik aplikasi.



Gambar 2.10 Grafik Bilangan *Fuzzy* Lonceng (Lee, 2005)

Fungsi keanggotaan dari bilangan *fuzzy* ini didefinisikan sebagai berikut.

$$\mu_f(x) = e^{\left\{ \frac{-(x-m_f)^2}{2\delta_f^2} \right\}} \quad (2.53)$$

Di mana m_f merupakan rata-rata dari fungsi keanggotaan dan δ_f merupakan standar deviasi dari fungsi tersebut.

2.5.4 Defuzzifikasi

Proses teknis memerlukan tindakan kontrol dalam bentuk *crisp*, oleh karena itu prosedur yang dapat menghasilkan nilai *crisp* dari satu atau lebih himpunan *fuzzy* diperlukan. Prosedur ini dinamakan defuzzifikasi atau *defuzzification*.

Metode defuzzifikasi ini sangat sering didasarkan pada ide heuristik, seperti pengambilan tindakan yang sesuai dengan keanggotaan maksimum, pengambilan tindakan yang berada di tengah-tengah antara dua puncak, dan lain sebagainya. Tentu saja, metode defuzzifikasi juga dapat dicirikan dengan sifat formal (matematis) yang dimiliki.

Defuzzifikasi tidak hanya relevan untuk sistem kontrol *fuzzy* tetapi juga untuk jenis masalah lainnya, misalnya analisis multi kriteria dan area lain di mana himpunan *fuzzy* harus diubah menjadi ekspresi *crisp* seperti dalam bentuk bilangan real, simbol, dan lain sebagainya (Zimmermann, 2010).

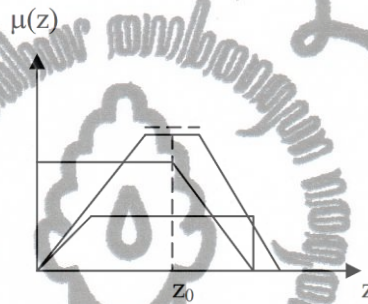
Terdapat berbagai macam metode defuzzifikasi, diantaranya adalah sebagai berikut:

1. *Mean of Maximum Method (MOM)*

Menurut Kwang H. Lee (2005) strategi MOM menghasilkan tindakan kontrol yang mewakili nilai rata-rata dari semua tindakan kontrol yang fungsi keanggotaannya mencapai maksimum. Dalam kasus himpunan semesta diskrit, tindakan kontrol dapat dinyatakan sebagai,

$$z_0 = \sum_{j=1}^k \frac{z_j}{k} \quad (2.54)$$

Di mana z_j merupakan tindakan kontrol yang fungsi keanggotaannya mencapai maksimum dan k merupakan jumlah tindakan kontrol tersebut.



Gambar 2.11 Grafik Strategi *Mean of Maximum Method* (Lee, 2005)

2. *Extreme Value Strategies*

Menurut Hans J. Zimmermann (2010), strategi defuzzifikasi ini menggunakan nilai-nilai ekstrem dari fungsi keanggotaan (umumnya maksima) untuk menentukan nilai setara dalam bentuk *crisp*. Diasumsikan bahwa fungsi keanggotaan bukan unimodal (memiliki maksimum yang unik) tetapi memiliki beberapa maksima dengan nilai $\mu(x)$ yang sama atau memiliki inti (*core*) yang merupakan himpunan bagian *compact* dari *support* di mana tingkat keanggotaannya memiliki nilai maksimum. Tergantung pada posisi dari inti yang dianggap paling tepat, dapat dilakukan salah satu strategi berikut: *Left of maximum* (LOM), *Right of Maximum* (ROM), atau *Center of Maximum* (COM).

Inti dari himpunan *fuzzy* didefinisikan sebagai,

$$\text{Co}(x) = \{x | x \in X, \neg(\exists y \in X)(A(y) > A(x))\} \quad (2.55)$$

Sehingga, untuk strategi LOM, nilai defuzzifikasi didefinisikan sebagai berikut.

$$z_{LOM} = \min\{z | z \in \text{Co}\} \quad (2.56)$$

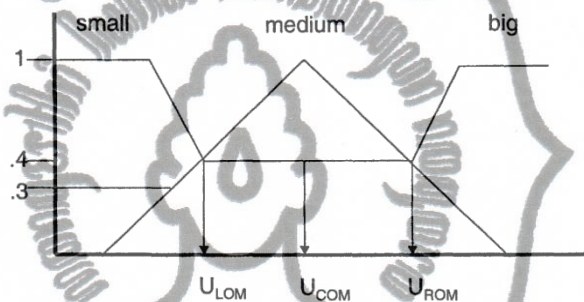
Sedangkan, untuk strategi ROM, nilai defuzzifikasi didefinisikan sebagai berikut.

$$z_{ROM} = \max\{z|z \in Co\} \quad (2.57)$$

Selanjutnya, untuk strategi COM, nilai defuzzifikasi didefinisikan sebagai berikut.

$$z_{COM} = \frac{z_{ROM} - z_{LOM}}{2} \quad (2.58)$$

Strategi ini berbeda dengan strategi *Mean of Maximum* (MOM), dengan mengasumsikan bahwa tidak ada nilai inti dalam himpunan *fuzzy* tetapi nilai maksimum terpisah yang berbeda.



Gambar 2.12 Grafik Strategi *Extreme Value* (Zimmermann, 2010)

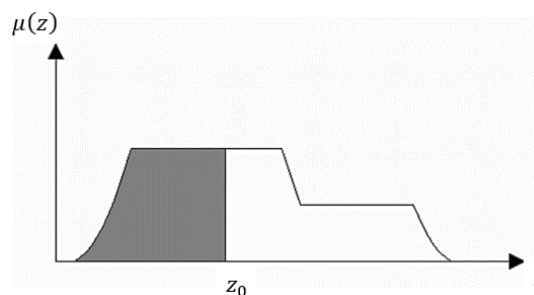
3. *Bisector of Area* (BOA)

Menurut Kwang H. Lee (2005) strategi BOA menghasilkan tindakan (z_0) yang membagi suatu area menjadi dua wilayah dengan luas yang sama. Metode ini dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\int_{\alpha}^{z_0} \mu_C(z) dz = \int_{z_0}^{\beta} \mu_C(z) dz \quad (2.59)$$

Di mana,

$$\alpha = \min\{z|z \in W\} \quad \text{dan} \quad \beta = \max\{z|z \in W\} \quad (2.60)$$



Gambar 2.13 Grafik Strategi *Bisector of Area* (Lee, 2005)

4. *Center of Area (COA)*

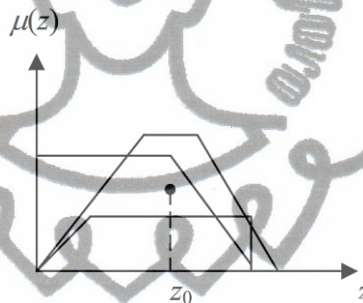
Menurut Kwang H. Lee (2005) strategi COA merupakan strategi yang paling banyak digunakan. Strategi ini menghasilkan pusat gravitasi dari distribusi kemungkinan suatu himpunan *fuzzy*. Dalam kasus himpunan semesta diskrit, metode ini dapat dirumuskan sebagai,

$$z_0 = \sum_{j=1}^n z_j \cdot \mu_C(z_j) / \sum_{j=1}^n \mu_C(z_j) \quad (2.61)$$

Menurut Hans J. Zimmermann (2010), pusat gravitasi (*center of gravity*) juga dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$z_0 = \int_z z \cdot \mu_C(z) / \int_z \mu_C(z) \quad (2.62)$$

Di mana n adalah jumlah tingkatan kuantisasi (*quantization levels*) dari keluaran, C adalah himpunan *fuzzy* yang terdefinisikan pada dimensi keluaran z .



Gambar 2.14 Grafik Strategi *Center of Area Method* (Lee, 2005)

2.6 *MULTI CRITERIA DECISION MAKING (MCDM)*

Berdasar pada Evangelos Triantaphyllou (2000) analisis tentang tata cara seseorang membuat keputusan (teori preskriptif) atau tata cara yang diharuskan untuk mengambil keputusan (teori normatif) mungkin sama tuanya dengan catatan sejarah umat manusia. Tentu saja, tidak semua analisis tersebut dilakukan dengan pendekatan ilmiah yang ketat seperti yang dilihat dalam literatur akhir-akhir ini. Oleh karena itu, tidak mengherankan bahwa literatur mengenai pengambilan keputusan sangat luas dan terus berkembang. Namun, pada saat yang sama, pengembangan metode pengambilan keputusan yang sempurna untuk pengambilan keputusan di kehidupan nyata yang rasional masih tetap merupakan tujuan yang sulit dipahami. Kontradiksi antara luasnya studi tentang hal ini dan sulitnya

pencapaian tujuan akhir dalam penerapan di kehidupan nyata, merupakan paradoks pengambilan keputusan akhir. Pengambilan keputusan kriteria majemuk adalah salah satu cabang pengambilan keputusan yang paling terkenal.

Menurut Cengiz Kahraman (2008), ada dua pendekatan dasar untuk menyelesaikan permasalahan pengambilan keputusan kriteria majemuk atau *Multi Criteria Decision Making* (MCDM) yaitu: pengambilan keputusan atribut majemuk atau *Multiple Attribute Decision Making* (MADM) dan pengambilan keputusan objektif majemuk atau *Multiple Objective Decision Making* (MODM). Permasalahan MADM berbeda dari permasalahan MODM, yang melibatkan desain alternatif terbaik dengan mempertimbangkan pengorbanan (*tradeoffs*) dalam serangkaian kendala desain yang berinteraksi. MADM mengacu pada pembuatan pilihan di antara beberapa tindakan yang dilakukan dengan adanya banyak atribut, yang biasanya saling bertentangan. Dalam masalah MODM, jumlah alternatif secara efektif tidak terbatas, dan pengorbanan di antara kriteria desain biasanya dijelaskan oleh fungsi kontinu.

MADM adalah cabang pengambilan keputusan yang paling terkenal. Ini adalah cabang dari kelas umum model penelitian operasional (*operations research*) yang menangani permasalahan keputusan di bawah sejumlah kriteria keputusan. Pendekatan MADM mensyaratkan bahwa pilihan (seleksi) dibuat di antara alternatif keputusan yang dijelaskan oleh atribut mereka. Masalah MADM diasumsikan memiliki sejumlah alternatif keputusan yang telah ditentukan sebelumnya. Memecahkan masalah MADM melibatkan penyortiran dan peringkat. Pendekatan MADM dapat dipandang sebagai metode alternatif untuk menggabungkan informasi dalam matriks keputusan masalah bersama dengan informasi tambahan dari pembuat keputusan untuk menentukan peringkat akhir, penyaringan, atau seleksi dari alternatif. Selain informasi yang terkandung dalam matriks keputusan, semua metode MADM kecuali teknik yang paling sederhana membutuhkan informasi tambahan dari pembuat keputusan untuk sampai pada peringkat akhir, penyaringan, atau seleksi (Kahraman, 2008).

Pendekatan MODM bertentangan dengan pendekatan MADM, alternatif keputusan tidak diberikan. Sebaliknya, MODM menyediakan kerangka kerja (*framework*) matematika untuk merancang serangkaian alternatif keputusan. Setiap

alternatif, setelah diidentifikasi, dinilai dari seberapa dekat hal itu memenuhi suatu atau beberapa tujuan. Dalam pendekatan MODM, jumlah alternatif keputusan potensial mungkin besar. Pemecahan masalah MODM melibatkan seleksi (Kahraman, 2008).

Perbedaan utama antara pendekatan MADM dan MODM adalah bahwa MODM berkonsentrasi pada ruang keputusan berkelanjutan yang bertujuan untuk mewujudkan solusi terbaik, di mana beberapa fungsi tujuan harus dicapai secara bersamaan. Proses pengambilan keputusan melibatkan pencarian solusi terbaik dengan serangkaian tujuan yang saling bertentangan, dan dengan demikian, masalah MODM dikaitkan dengan masalah desain untuk solusi optimal melalui pemrograman matematika. Dalam menemukan solusi terbaik yang layak, berbagai interaksi dalam batasan desain yang paling memuaskan tujuan harus dipertimbangkan dengan cara mencapai beberapa tingkat himpunan yang dapat diterima dari beberapa tujuan terukur. Sebaliknya, MADM mengacu pada pengambilan keputusan dalam ruang keputusan yang terpisah dan berfokus pada bagaimana memilih atau membuat peringkat berbagai alternatif yang telah ditentukan sebelumnya. Dengan demikian, masalah MADM dapat dikaitkan dengan masalah pilihan atau peringkat dari alternatif yang ada (Kahraman, 2008).

Roy (1981) telah mengidentifikasi empat jenis permasalahan pengambilan keputusan utama, yaitu:

1. Permasalahan pilihan (*choice problem*).

Tujuan dari permasalahan ini adalah untuk memilih opsi tunggal terbaik atau mereduksi himpunan opsi menjadi himpunan bagian opsi terbaik yang setara atau tidak dapat dibandingkan kembali.

2. Permasalahan penyortiran (*sorting problem*).

Pada permasalahan ini, opsi diurutkan ke dalam himpunan yang berurutan dan himpunan yang telah ditentukan, atau disebut kategori. Tujuannya adalah untuk kemudian mengelompokkan kembali opsi dengan perilaku atau karakteristik yang sama untuk alasan deskriptif, organisasi, atau prediksi. Berdasarkan klasifikasi, tindakan yang diperlukan dapat diambil. Metode pengurutan berguna untuk penggunaan berulang atau otomatis.

Metode ini juga dapat digunakan sebagai penyaringan awal untuk mengurangi jumlah opsi untuk dipertimbangkan pada langkah selanjutnya.

3. Permasalahan peringkat (*ranking problem*).

Pada permasalahan ini, opsi diurutkan dari yang terbaik hingga yang terburuk melalui skor atau perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*) dan lain sebagainya. Urutan dapat berupa urutan sempurna maupun urutan parsial jika opsi yang dipertimbangkan tidak dapat dibandingkan.

4. Permasalahan uraian (*description problem*).

Tujuan permasalahan ini adalah untuk menggambarkan opsi dan konsekuensinya. Hal ini biasanya dilakukan pada langkah pertama untuk memahami karakteristik masalah keputusan.

Terdapat beberapa macam metode yang digunakan dalam MCDM (*Multi Criteria Decision Making*). Metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pengambilan keputusan tertentu dapat dilihat dalam Tabel 2.2 (Ishizaka dan Nemery, 2013).

Tabel 2.2 Permasalahan MCDM dan Metodenya (Ishizaka dan Nemery, 2013)

No.	Permasalahan			
	<i>Choice</i>	<i>Sorting</i>	<i>Ranking</i>	<i>Description</i>
1	AHP	AHP	AHPSort	
2	ANP	ANP		
3	MAUT/UTA	MAUT/UTA	UTADIS	
4	MACBETH	MACBETH		
5	PROMETHEE	PROMETHEE	FlowSort	GAIA/FS-GAIA
6	ELECTRE I	ELECTRE III	ELECTRE-Tri	
7	TOPSIS	TOPSIS		
8	<i>Goal Programming</i>			
9	DEA	DEA		
10	<i>Multi-methods platform</i>			

Berdasarkan Ishizaka dan Nemery (2013) terdapat pula beberapa jenis permasalahan pengambilan keputusan tambahan yang diusulkan dalam komunitas pengembangan MCDM, permasalahan tersebut meliputi:

1. Permasalahan eliminasi (*elimination problem*).

Permasalahan eliminasi adalah cabang tertentu dari masalah penyortiran yang bertujuan untuk mengeliminasi opsi atau alternatif yang tidak diinginkan.

2. Permasalahan desain (*design problem*).


Tujuan permasalahan ini adalah untuk mengidentifikasi atau membuat tindakan baru, yang akan memenuhi tujuan dan aspirasi pembuat keputusan (Keeney, 1992).

Menurut Ishizaka dan Nemery (2013) terdapat berbagai cara untuk memilih metode MCDM yang tepat untuk menyelesaikan masalah tertentu. Salah satu caranya adalah dengan melihat informasi *input* yang diperlukan. Informasi ini merupakan data, parameter metode, upaya pemodelan, serta pertimbangan hasil dan rinciannya (*granularity*). Tingkat masukan (*input*) yang dibutuhkan dalam setiap metode dapat dilihat dalam Tabel 2.3 dan 2.4. Pendekatan ini didukung oleh Guitouni, dkk. (1999).

Tabel 2.3 Tingkatan Masukan yang Dibutuhkan dalam Metode Penyelesaian Permasalahan Penyortiran (Ishizaka dan Nemery, 2013)

<i>Input</i>	Usaha	Metode	<i>Output</i>
<i>Utility function</i>	Sangat Tinggi ↑ ↓ Sangat Rendah	UTAIDS	Klasifikasi dengan skor
<i>Pairwise comparisons</i> dalam skala rasio		AHPSort	Klasifikasi dengan skor
<i>Indifference, preference</i> dan <i>veto thresholds</i>		ELECTRE-Tri	Klasifikasi dengan derajat <i>pairwise outranking</i>
<i>Indifference</i> dan <i>preference thresholds</i>		FlowSort	Klasifikasi dengan skor dan derajat <i>pairwise outranking</i>

Tabel 2.4 Tingkatan Masukan yang Dibutuhkan dalam Metode Penyelesaian Permasalahan Pilihan dan Peringkat (Ishizaka dan Nemery, 2013)

<i>Input</i>	<i>Usaha</i>	<i>Metode</i>	<i>Output</i>
<i>Utility function</i>	 Sangat Tinggi	MAUT	Peringkat lengkap dengan skor
<i>Pairwise comparisons</i> dalam skala rasio dan <i>interdependency</i>		ANP	Peringkat lengkap dengan skor
<i>Pairwise comparisons</i> dalam skala interval		MACBETH	Peringkat lengkap dengan skor
<i>Pairwise comparisons</i> dalam skala rasio		AHP	Peringkat lengkap dengan skor
<i>Indifference, preference</i> dan <i>veto thresholds</i>		ELECTRE	Peringkat parsial dan lengkap (derajat <i>pairwise outranking</i>)
<i>Indifference</i> dan <i>preference thresholds</i>		PROMETHEE	Peringkat parsial dan lengkap (skor dan derajat <i>pairwise outranking</i>)
<i>Ideal option</i> dan <i>constraints</i>		Goal Programming	Solusi layak (<i>feasible solution</i>) dengan skor deviasi (<i>deviation scores</i>)
<i>Ideal</i> dan <i>anti-ideal option</i>	Sangat Rendah	TOPSIS	Peringkat lengkap dengan skor kedekatan (<i>closeness score</i>)
Tidak diperlukan input subyektif		DEA	Peringkat parsial dengan skor efektifitas (<i>effectivity score</i>)

2.6.1 Fuzzy Multiple Attribute Decision Making (FMADM)

Metode MADM klasik umumnya mengasumsikan bahwa semua kriteria dan bobotnya masing-masing dinyatakan dalam nilai-nilai yang *crisp*, dengan demikian, peringkat dan penilaian dari alternatif dapat dilakukan tanpa masalah. Dalam situasi keputusan dunia nyata, penerapan metode MADM klasik mungkin menghadapi kendala penerapan yang serius dari kriteria yang mungkin mengandung ketidaktepatan (*imprecision*) atau ketidakjelasan (*vagueness*) yang melekat dalam informasi. Dalam banyak kasus, kinerja kriteria hanya dapat

dinyatakan secara kualitatif atau dengan menggunakan istilah linguistik, yang tentunya menuntut metode yang lebih tepat (Kahraman, 2008).

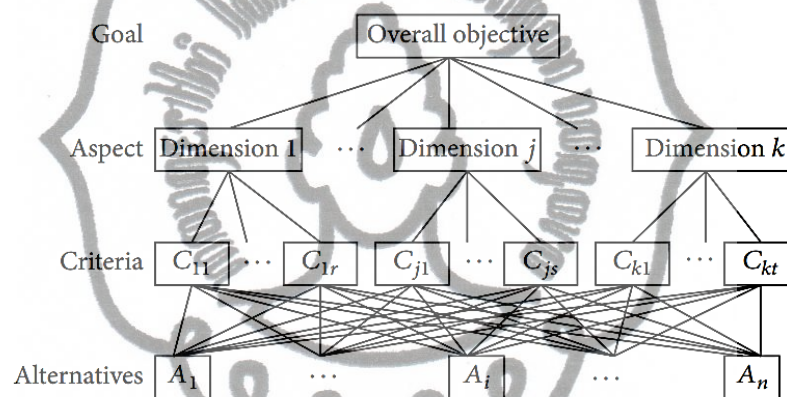
Situasi paling ideal untuk masalah MADM adalah ketika semua peringkat kriteria dan tingkat kepentingannya diketahui secara tepat, sehingga memungkinkan untuk mengatur kriteria dalam peringkat yang *crisp*. Namun, banyak masalah pengambilan keputusan di dunia nyata terjadi dalam lingkungan di mana tujuan, kendala, dan konsekuensi dari tindakan mungkin tidak diketahui secara tepat (Bellman dan Zadeh, 1970). Situasi ini menyiratkan bahwa masalah keputusan nyata sangat rumit dan dengan demikian sering tampaknya kurang cocok untuk dimodelkan secara matematis karena tidak ada definisi yang *crisp* (Zimmermann dan Zysno, 1985). Akibatnya, kondisi ideal untuk masalah MADM klasik mungkin tidak terpenuhi, khususnya ketika situasi keputusan melibatkan baik data *fuzzy* dan *crisp* secara bersamaan. Secara umum, istilah *fuzzy* biasanya merujuk pada situasi di mana atribut atau tujuan tidak dapat didefinisikan secara jelas. Hal ini dikarenakan tidak adanya batasan yang ditetapkan dengan baik dari rangkaian pengamatan di mana deskripsi tersebut berlaku (Kahraman, 2008).

2.6.2 Analytic Hierarchy Process (AHP)

Proses hirarki analitis atau *Analytic Hierarchy Process* (AHP) merupakan salah satu metode MADM yang dikembangkan oleh Saaty (1980). Menurut Ishizaka dan Nemery (2013), metode ini sangat berguna ketika pembuat keputusan tidak dapat membangun fungsi utilitas (*utility function*), jika dapat dilakukan maka direkomendasikan untuk menggunakan metode MAUT. Untuk menggunakan AHP, pengguna harus menyelesaikan empat langkah untuk mendapatkan peringkat alternatif. Seperti halnya pada metode MCDM lainnya, terlebih dahulu harus dilakukan penyusunan masalah (*problem structuring*). Setelah itu, skor atau prioritas dihitung berdasarkan perbandingan berpasangan (*pairwise comparisons*) yang ditentukan oleh pengguna. Pembuat keputusan tidak perlu memberikan penilaian numerik, penilaian verbal relatif (*relative verbal appreciation*) pun mencukupi. Selanjutnya, terdapat dua langkah tambahan yang dapat dilakukan, yaitu: pemeriksaan konsistensi dan analisis sensitivitas. Kedua langkah tersebut bersifat opsional tetapi direkomendasikan sebagai konfirmasi kekokohan (*robustness*) dari hasil. Pemeriksaan konsistensi adalah hal yang umum dalam

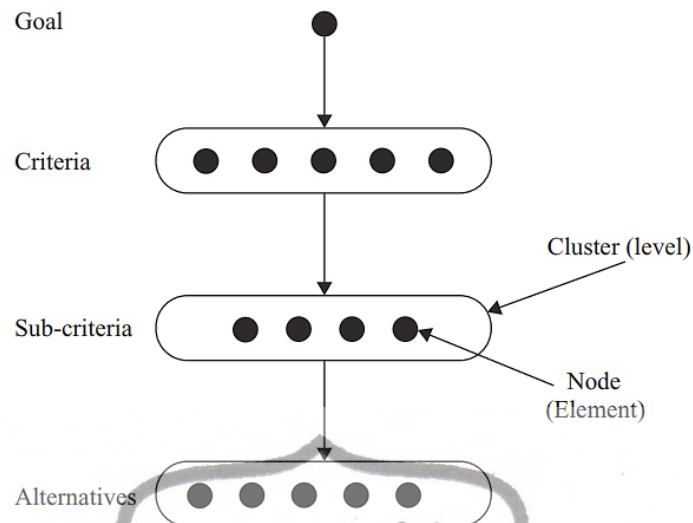
semua metode yang berdasarkan pada perbandingan berpasangan seperti AHP. Perangkat lunak pendukung MakeItRational dapat digunakan untuk memfasilitasi analisis sensitivitas.

AHP didasarkan pada moto *divide and conquer* (bagi dan taklukan). Masalah yang membutuhkan teknik MCDM adalah permasalahan yang kompleks. Sehingga, sangat menguntungkan untuk melakukan *breakdown* (perincian) dan menyelesaikan satu sub-masalah pada satu waktu. Perincian ini dilakukan dalam dua fase pada proses pengambilan keputusan yaitu selama penyusunan masalah (*problem structuring*) dan pemunculan prioritas melalui perbandingan berpasangan (*pairwise comparisons*) (Ishizaka dan Nemery, 2013).



Gambar 2.15 Sistem Hirarki dalam *Multiple Attribute Decision Making* (MADM) (Liu, 2014)

Masalah disusun sesuai dengan struktur hierarki seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.15 dan 2.16. Elemen teratas adalah tujuan keputusan, tingkat kedua mewakili kriteria, dan tingkat terendah mewakili alternatif. Dalam hierarki yang lebih kompleks, lebih banyak *level* atau tingkat dapat ditambahkan. Tingkat tambahan ini mewakili sub-kriteria. Bagaimanapun, minimal terdapat tiga tingkatan dalam hierarki (Ishizaka dan Nemery, 2013).



Gambar 2.16 Struktur Hirarki dalam *Analytic Hierarchy Process* (AHP)
(Ishizaka dan Nemery, 2013)

Prioritas adalah skor yang memberi peringkat kepentingan (*importance*) pada alternatif atau kriteria dalam keputusan. Setelah fase penyusunan masalah selesai, tiga jenis prioritas harus dihitung, prioritas ini terdiri dari (Ishizaka dan Nemery, 2013):

1. Prioritas kriteria

Dilakukan penilaian terhadap seberapa pentingnya setiap kriteria sehubungan dengan tujuan teratas (tujuan utama).

2. Prioritas alternatif lokal

Dilakukan penilaian terhadap seberapa pentingnya suatu alternatif sehubungan dengan satu kriteria tertentu.

3. Prioritas alternatif global

Prioritas kriteria dan prioritas alternatif lokal adalah hasil intermediat yang digunakan untuk menghitung prioritas alternatif global. Prioritas alternatif global memberi peringkat alternatif sehubungan dengan semua kriteria yang selanjutnya dihubungkan dengan tujuan keseluruhan.

Kriteria dan prioritas alternatif lokal dihitung dengan menggunakan teknik yang sama. Alih-alih secara langsung mengalokasikan ukuran performansi ke alternatif atau kriteria seperti pada teknik lain, AHP menggunakan perbandingan berpasangan. Tabel 2.5 memperlihatkan derajat kepentingan untuk penilaian prioritas (Ishizaka dan Nemery, 2013).

Tabel 2.5 Skala Linguistik Fundamental (Ishizaka dan Nemery, 2013)

Derajat Kepentingan	Definisi
1	Sama pentingnya
2	Tingkat kepentingan lemah
3	Tingkat kepentingan sedang (moderat)
4	Tingkat kepentingan sedikit lebih dari sedang
5	Tingkat kepentingan kuat
6	Tingkat kepentingan sedikit lebih dari kuat
7	Tingkat kepentingan sangat kuat, menunjukkan kepentingan
8	Tingkat kepentingan sedikit lebih dari sangat kuat
9	Tingkat kepentingan ekstrim

Penggunaan perbandingan verbal atau linguistik seperti pada Tabel 2.5 secara intuitif menarik, mudah digunakan, dan lebih umum dalam kehidupan sehari-hari daripada angka. Hal ini juga memungkinkan untuk menggunakan bilangan *fuzzy* dalam perbandingan yang sulit di mana perbandingan verbal tidak setepat bilangan murni. Namun, ambiguitas dalam bahasa yang digunakan juga menuai kritik (Donegan, dkk. 1992).

Karena AHP menggunakan perbandingan berpasangan, maka dibutuhkan skala rasio dan tidak memerlukan unit perbandingan, berbeda dengan metode yang menggunakan skala interval (Kainulainen, dkk. 2009). Prioritas adalah nilai relatif atau hasil bagi a/b dari dua kuantitas a dan b yang memiliki satuan yang sama. Barzilai (2005) mengklaim bahwa preferensi tidak dapat diwakili dengan skala rasio, karena menurutnya nilai nol absolut itu ada, misalnya suhu atau tegangan listrik. Demikian pula, Dodd dan Donegan (1995) mengkritik ketiadaan nol dalam skala preferensi pada Tabel 2.5. Sebaliknya, Saaty (1994) menyatakan bahwa skala rasio adalah satu-satunya kemungkinan untuk menggabungkan pengukuran dengan cara yang sepadan, seperti dalam satuan yang sama (Ishizaka dan Nemery, 2013).

Untuk mendapatkan prioritas, perbandingan verbal harus dikonversi menjadi skala numerik. Dalam Tabel 2.5, pernyataan verbal dikonversi menjadi bilangan bulat antara satu sampai sembilan. Secara teoritis, tidak ada alasan untuk membatasi penilaian dengan hanya menggunakan angka-angka dan gradasi verbal ini.

Berbagai skala numerik lainnya juga dapat digunakan, seperti yang diperlihatkan dalam Tabel 2.6 (Ishizaka dan Nemery, 2013).

Tabel 2.6 Jenis Skala Numerik untuk Interpretasi Linguistik (Ishizaka dan Nemery, 2013)

Jenis Skala	Equal importance	Weak	Moderate importance	Moderate plus	Strong importance	Strong plus	Very strong importance	Very very strong	Extreme importance
Linear	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ekspensial	1	4	9	16	25	36	49	64	81
Geometrik	1	2	4	8	16	32	64	128	256
Logaritmik	1	1.58	2	2.32	2.58	2.81	3	3.17	3.32
Akar Kuadrat	1	1.41	1.73	2	2.23	2.45	2.65	2.83	3
Asimptotik	0	0.12	0.24	0.36	0.46	0.55	0.63	0.70	0.76
Invers Linear	1	1.13	1.29	1.5	1.8	2.25	3	4.5	9
Seimbang	1	1.22	1.5	1.86	2.33	3	4	5.67	9

Menurut Ishizaka dan Nemery (2013), untuk mendapatkan presisi dibutuhkan lebih banyak usaha, terutama ketika ada kriteria atau alternatif dalam jumlah yang besar. Jumlah perbandingan yang diperlukan untuk setiap matriks perbandingan adalah:

$$N = \frac{n^2 - n}{2} \quad (2.63)$$

Di mana n adalah jumlah alternatif atau kriteria. Rumus ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. n^2 adalah banyaknya total perbandingan yang dapat ditulis dalam matriks.
2. n merupakan perbandingan alternatif dengan dirinya sendiri (diagonal utama). Nilainya sama dengan 1 dan karenanya tidak perlu diperhatikan.
3. Karena matriks bersifat bertentangan (*reciprocal*), hanya setengah dari perbandingan yang perlu dinilai, setengah lainnya secara otomatis

dihitung dari nilai paruh sebelumnya. Misal paruh pertama memiliki nilai a , maka untuk baris-kolom yang *reciprocal* nilainya adalah $1/a$.

Berikut adalah contoh dari matriks komparasi (*comparison matrix*).

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & \cdots & C_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & 1 & \vdots \\ 1/a_{2n} & 1/a_{2n} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2.64)$$

Ketika matriks selesai dibangun, pemeriksaan konsistensi (*consistency check*) dapat dilakukan untuk mendeteksi kemungkinan kontradiksi dalam entri. Ketika beberapa perbandingan berpasangan (*pairwise comparisons*) berturut-turut diperkenalkan, pasangan tersebut dapat saling bertentangan. Alasan terjadinya kontradiksi ini dapat berupa masalah yang samar didefinisikan (*vague*), kurangnya informasi yang cukup atau adanya rasionalitas terbatas (*bounded rationality*), informasi yang tidak pasti, atau kurangnya konsentrasi. Konsistensi minimal diperlukan agar didapatkan perhitungan prioritas yang berarti. Matriks yang diisi oleh perbandingan berpasangan a_{ij} disebut konsisten jika aturan transitivitas (*transitivity*) dan timbal balik (*reciprocity*) terpenuhi (Ishizaka dan Nemery, 2013).

Misal a_{ij} merupakan perbandingan antara alternatif i dengan j , serta i, j , dan k merupakan alternatif sembarang dalam matriks. maka aturan transitivitas (*transitivity*) dapat dinyatakan sebagai:

$$a_{ij} = a_{ik} \cdot a_{kj} \quad (2.65)$$

dan aturan timbal balik (*reciprocity*) didefinisikan sebagai:

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (2.66)$$

Jika dimisalkan bahwa preferensi p_i (prioritas alternatif i) diketahui, maka matriks yang konsisten sempurna dapat dibentuk bila semua perbandingan a_{ij} mematuhi persamaan berikut:

$$a_{ij} = \frac{p_i}{p_j} \quad (2.67)$$

Namun, prioritas dalam AHP tidak diketahui sebelumnya. Karena prioritas hanya masuk akal jika berasal dari matriks yang konsisten atau hampir konsisten, pemeriksaan konsistensi harus dilakukan. Tidak ada ambang batas yang jelas untuk

mendefinisikan matriks tidak konsisten yang tidak dapat ditoleransi. Beberapa metode telah diusulkan untuk mengukur konsistensi, metode yang paling umum digunakan adalah metode yang dikembangkan oleh Saaty (1980) di mana terdapat indeks konsistensi atau *Consistency Index* (CI) yang terkait dengan metode *eigenvalue*.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2.68)$$

Di mana λ_{\max} adalah nilai eigen maksimal. Rasio konsistensi atau *Consistency Ratio* (CR) dinyatakan sebagai:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2.69)$$

Di mana *RI* adalah *random index* atau indeks keacakan, yang merupakan nilai rata-rata CI untuk 500 matriks yang diisi secara acak. Nilai RI dapat dilihat dalam Tabel 2.7. Jika CR kurang dari 10% atau inkonsistensi kurang dari 10%, maka matriks tersebut memiliki konsistensi yang dapat diterima.

Tabel 2.7 Indeks Keacakan (*Random Index*) (Ishizaka dan Nemery, 2013)

n	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Alonso dan Lamata (2006) menghitung regresi dari indeks keacakan dan mengusulkan formulasi:

$$\lambda_{\max} \leq n + 0.1(1.7699n - 4.3513) \quad (2.70)$$

Derivasi prioritas (*priorities derivation*) adalah hal yang krusial dalam perhitungan metode AHP, jika tidak ada hal ini maka peringkat tidak dapat ditentukan. Berbagai metode telah diusulkan untuk menghitung prioritas dari matriks perbandingan berpasangan (Lin, 2007). Metode tersebut meliputi: metode perkiraan (*approximate method*), metode nilai eigen (*eigenvalue method*) dan rata-rata geometrik (*geometric mean*). Metode perkiraan hanya memerlukan operasi penambahan dan rata-rata. Metode nilai eigen menghitung tidak hanya prioritas tetapi juga tingkat inkonsistensi. Metode rata-rata geometris diusulkan untuk menyelesaikan masalah pembalikan peringkat kanan-kiri (*right-left rank reversal*) dari metode nilai eigen. Setiap metode akan menghasilkan prioritas yang identik ketika matriks konsisten (Ishizaka dan Nemery, 2013).

1. *Approximate method*

Metode ini didasari oleh dua tahap sederhana, yang pertama adalah penjumlahan setiap elemen pada baris i .

$$r_i = \sum_j a_{ij} \quad (2.71)$$

Tahap kedua adalah normalisasi hasil penjumlahan menggunakan:

$$p_i = \frac{r_i}{\sum_i r_i} \quad (2.72)$$

2. *Eigenvalue method*

Dalam metode nilai eigen, vektor prioritas \vec{p} dihitung dengan menyelesaikan persamaan:

$$A\vec{p} = n\vec{p} \quad (2.73)$$

Di mana n adalah dimensi dari matriks A dan $\vec{p} = (p_1, \dots, p_j, \dots, p_n)$. Untuk menyederhanakan perhitungan, hanya baris i dari matriks A yang dipertimbangkan. Misalkan $a_{ij} = p_i/p_j$, dengan mengalikan matriks A dengan vektor prioritas \vec{p} dari persamaan di atas didapatkan:

$$\sum_j \frac{p_i}{p_j} \cdot p_j = np_i \quad (2.74)$$

Jadi, perkalian baris i dengan vektor prioritas \vec{p} memberikan perkalian prioritas p_i sebanyak n kali. Dengan mengalikan semua elemen dari matriks perbandingan A dengan vektor prioritas \vec{p} , diperoleh:

$$\begin{bmatrix} p_1/p_1 & p_1/p_2 & \dots & p_1/p_n \\ p_2/p_1 & p_2/p_2 & \dots & p_2/p_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_n/p_1 & p_n/p_2 & \dots & p_n/p_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{bmatrix} \quad (2.75)$$

Untuk matriks yang tidak konsisten, hubungan ini tidak lagi valid, karena perbandingan antara elemen i dan j tidak selalu sesuai dengan persamaan $a_{ij} = p_i/p_j$. Oleh karena itu, dimensi n diganti dengan λ yang tidak diketahui. Perhitungan λ dan \vec{p} dilakukan melalui persamaan:

$$A\vec{p} = \lambda\vec{p} \quad (2.76)$$

dalam aljabar linear disebut sebagai masalah nilai eigen (*eigenvalue*). Nilai λ yang memenuhi persamaan ini disebut sebagai nilai eigen dan \vec{p}

merupakan vektor eigen (*eigenvector*) yang terkait. Menurut teorema Perron, matriks positif memiliki nilai eigen positif yang unik. Nilai eigen non-trivial disebut λ_{\max} atau nilai eigen maksimum. Jika $\lambda_{\max} = n$, maka matriksnya konsisten sempurna. Jika tidak, perbedaan antara $(\lambda_{\max} - n)$ adalah ukuran dari inkonsistensi.

Saaty (1980) membenarkan pendekatan nilai eigen untuk matriks yang sedikit tidak konsisten dengan teori perturbasi, yang mengatakan bahwa sedikit variasi dalam matriks yang konsisten menyiratkan variasi yang sangat sedikit dari nilai dan vektor eigen. Untuk menghitung vektor eigen yang terkait dengan nilai eigen maksimum, sebagian besar perangkat lunak, menggunakan metode pangkat (eksponensial), yang merupakan proses iteratif, prosedurnya adalah sebagai berikut:

- Matriks berpasangan (*pairwise matrix*) dikuadratkan: $A_{n+1} = A_n A_n$.
- Jumlah baris kemudian dihitung dan dinormalisasi. Ini adalah perkiraan pertama dari vektor eigen.
- Menggunakan matriks A_{n+1} , dilakukan pengulangan pada langkah a dan b.
- Langkah c diulangi sampai selisih antara jumlah dalam dua perhitungan prioritas berturut-turut lebih kecil dari kriteria berhenti yang ditentukan.

Setiap kuadrat tambahan memperhalus estimasi perbandingan. Oleh karena itu, metode nilai eigen didasarkan pada prosedur rata-rata estimasi perbandingan langsung dan tidak langsung.

3. *Geometric mean*

Untuk menghindari pembalikan peringkat kiri-kanan (*right-left rank reversal*), Crawford dan Williams (1985) mengadopsi pendekatan lain dengan meminimalkan kesalahan multiplikatif:

$$a_{ij} = \frac{p_i}{p_j} e_{ij} \quad (2.77)$$

Di mana a_{ij} adalah perbandingan antara objek i dan j , p_i adalah prioritas objek i , dan e_{ij} adalah tingkat kesalahan (*error*). Kesalahan

multiplikatif umumnya diasumsikan berdistribusi log-normal. Serupa dengan kesalahan aditif yang diasumsikan berdistribusi normal. Rata-rata geometrik dengan rumus:

$$p_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (2.78)$$

Merupakan komponen yang meminimalkan jumlah kesalahan:

$$\min \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\ln(a_{ij}) - \ln\left(\frac{p_i}{p_j}\right) \right)^2 \right] \quad (2.79)$$

Keuntungan utama metode ini adalah tidak adanya pembalikan peringkat karena inkonsistensi kanan-kiri. Baris dan kolom dalam pengertian geometrik memberikan peringkat yang sama walaupun dalam urutan terbalik.

Langkah selanjutnya yang diperlukan adalah sintesis prioritas lokal (*priorities synthesis*) di semua kriteria untuk menentukan prioritas global melalui agregasi. Pendekatan AHP mengadopsi agregasi aditif dengan normalisasi jumlah prioritas lokal untuk melakukan penggabungan. Tipe normalisasi ini disebut mode distributif. Agregasi aditif ini dinyatakan sebagai:

$$P_i = \sum_j w_j p_{ij} \quad (2.80)$$

Di mana P_i adalah prioritas global dari alternatif i , p_{ij} adalah prioritas lokal yang berhubungan dengan kriteria j , dan w_j adalah bobot kriteria j . Jika prioritas diketahui, mode distributif adalah satu-satunya pendekatan yang dapat mengakomodasi prioritas ini. Namun, jika salinan atau salinan dekat (perbandingan berpasangan hampir sama dengan yang asli) dari suatu alternatif ditambahkan atau dihilangkan, pembalikan peringkat (*rank reversal*) dari alternatif tersebut dapat terjadi. Fenomena pembalikan peringkat ini tidak hanya terjadi dalam AHP tetapi juga pada semua model aditif yang memerlukan langkah normalisasi. Bahkan, ketika jumlah alternatif diubah, penyebut untuk normalisasi juga berubah, yang menyiratkan perubahan skala dan kemungkinan pembalikan peringkat. Untuk menghindari masalah pembalikan peringkat ini, prioritas harus dinormalisasi dengan membaginya dengan penyebut yang sama dalam setiap konfigurasi masalah

mode ideal yang diusulkan. Normalisasi ini dilakukan dengan membagi skor setiap alternatif dengan skor alternatif terbaik pada masing-masing kriteria (Ishizaka dan Nemery, 2013).

Millet dan Saaty (2000) memberikan beberapa panduan yang dapat digunakan untuk normalisasi. Dalam sistem tertutup (*closed system*) seperti tidak ada alternatif yang akan ditambahkan atau dihapus, mode distributif harus digunakan. Sementara dalam sistem terbuka (*open system*) di mana alternatif dapat ditambahkan atau dihapus, preferensi alternatif diperbolehkan untuk bergantung pada alternatif lain. Dengan kata lain, fenomena pembalikan peringkat dapat diterima, maka mode distributif dapat digunakan. Akan tetapi, jika berada dalam sistem terbuka dan tidak ingin alternatif lain memengaruhi hasil, maka mode ideal disarankan.

Agregasi multiplikatif diusulkan untuk mencegah fenomena pembalikan peringkat yang diamati dalam mode distributif (Lootsma 1993). Bentuk agregasi ini dinyatakan sebagai:

$$P_i = \prod_j p_{ij}^{w_j} \quad (2.81)$$

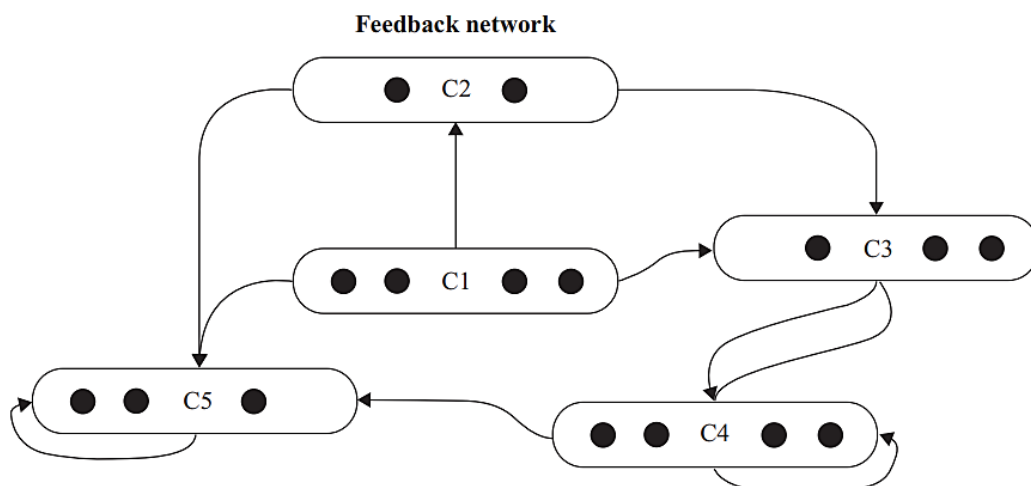
Agregasi multiplikatif memiliki sifat non-linear yang memungkinkan kompromi yang paling unggul untuk dipilih. Namun, agregasi aditif adalah satu-satunya cara untuk mengambil bobot yang tepat dari objek yang dikenal (Ishizaka dan Nemery, 2013).

Langkah terakhir dari proses pengambilan keputusan adalah analisis sensitivitas, di mana data input sedikit dimodifikasi untuk mengamati dampak pada hasil. Karena model keputusan yang kompleks sering secara inheren tidak jelas, analisis sensitivitas memungkinkan untuk membangkitkan skenario yang berbeda. Skenario yang berbeda ini dapat menghasilkan peringkat yang berbeda dan diskusi lebih lanjut mungkin diperlukan untuk mencapai konsensus. Jika peringkat tidak berubah, hasilnya dikatakan kuat (*robust*), jika tidak maka hasilnya sensitif terhadap perubahan. Analisis sensitivitas melalui perangkat lunak MakeItRational dilakukan dengan memvariasikan bobot kriteria dan mengamati dampak pada prioritas alternatif global (Ishizaka dan Nemery, 2013).

2.6.3 Analytic Network Process (ANP)

Dalam beberapa permasalahan keputusan praktis, terdapat kasus di mana bobot kriteria lokal (*local weight*) berbeda untuk setiap alternatif. AHP memiliki kesulitan dalam menyelesaikan kasus seperti itu karena AHP menggunakan bobot kriteria lokal yang sama untuk setiap alternatif. Untuk mengatasi kesulitan ini, Saaty (1994) mengusulkan proses jaringan analitik atau *Analytic Network Process* (ANP). ANP memungkinkan penggunaan bobot kriteria yang berbeda untuk setiap alternatif (Kahraman, 2008).

Menurut Ishizaka dan Nemery (2013) ANP adalah generalisasi AHP yang berkaitan dengan dependensi. Dalam AHP, diasumsikan bahwa kriteria bersifat independen. Jika mereka tidak independen, kriteria berkorelasi akan menghasilkan bobot yang terlalu tinggi dalam keputusan. Dalam metode MCDM tradisional, ketergantungan ini menyiratkan bobot yang lebih berat bagi kriteria gabungan. Metode ANP memungkinkan adanya dependensi atau umpan balik dan menghasilkan hasil yang lebih akurat karena lebih mendekati kenyataan. Ketergantungan dapat muncul di antara salah satu elemen dalam masalah keputusan, dapat berupa alternatif, kriteria, sub-kriteria, atau tujuan. Oleh karena itu, model tidak lagi linear seperti pada AHP, di mana elemen-elemen tersebut diatur dalam *level* atau tingkatan. Hirarki tidak diperlukan dalam model ANP, sehingga *level* digantikan gugus (*cluster*) dan setiap gugus berisi simpul (*node*) atau elemen seperti pada Gambar 2.17. Gugus dihubungkan oleh garis yang berarti bahwa elemen atau *node* yang dikandung terkoneksi (Ishizaka dan Nemery, 2013).



Gambar 2.17 Struktur Jaringan *Inner Dependency* dalam *Analytic Network Process* (ANP) (Ishizaka dan Nemery, 2013)

Ketergantungan inti (*inner dependency*) adalah korelasi elemen-elemen dalam kelompok yang sama. Struktur masalah ANP sangat mirip dengan AHP, dengan tiga tingkatan gugus: tujuan, kriteria dan alternatif. Perbedaannya adalah *loop* tambahan dalam gugus kriteria, yang menunjukkan ketergantungan inti. Selain matriks perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*), dalam ANP diperlukan pemodelan matriks ketergantungan inti. Matriks ini bertujuan untuk menangkap kepentingan relatif dari kriteria ketika kriteria dependen lain telah dievaluasi.

Ketergantungan inti juga dapat terjadi di gugus alternatif. Fenomena ini jarang terjadi dan jarang dipertimbangkan. Dua alternatif dapat berkorelasi negatif maupun positif. Kehadiran dua alternatif serupa dapat menurunkan daya tarik alternatif tersebut (Ishizaka dan Nemery, 2013).

Ketergantungan luar (*outer dependency*) atau umpan balik (*feedback*) adalah korelasi antara dua gugus. Seperti ketergantungan luar antara gugus kriteria dan gugus alternatif, bobot kriteria bergantung pada alternatif yang tersedia. Dalam AHP, umpan balik ini didapatkan melalui iterasi intuitif.

ANP menggunakan pendekatan yang lebih formal, alih-alih melakukan pembobotan kriteria sehubungan dengan tujuan, ANP terlebih dahulu menilai kepentingan relatif dari kriteria tersebut berkenaan dengan alternatif A lalu B (Ishizaka dan Nemery, 2013).

Menurut Ishizaka dan Nemery (2013), ketika masalah telah dirumuskan serta kriteria dan alternatif telah didefinisikan, dilakukan penyusunan matriks pengaruh (*influence matrix*). Matriks pengaruh ditandai dengan simbol silang untuk setiap ketergantungan antar elemen dalam jaringan.

Dalam AHP, matriks pengaruh akan terlihat seperti pada Tabel 2.8 di mana evaluasi kriteria bergantung pada tujuan, dan evaluasi alternatif bergantung pada kriteria. Dalam ANP, simbol silang tambahan dalam matriks pengaruh dimungkinkan untuk mengindikasikan ketergantungan antara elemen-elemen yang berbeda. Jika kriteria bergantung pada alternatif, gugus tujuan dihapus dari matriks pengaruh.

Tabel 2.8 *Influence Matrix* untuk Hirarki Sederhana (Ishizaka dan Nemery, 2013)

		Tujuan	Alternatif				Kriteria		
			A_1	A_2	A_3	A_4	C_1	C_2	C_3
Tujuan									
Alternatif	A_1						×	×	×
	A_2						×	×	×
	A_3						×	×	×
	A_4						×	×	×
Kriteri	C_1	×							
	C_2	×							
	C_3	×							

ANP bersandar pada teori yang sama dengan AHP, satu-satunya perbedaan adalah penggunaan supermatriks (*supermatrix*). Supermatriks adalah matriks yang terpartisi, di mana masing-masing matriks bagian (*submatrix*) terdiri dari serangkaian hubungan antara dua *node* dalam jaringan. Hal ini mirip dengan Tabel 2.8, tetapi terdiri dari nilai intensitas bukan simbol. Perhitungan prioritas didasarkan pada proses rantai Markov. Rantai Markov (*Markov chain*), adalah sistem yang mengalami transisi acak dari satu kondisi (*state*) ke kondisi lain tanpa adanya ingatan atau ketergantungan dengan masa lalu. Hal tersebut menyatakan bahwa hanya kondisi proses saat ini yang dapat memengaruhi keadaan atau kondisi berikutnya (Ishizaka dan Nemery, 2013).

Pengaruh setiap *node* pada *node* lainnya dalam suatu jaringan dapat dikumpulkan dalam *supermatrix* (Saaty, 1994). Supermatriks pada Tabel 2.9 menjelaskan pengaruh pada tiga gugus: tujuan, alternatif, dan kriteria. Jika tidak ada ketergantungan antara *node*, dimasukkan nilai nol. Sebagai contoh, hanya bagian berwarna abu-abu pada Tabel 2.9 yang selesai dilakukan. Jaringan menjadi hierarki dan, sebagai hasilnya, AHP dapat digunakan, namun perhitungannya masih bisa dilakukan menggunakan ANP. Hasilnya akan sama dalam kedua kasus, namun kerugiannya adalah perhitungannya lebih memakan waktu. AHP menggunakan penjumlahan berbobot sederhana (*simple weighted sum*) untuk melakukan agregasi, sedangkan ANP mengharuskan supermatriks untuk dikuadratkan berkali-kali. Karena itu, ANP tidak direkomendasikan jika tidak ada ketergantungan.

Tabel 2.9 *Supermatrix* tanpa Ketergantungan Luar dari Alternatif pada Kriteria
(Ishizaka dan Nemery, 2013)

Model Gugus Simpul		Tujuan	Alternatif			Kriteria		
			A_1	A_2	A_3	C_1	C_2	C_3
Tujuan		0	0	0	0	0	0	0
Alternatif	A_1	0	Vektor Eigen pengaruh pada setiap alternatif (karena ketergantungan inti pada gugus alternatif)			Prioritas lokal alternatif A_i sehubungan dengan kriteria C_i		
	A_2	0						
	A_3	0						
Kriteria	C_1	Bobot kriteria	0	0	0	Vektor Eigen pengaruh pada setiap kriteria (karena ketergantungan inti pada gugus kriteria)		
	C_2		0	0	0			
	C_3		0	0	0			

Tabel 2.10 *Supermatrix* dengan Ketergantungan Luar dari Alternatif pada Kriteria
(Ishizaka dan Nemery, 2013)

Model Gugus Simpul		Alternatif			Kriteria		
		A_1	A_2	A_3	C_1	C_2	C_3
Alternatif	A_1	Vektor Eigen pengaruh pada setiap alternatif (karena ketergantungan inti pada gugus alternatif)			Prioritas lokal alternatif A_i sehubungan dengan kriteria C_i		
	A_2						
	A_3						
Kriteria	C_1	Bobot kriteria sehubungan dengan setiap alternatif			Vektor Eigen pengaruh pada setiap kriteria (karena ketergantungan inti pada gugus kriteria)		
	C_2						
	C_3						

Jika terdapat ketergantungan luar dari alternatif pada kriteria, gugus tujuan dapat dihapus dan bobot yang berkaitan dengan setiap alternatif dapat ditambahkan, diperlihatkan dengan bagian berwarna abu-abu pada Tabel 2.10. Kolom supermatriks harus dinormalisasi sampai bernilai satu, agar memiliki matriks stokastik yang dapat digunakan dalam proses rantai Markov. Untuk menangkap transmisi pengaruh di sepanjang jalur jaringan yang mungkin, matriks dipangkatkan pada bilangan tertentu. Matriks dikuadratkan untuk mewakili pengaruh langsung dari satu elemen pada elemen lainnya. Dipangkatkan kubik untuk mengekspresikan pengaruh tidak langsung dari elemen kedua, dan

seterusnya. Karena matriks bersifat stokastik, matriks ini akan konvergen ke batas supermatriks, yang berisi prioritas global (Ishizaka dan Nemery, 2013).

2.6.4 Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL)

Metode DEMATEL (*Decision Making Trial and Evaluation Laboratory*) atau laboratorium percobaan dan evaluasi pengambilan keputusan, dikembangkan oleh Pusat Penelitian Geneva dari Battelle Memorial Institute untuk memvisualisasikan struktur hubungan kausal yang rumit melalui matriks atau digraf (Gabus dan Fontela, 1973). Metode ini adalah metode yang komprehensif untuk membangun dan menganalisis model struktural yang melibatkan hubungan sebab akibat antara faktor-faktor kompleks (Buyukozkan dan Ciftci, 2011). Hal tersebut memungkinkan pemangku masalah untuk melihat dengan jelas hubungan sebab akibat dari kriteria ketika mereka mengukur suatu masalah (Chen-Yi, dkk., 2007).

Sebagai semacam pendekatan pemodelan struktural, DEMATEL sangat berguna untuk menganalisis hubungan sebab dan akibat di antara komponen-komponen dalam suatu sistem. Metode ini, dapat mengkonfirmasi interdependensi (hubungan saling ketergantungan) antar faktor, membantu pengembangan peta yang mencerminkan hubungan relatif antar faktor-faktornya, dan dapat digunakan untuk menyelidiki dan memecahkan masalah yang rumit dan saling terkait. Metode ini tidak hanya mengubah hubungan saling ketergantungan menjadi kelompok sebab dan akibat melalui matriks tetapi juga menemukan faktor-faktor penting dari sistem struktur yang kompleks dengan bantuan diagram hubungan dampak (*impact relation diagram*) (Si, dkk., 2018).

Metode DEMATEL dapat mengubah keterkaitan atau interaksi antara faktor-faktor menjadi model struktural dari sistem yang dapat dipahami dan membaginya menjadi kelompok penyebab (*cause group*) dan kelompok akibat (*effect group*). Oleh karena itu, metode ini adalah alat yang berguna dan dapat diaplikasikan untuk menganalisis hubungan saling ketergantungan antara faktor-faktor dalam sistem yang kompleks dan memberikan peringkat untuk pengambilan keputusan strategis jangka panjang dan menunjukkan lingkup perbaikan. Langkah-langkah perumusan DEMATEL klasik dapat dilakukan sebagai berikut (Huang, dkk. 2007).

Langkah pertama adalah membuat matriks pengaruh langsung kelompok (*group direct-influence matrix*) yang dilambangkan dengan Z . Untuk menilai

hubungan antara n banyak faktor $F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ dalam suatu sistem, anggaplah bahwa sejumlah l orang pakar (*expert*) dalam kelompok keputusan $E = \{E_1, E_2, \dots, E_l\}$ diminta untuk menunjukkan pengaruh langsung (*direct influence*) yang dimiliki faktor F_i pada faktor F_j , menggunakan skala bilangan bulat: 0 = tidak berpengaruh, 1 = pengaruh rendah, 2 = pengaruh sedang, 3 = pengaruh tinggi, dan 4 = pengaruh yang sangat tinggi. Kemudian, dapat dibentuk matriks pengaruh-langsung individu (*individual direct-influence matrix*) $Z_k = [z_{ij}^k]_{n \times n}$ yang disediakan oleh pakar ke- k , di mana semua elemen diagonal utama (*principal diagonal*) sama dengan nol dan z_{ij}^k mewakili penilaian pembuat keputusan E_k tentang sejauh mana faktor F_i mempengaruhi faktor F_j . Dengan menggabungkan pendapat para ahli l , matriks pengaruh langsung kelompok (*group direct-influence matrix*) $Z = [z_{ij}^k]_{n \times n}$ dapat diperoleh dengan menggunakan:

$$z_{ij} = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l z_{ij}^k \quad (2.82)$$

Langkah kedua adalah membuat matriks pengaruh langsung (*direct-influence matrix*) yang dinormalisasi, dilambangkan dengan X . Ketika matriks pengaruh langsung kelompok (*group direct-influence matrix*) Z diperoleh, matriks pengaruh langsung normalisasi $X = [x_{ij}]_{n \times n}$ dapat diperoleh dengan menggunakan:

$$X = \frac{Z}{s} \quad (2.83)$$

$$s = \max \left(\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n z_{ij}, \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{i=1}^n z_{ij} \right) \quad (2.84)$$

Semua elemen dalam matriks X harus memenuhi $0 \leq x_{ij} < 1$, $0 \leq \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1$, dan setidaknya satu nilai i sedemikian rupa sehingga $\sum_{j=1}^n z_{ij} \leq s$. Langkah selanjutnya adalah membuat matriks pengaruh-total (*total-influence matrix*) yang dilambangkan dengan T . Menggunakan matriks pengaruh langsung yang dinormalisasi X , matriks pengaruh total $T = [t_{ij}]_{n \times n}$ kemudian dihitung dengan menjumlahkan efek langsung (*direct effect*) dan semua efek tidak langsung (*indirect effect*) dengan:

$$T = X + X^2 + X^3 + \dots + X^h = X(I - X)^{-1}, \quad h \rightarrow \infty \quad (2.85)$$

Di mana I merupakan matriks identitas. Langkah selanjutnya adalah membuat peta hubungan pengaruh atau *Influential Relation Map* (IRM). Pada langkah ini, vektor \vec{R} dan \vec{C} , mewakili jumlah baris dan jumlah kolom dari matriks pengaruh total T , yang didefinisikan oleh rumus berikut:

$$\vec{R} = [r_i]_{n \times 1} = \left[\sum_{j=1}^n t_{ij} \right]_{n \times 1} \quad (2.86)$$

$$\vec{C} = [c_j]_{1 \times n} = \left[\sum_{i=1}^n t_{ij} \right]_{n \times 1}^T \quad (2.87)$$

Di mana r_i adalah jumlah baris ke- i dalam matriks T dan menampilkan jumlah efek langsung dan tidak langsung yang diberikan dari faktor F_i ke faktor-faktor lainnya. Serupa dengan itu, c_j merupakan jumlah kolom ke- j dalam matriks T dan menggambarkan jumlah efek langsung dan tidak langsung yang diterima oleh faktor F_j dari faktor lain. Misalkan $i = j$ dan $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$, vektor sumbu horizontal $(\vec{R} + \vec{C})$ yang disebut sebagai *prominence* (fadilat) menggambarkan kekuatan pengaruh yang diberikan dan diterima dari faktor tersebut. Artinya, $(\vec{R} + \vec{C})$ menunjukkan tingkat peran sentral (*central role*) yang dimainkan oleh faktor dalam sistem. Sementara itu, vektor sumbu vertikal $(\vec{R} - \vec{C})$ yang disebut sebagai *relation* (relasi) menunjukkan efek bersih (*net effect*) yang diberikan oleh faktor tersebut terhadap sistem. Jika $(r_j - c_j)$ positif, maka faktor F_j memiliki pengaruh bersih (*net influence*) terhadap faktor-faktor lain dan dapat dikelompokkan ke dalam kelompok penyebab (*cause group*). Sementara, jika $(r_j - c_j)$ negatif, maka faktor F_j sedang dipengaruhi oleh faktor-faktor lain secara keseluruhan dan harus dikelompokkan ke dalam kelompok efek (*effect group*). IRM dapat dibuat dengan memetakan himpunan data atau *dataset* $(\vec{R} + \vec{C}, \vec{R} - \vec{C})$, yang memberikan informasi untuk kebutuhan pengambilan keputusan.

Penggunaan metode DEMATEL klasik saat ini dapat dibedakan menjadi tiga jenis: mengklarifikasi keterkaitan antara faktor atau kriteria, mengidentifikasi faktor-faktor kunci berdasarkan hubungan sebab akibat serta tingkat keterkaitan di

antaranya, dan menentukan bobot kriteria dengan menganalisis keterkaitan serta tingkat dampak kriteria (Si, dkk., 2018).

Pada langkah sebelumnya, IRM dibangun berdasarkan informasi dari matriks T untuk menjelaskan struktur hubungan faktor. Tetapi, dalam beberapa situasi, IRM akan terlalu rumit untuk menunjukkan informasi yang dapat dipahami untuk keperluan pengambilan keputusan jika semua hubungan dipertimbangkan. Oleh karena itu, nilai ambang (*threshold*) θ ditetapkan dalam banyak penelitian untuk menyaring efek yang dapat diabaikan. Artinya, hanya elemen dalam matriks T dengan tingkat pengaruh lebih besar dari nilai θ yang dipilih dan diubah menjadi IRM. Jika nilai ambang batas terlalu rendah, maka akan banyak faktor yang dimasukkan dan IRM akan terlalu rumit untuk dipahami. Sebaliknya, beberapa faktor penting dapat terabaikan jika nilai ambang batas terlalu tinggi. Dalam literatur, nilai ambang θ biasanya ditentukan oleh para ahli melalui diskusi, hasil tinjauan literatur, teknik brainstorming, rata-rata maksimum deentropi atau *Maximum Mean De-entropy* (MMDE), rata-rata semua elemen dalam matriks T, atau nilai maksimum elemen diagonal dari matriks T (Si, dkk., 2018).

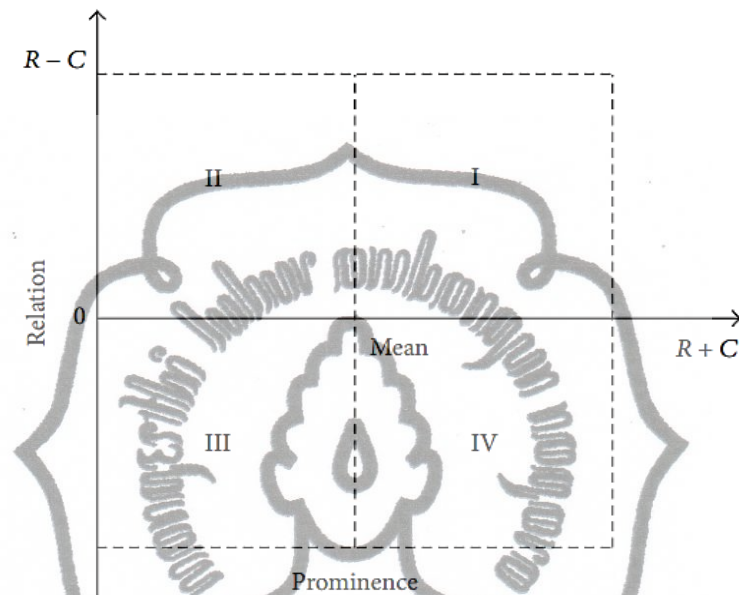
Langkah selanjutnya adalah mendapatkan matriks ketergantungan inti (*inner dependence matrix*) dari T. Ketika matriks pengaruh total T diperoleh, matriks ketergantungan inti T' diperoleh dengan melakukan normalisasi pada matriks T sehingga setiap jumlah kolom sama dengan 1. Matriks ketergantungan inti T' juga dapat diturunkan berdasarkan nilai ambang θ dan hanya faktor-faktor yang pengaruhnya dalam matriks T lebih besar dari θ dimasukkan ke dalam matriks T'. Untuk menafsirkan hasil dengan mudah dan menjaga kompleksitas sistem agar dapat dikelola, Tzeng (2014) membentuk matriks pengaruh total ternormalisasi yang disederhanakan \hat{T}^s menggunakan metode normalisasi dan nilai ambang batas θ . Pertama, matriks pengaruh total ternormalisasi $\hat{T} = [\hat{t}_{ij}]_{n \times n}$ dihitung dengan menggunakan persamaan berikut untuk membuat nilai matriks T berada dalam lingkup skala pengukuran.

$$\hat{t}_{ij} = \frac{(k - 0)(t_{ij} - \min(t_{ij}))}{\max(t_{ij}) - \min(t_{ij})} \quad (2.88)$$

Di mana k adalah skor tertinggi untuk mengukur tingkat dampak relatif antara faktor. $k = 4$ jika digunakan skala integral 0 hingga 4. Kemudian, matriks pengaruh

total ternormalisasi yang disederhanakan $\hat{T}^s = [\hat{t}_{ij}^s]_{n \times n}$ diperoleh dengan menghilangkan efek yang tidak signifikan dalam matriks \hat{T} berdasarkan pada nilai ambang batas θ .

$$\hat{t}_{ij}^s = \begin{cases} \hat{t}_{ij} & \text{untuk } \hat{t}_{ij} > \theta \\ 0 & \text{untuk } \hat{t}_{ij} \leq \theta \end{cases} \quad (2.89)$$



Gambar 2.18 Influential Relation Map Empat Kuadran (Si, dkk., 2018)

Setelah IRM diperoleh, faktor-faktor dalam sistem yang rumit disederhanakan menjadi empat kuadran sesuai dengan lokasi mereka dalam diagram. IRM dibagi menjadi empat kuadran I hingga IV, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.18, dengan menghitung rata-rata $(\overline{R + C})$. Faktor-faktor dalam kuadran I diidentifikasi sebagai faktor inti (*core factor*) atau pemberi pengaruh yang saling terkait (*intertwined givers*) karena memiliki *prominence* dan relasi yang tinggi. Faktor-faktor dalam kuadran II diidentifikasi sebagai faktor pendorong (*driving factors*) atau pemberi pengaruh otonom (*autonomous givers*) karena memiliki *prominence* yang rendah tetapi relasi yang tinggi. Faktor-faktor dalam kuadran III memiliki *prominence* dan relasi yang rendah dan relatif terputus dari sistem oleh karena itu disebut sebagai faktor independen (*independent factor*) atau penerima otonom (*autonomous receivers*). Faktor-faktor dalam kuadran IV memiliki *prominence* tinggi tetapi hubungan rendah oleh karena itu disebut sebagai faktor dampak (*impact factors*) atau penerima yang saling terkait (*intertwined*

receivers), yang dipengaruhi oleh faktor-faktor lain dan tidak dapat ditingkatkan secara langsung. Dari Gambar 2.18, pembuat keputusan dapat secara visual mendeteksi hubungan kausal yang kompleks antara faktor-faktor dan dapat menyoroti lebih lanjut informasi yang penting untuk pengambilan keputusan.

Langkah selanjutnya adalah membuat matriks pengaruh bersih (*net influence matrix*). Setelah memvisualisasikan hubungan kausal yang kompleks antara faktor-faktor menggunakan IRM, dapat dikembangkan matriks pengaruh bersih $N = [Net_{ij}]_{n \times n}$ untuk mengevaluasi kekuatan pengaruh satu faktor terhadap faktor lainnya, di mana,

$$Net_{ij} = t_{ij} - t_{ji} \quad (2.90)$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan bobot penting untuk kriteria. Dalam beberapa penelitian, teknik DEMATEL klasik digunakan untuk menghitung bobot kriteria. Biasanya, bobot kriteria ditentukan berdasarkan tingkat *prominence* ($\overrightarrow{R + \hat{C}}$) melalui prosedur normalisasi sebagai berikut:

$$w_i = \frac{r_i + c_i}{\sum_{i=1}^n r_i + c_i} \quad (2.91)$$

Untuk mengoreksi hubungan struktural antara kriteria, Khazai, dkk. (2013) mengusulkan penggunaan tingkat pengiriman (*degree of dispatching*) r_i , untuk menghitung bobot ketergantungan (*dependency weights*).

$$w_i^d = 1 - \frac{r_i - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}} \quad (2.92)$$

Dengan,

$$r_{\min} = n \left(\min_{i,j} t_{ij} \right) \quad (2.93)$$

$$r_{\max} = n \left(\max_{i,j} t_{ij} \right) \quad (2.94)$$

Kemudian, bobot keseluruhan dari setiap kriteria w_i didapatkan dari:

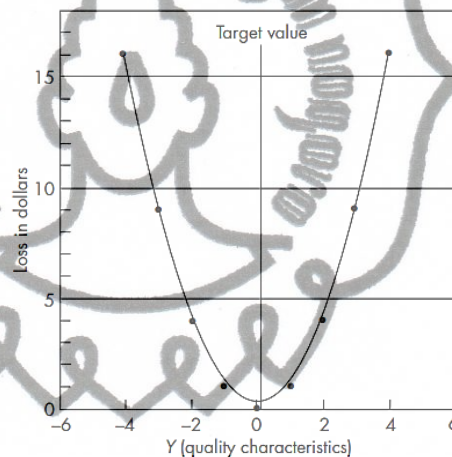
$$w_i = \frac{w_i^o}{\sum_{i=1}^n w_i^o} \quad (2.95)$$

$$w_i^o = w_i^{\text{im}} \times w_i^d \quad (2.96)$$

Di mana w_i^{im} adalah bobot kepentingan (*importance weight*) dari kriteria ke- i yang ditentukan oleh sekelompok pakar.

2.7 TAGUCHI LOSS FUNCTION

Menurut Ranjit K. Roy (2010) Metode Taguchi mulai dikembangkan oleh Dr. Genichi Taguchi pada tahun 1949. Setelah perang dunia kedua, Taguchi mulai mengembangkan metode baru untuk mengoptimalkan proses eksperimen. Dia mengembangkan teknik yang sekarang dikenal sebagai Metode Taguchi. Kontribusi terbesarnya tidak terletak pada formulasi matematis dari desain eksperimen atau *Design of Experiment* (DOE) melainkan pada filosofi yang menyertainya. Pendekatannya lebih dari sekadar metode untuk menjalankan eksperimen, melainkan konsep yang telah menghasilkan disiplin perbaikan kualitas yang unik dan berbeda dari praktik tradisional. Konsep yang dikembangkan oleh Taguchi antara lain adalah *quality-cost improvement*, pengukuran kualitas, desain eksperimen Taguchi, ANOVA (*Analysis of Variance*), dan *Taguchi loss function*.



Gambar 2.19 Grafik *Taguchi Loss Function* (Roy, 2010)

Fungsi kerugian (*loss function*) telah terbukti menjadi alat yang sangat baik untuk menentukan proses produksi produsen dan toleransi pemasok berdasarkan persepsi kualitas pelanggan. Taguchi mendefinisikan fungsi kerugian sebagai penyimpangan kuantitas yang sebanding dengan penyimpangan dari karakteristik kualitas target. Pada penyimpangan nol, kinerja tepat sasaran dan kerugiannya nol. Jika Y mewakili penyimpangan dari nilai target, maka fungsi kerugian $L(Y)$ adalah (Roy, 2010):

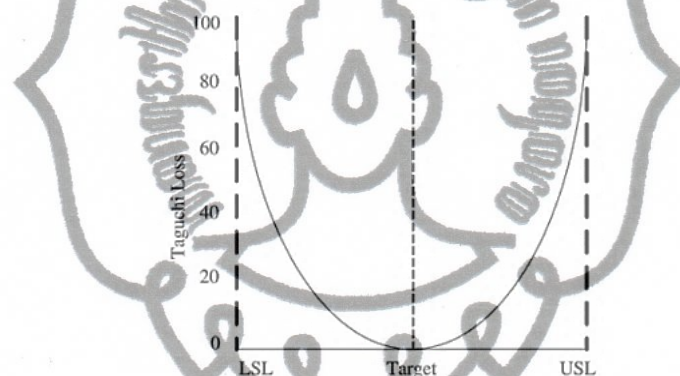
$$L(Y) = k(Y - Y_0)^2 \quad (2.97)$$

Di mana Y adalah karakteristik kualitas seperti dimensi, kinerja, dan seterusnya. Y_0 adalah nilai target untuk karakteristik kualitas tersebut. k adalah

konstanta yang bergantung pada struktur biaya proses pembuatan atau organisasi. Penting untuk diketahui bahwa (Roy, 2010):

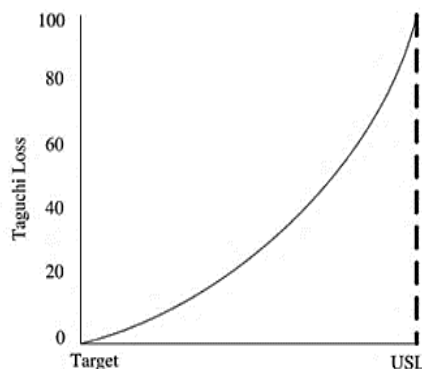
1. Istilah $Y - Y_0$ mewakili penyimpangan karakteristik kualitas Y dari nilai target Y_0 .
2. Persamaan untuk fungsi kerugian merupakan orde kedua dalam hal penyimpangan karakteristik kualitas.

Menurut Hacer G. Goren (2018) terdapat beberapa jenis karakteristik untuk fungsi kerugian Taguchi, diantaranya adalah *nominal is the best*, *lower is better*, dan *higher is better*. *Nominal is the best* adalah karakteristik kualitas yang bertujuan untuk mencapai nilai target. Variasi tidak terbatas pada satu arah dari nilai target, dimungkinkan terdapat pada pusat atau beberapa pergeseran dalam batas spesifikasi dua sisi (*two-sided specification limit*).



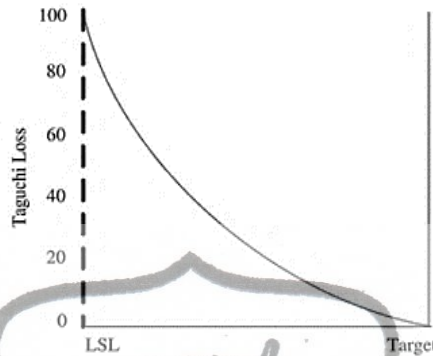
Gambar 2.20 Grafik *Taguchi Loss Function* untuk Karakteristik *Nominal is The Best* (Goren, 2018)

Lower is better atau *smaller the better* adalah karakteristik non-negatif yang bertujuan untuk mencapai nilai nol. Fungsi ini juga disebut fungsi batas spesifikasi maksimum satu sisi.



Gambar 2.21 Grafik *Taguchi Loss Function* untuk Karakteristik *Smaller the Better* (Goren, 2018)

Higher is better dan *larger the better* adalah karakteristik non-negatif yang bermaksud untuk mencapai nilai ideal tak hingga. Fungsi ini juga disebut fungsi batas spesifikasi minimum satu sisi.



Gambar 2.22 Grafik *Taguchi Loss Function* untuk Karakteristik *Larger the Better* (Goren, 2018)

Taguchi menentukan fungsi kerugian dari teorema ekspansi Taylor pada nilai target Y_0 . Sehingga,

$$L(Y) = L(Y_0) + L'(Y_0)(Y - Y_0) + \frac{1}{2!} L''(Y_0)(Y - Y_0)^2 + \dots \quad (2.98)$$

Di mana komponen dengan pangkat $(Y - Y_0)$ lebih tinggi dari 2 diabaikan karena memiliki nilai yang terlalu kecil untuk dipertimbangkan. Pada persamaan di atas $L(Y)$ minimum saat $Y = Y_0$. Sehingga turunan pertama $L'(Y) = 0$. Sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut (Roy, 2010):

$$L(Y) = L(Y_0) + \frac{1}{2} L''(Y_0)(Y - Y_0)^2 \quad (2.99)$$

Ekspresi $(1/2)L''(Y_0)$ dalam persamaan di atas adalah konstanta dan dapat digantikan oleh konstanta k . Selain itu, jika Y_0 adalah nilai rata-rata dari produk atau proses, maka persamaan tersebut diinterpretasikan sebagai kerugian mengenai rata-rata produk atau proses ditambah kerugian akibat perpindahan rata-rata proses dari target (Roy, 2010).

$$L(Y) = k(Y - Y_0)^2 \quad (2.100)$$

Misal L_0 merupakan kerugian saat $Y = Y_0 + \Delta$, maka didapatkan bahwa

$$L_0 = k(Y_0 + \Delta - Y_0)^2 \quad (2.101)$$

Sehingga,

$$k = \frac{L_0}{\Delta^2} \quad (2.102)$$

Konstanta biaya tersebut dipakai pada karakteristik kualitas *nominal is the best* dan *smaller the better*, bila diintegrasikan dalam persamaan *loss function* berikut.

$$L(Y) = k(Y - Y_0)^2 \quad (2.103)$$

Maka akan didapatkan persamaan yang sepenuhnya mendefinisikan fungsi kerugian untuk karakteristik *nominal is the best*, yaitu

$$L(Y) = \frac{L_0}{\Delta^2} (Y - Y_0)^2 \quad (2.104)$$

dan bila diintegrasikan dalam persamaan *loss function* berikut

$$L(Y) = kY^2 \quad (2.105)$$

Maka akan didapatkan persamaan yang sepenuhnya mendefinisikan fungsi kerugian untuk karakteristik *smaller the better*, yaitu

$$L(Y) = L_0 \left(\frac{Y}{\Delta} \right)^2 \quad (2.106)$$

Di mana L_0 adalah rata-rata kerugian atau biaya yang dikeluarkan, Δ merupakan toleransi, L merupakan kerugian kualitas, Y merupakan karakteristik kualitas, dan Y_0 merupakan nilai target dari karakteristik kualitas yang dituju.

Sementara, untuk karakteristik kualitas *larger the better* konstanta biaya didefinisikan sebagai

$$k = L_0 \Delta^2 \quad (2.107)$$

bila diintegrasikan dalam persamaan *loss function* berikut

$$L(Y) = k \frac{1}{Y^2} \quad (2.108)$$

Maka akan didapatkan persamaan yang sepenuhnya mendefinisikan fungsi kerugian untuk karakteristik *larger the better* yaitu

$$L(Y) = L_0 \left(\frac{\Delta}{Y} \right)^2 \quad (2.109)$$

2.8 LINEAR PROGRAMMING

Programa matematika (*mathematical programming*) atau teori optimasi (*optimization theory*) adalah cabang matematika yang berurusan dengan teknik untuk memaksimalkan atau meminimalkan fungsi tujuan yang bergantung pada batasan linear, nonlinear, dan bilangan bulat pada variabel keputusan. Programa

linear (*linear programming*) berkaitan dengan maksimalisasi atau minimalisasi fungsi objektif linear dalam banyak variabel yang bergantung pada kendala persamaan dan pertidaksamaan linear (Dantzig dan Thapa, 1997).

Menurut Hillier dan Lieberman (2001) program linear menggunakan model matematika untuk menggambarkan masalah yang menjadi perhatian. Linear berarti bahwa semua fungsi matematika dalam model ini harus merupakan fungsi linear. Program di sini tidak merujuk pada pemrograman komputer, melainkan sebagai sinonim untuk perencanaan. Dengan demikian, program linear melibatkan perencanaan kegiatan untuk mendapatkan hasil yang optimal, yaitu hasil yang mencapai tujuan yang ditentukan dengan baik (sesuai dengan model matematika) di antara semua alternatif yang layak (*feasible*). Meskipun masalah pengalokasian sumber daya untuk kegiatan adalah jenis aplikasi program linear yang paling umum, program linear memiliki banyak aplikasi penting lainnya. Setiap masalah yang model matematisnya cocok dengan format umum model program linear adalah masalah program linear.

Dalam sebagian besar permasalahan, variabel keputusan sebenarnya masuk akal hanya jika memiliki nilai bilangan bulat (*integer*). Sebagai contoh, penugasan orang, mesin, dan kendaraan untuk kegiatan. Jika memerlukan nilai bilangan bulat dalam penyelesaian masalah formulasi program linear, maka permasalahan ini disebut sebagai permasalahan program bilangan bulat atau *integer programming*. Istilah yang lebih lengkap adalah *integer linear programming*. Model matematika untuk program bilangan bulat sama dengan model program linear hanya terdapat satu batasan tambahan yaitu bahwa variabel harus memiliki nilai bilangan bulat. Jika hanya beberapa variabel yang diperlukan untuk memiliki nilai bilangan bulat atau *integer* sehingga asumsi divisibilitas berlaku untuk variabel lainnya, model ini disebut sebagai program bilangan bulat campuran atau *Mixed Integer Programming* (MIP) atau istilah yang lebih lengkap *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) (Hillier dan Lieberman, 2001).

Permasalahan program linear dilakukan untuk menentukan nilai variabel sistem yang:

1. Nonnegatif atau memenuhi batas tertentu
2. Memenuhi sistem kendala linear

3. Meminimalkan atau memaksimalkan bentuk linear dalam variabel yang disebut sebagai tujuan.

Ada dua pendekatan umum untuk merumuskan masalah program linear, yaitu pendekatan kolom atau *column (recipe/activity)* dan pendekatan baris atau *row (material balance)*. Kedua pendekatan ini akan menghasilkan model akhir yang sama, pendekatan yang diambil akan tergantung terutama pada bagaimana pemodel ingin memikirkan dan mengatur data yang diperlukan untuk masalah tersebut. Dalam situasi tertentu, akan lebih mudah bagi pemodel untuk melihat sistem sebagai kumpulan kegiatan atau proses yang mungkin terlibat daripada kumpulan pernyataan tentang batasan penggunaan sumber daya langka (Dantzig dan Thapa, 1997).

Pendekatan kolom (*column*) digunakan jika mempertimbangkan sistem sebagai sesuatu yang dapat terurai menjadi sejumlah fungsi dasar berupa kegiatan. Suatu kegiatan dianggap sebagai semacam *black box* atau kotak hitam di mana mengalir masukan nyata (*tangible input*) dan mengalir keluar sebagai suatu keluaran (*output*). Pemodel menempatkan perhatian mengenai apa yang terjadi pada *input* di dalam kotak hitam. Bagi pembuat keputusan, mereka hanya tertarik pada tingkat aliran masuk dan keluar dari aktivitas. Berbagai macam aliran yang terjadi disebut sebagai *item*. Kuantitas pada setiap aktivitas disebut tingkat aktivitas (*activity level*). Untuk mengubah tingkat aktivitas, perlu untuk mengubah kuantitas setiap jenis aliran masuk dan keluar dari aktivitas. Dalam program linear, tingkat aktivitas tidak ditentukan tetapi merupakan variabel keputusan yang harus ditentukan untuk memenuhi persyaratan tertentu (Dantzig dan Thapa, 1997).

Langkah-langkah untuk merumuskan program linear dengan pendekatan kolom adalah sebagai berikut (Dantzig dan Thapa, 1997):

1. Mendefinisikan Himpunan Aktivitas

Menguraikan seluruh sistem yang sedang dipelajari ke dalam semua fungsi dasar, kegiatan, atau prosesnya dan memilih unit untuk setiap jenis kegiatan atau proses dalam hal kuantitas atau levelnya yang dapat diukur. Tingkat aktivitas biasanya dilambangkan dengan x_j .

2. Mendefinisikan Himpunan *Item*

Menentukan kelas objek (*item*) yang diperlukan sebagai *input* atau yang diproduksi sebagai *output* oleh aktivitas, dan pilih unit untuk mengukur setiap jenis *item*. Satu-satunya *item* yang perlu dipertimbangkan adalah *item* yang berpotensi menjadi hambatan. Pilih satu *item* sehingga jumlah bersih yang dihasilkan oleh sistem secara keseluruhan dapat mengukur biaya. Indeks i biasanya digunakan untuk merujuk pada jenis *item* yang dikonsumsi atau diproduksi oleh kegiatan.

3. Mendefinisikan Koefisien *Input Output*

Menentukan jumlah setiap *item* yang dikonsumsi atau diproduksi oleh operasi setiap aktivitas di tingkat unitnya. Koefisien ini adalah faktor proporsionalitas antara tingkat aktivitas dan aliran barang. Koefisien *input-output* biasanya dilambangkan dengan a_{ij} .

4. Menentukan Alur Eksogen

Menentukan jumlah eksogen dari setiap *item* yang dipasok dari luar sistem ke dalam sistem secara keseluruhan dan tentukan jumlah eksogen yang dibutuhkan oleh luar sistem dari dalam sistem secara keseluruhan. Segala sesuatu di luar sistem disebut eksogen. Eksogen biasanya dilambangkan dengan b_i .

5. Menyiapkan Persamaan Keseimbangan Material (*Material Balance*)

Tetapkan tingkat aktivitas yang tidak diketahui, biasanya non-negatif, untuk semua kegiatan. Kemudian, untuk setiap *item*, dapat ditulis persamaan keseimbangan material dengan merujuk pada tablo yang menyatakan bahwa jumlah aljabar dari aliran *item* ke dalam setiap aktivitas sama dengan aliran eksogen *item* tersebut.

Bagi banyak pemodel, cara alami untuk membuat model program linear adalah dengan menyatakan secara langsung hubungan keseimbangan material (*material balance*) dalam hal variabel keputusan. Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut (Dantzig dan Thapa, 1997):

1. Mendefinisikan Variabel Keputusan

Langkah ini mirip dengan pendekatan kolom. Tentukan semua variabel keputusan yang merupakan aktivitas yang memiliki tingkat aktivitas. Variabel keputusan biasanya dilambangkan dengan x_j .

2. Mendefinisikan Himpunan *Item*

Seperti dalam pendekatan kolom ditentukan kelas objek (*item*) yang dianggap sebagai hambatan potensial dan memilih unit untuk mengukur setiap jenis item. Indeks i biasanya digunakan untuk merujuk pada jenis *item* yang dikonsumsi atau diproduksi oleh kegiatan.

3. Menentukan Batasan dan Fungsi Objektif

Untuk setiap *item*, tulis batasan atau *constraint* yang terkait dengan hambatan dengan mencatat berapa banyak *item* yang digunakan atau diproduksi oleh setiap unit variabel keputusan x_j . Hal ini menghasilkan suatu sistem ketidaksetaraan keseimbangan material (*material balance inequalities*) tergantung pada apakah kekurangan (*shortage*) atau kelebihan (*surplus*) suatu barang diperbolehkan. Selanjutnya, tuliskan fungsi objektif yang dibentuk dengan mengalikan setiap variabel keputusan dengan biaya unitnya dan menjumlahkannya.

Definisi matematika dari program linear dalam bentuk standar adalah untuk menemukan nilai $x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0$ dan $\min(Z)$ yang memuaskan (Dantzig dan Thapa, 1997).

$$\begin{aligned}
 c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n &= z \text{ (Min)} \\
 a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &= b_1 \\
 a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &= b_2 \\
 &\vdots \\
 a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &= b_m
 \end{aligned}
 \tag{2.110}$$

Di mana Z merupakan ukuran performansi keseluruhan dari model. x_j merupakan tingkat aktivitas untuk $j = 1, 2, \dots, n$. c_j merupakan faktor yang meningkatkan nilai Z , dihasilkan dari setiap peningkatan unit aktivitas j . b_i merupakan jumlah sumber daya i yang tersedia untuk dialokasikan ke kegiatan j . a_{ij} merupakan jumlah sumber daya i yang dikonsumsi oleh setiap unit aktivitas j .

Model ini mengevaluasi masalah dalam pembuatan keputusan tentang tingkat kegiatan. Sehingga x_j disebut variabel keputusan. Sementara, nilai c_j , b_i , dan a_{ij} adalah konstanta masukan untuk model atau disebut juga sebagai parameter model (Dantzig dan Thapa, 1997).

Rumusan model matematik program linear untuk masalah umum pengalokasian sumber daya untuk suatu kegiatan adalah sebagai berikut (Hillier dan Lieberman, 2001).

$$\text{Maximize } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n$$

Dibatasi oleh:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n &\leq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n &\leq b_2 \\ &\vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n &\leq b_m \\ x_1, x_2, \dots, x_n &\geq 0 \end{aligned} \quad (2.111)$$

Dalam notasi vektor-matriks model matematik program linear dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\text{Minimize } \vec{c}^T \vec{x} = \vec{z}$$

Dibatasi oleh:

$$\begin{aligned} A\vec{x} &= b \quad A: m \times n \\ \vec{x} &\geq 0 \end{aligned} \quad (2.112)$$

Menurut Dantzig dan Thapa (1997), dalam bentuk standar program linear, tingkat kegiatannya tidak negatif. Dalam banyak masalah di dunia nyata, tingkat aktivitasnya berada di antara suatu batasan (*bounds*). Terdapat dua jenis *bounds* dalam program linear yaitu batasan non-negatif (*nonnegativity*) serta batasan atas dan bawah. Biasanya, dalam model program linear, tingkat kegiatannya tidak negatif. Karakteristik variabel model program linear ini dikenal sebagai asumsi nonnegativitas. Dalam program linear, pembatasan nonnegativitas pada variabel dilambangkan dengan $x_j \geq 0$.

Terkadang tingkat aktivitas yang diperlukan tidak kurang dari beberapa kuantitas yang disebut sebagai batas bawah (*lower bounds*). Batas ini mungkin

positif atau negatif. Mungkin juga terdapat batasan lain pada variabel, sehingga tingkat aktivitas tidak dapat melebihi jumlah tertentu yang disebut sebagai batas atas (*upper bounds*). Untuk aktivitas j , batasan ini dapat didefinisikan oleh $L_j \leq x_j \leq U_j$.

Dantzig dan Thapa (1997) menyebutkan bahwa model program linear harus memenuhi asumsi atau aksioma tertentu, yaitu proporsionalitas (*portionality*), aditivitas (*additivity*), dan kontinuitas (*continuity*). Asumsi proporsionalitas mengimplikasikan bahwa jika unit a_{ij} dari *item* ke- i diperlukan oleh satu unit tingkat aktivitas ke- j , maka x_j unit dari aktivitas ke- j membutuhkan sebesar $a_{ij}x_j$ unit dari *item* i . Asumsi proporsionalitas juga menyiratkan bahwa jika diperlukan biaya c_j untuk membeli satu unit tingkat aktivitas j maka diperlukan biaya sejumlah c_jx_j untuk membeli x_j unit aktivitas j .

Asumsi aditivitas menyiratkan bahwa jika a_{ij} unit *item* ke- i disediakan oleh satu unit aktivitas j dan a_{ik} unit *item* ke- i disediakan oleh satu unit aktivitas k maka $a_{ij}x_j + a_{ik}x_k$ unit *item* ke- i disediakan oleh x_j unit aktivitas j dan x_k unit aktivitas k . Asumsi aditivitas juga menyiratkan bahwa jika diperlukan biaya c_j untuk membeli satu unit aktivitas j dan diperlukan biaya c_k untuk membeli satu unit aktivitas k , maka diperlukan biaya $c_jx_j + c_kx_k$ untuk membeli x_j unit aktivitas j dan x_k unit aktivitas k . Artinya, asumsi aditivitas menyiratkan bahwa fungsi objektif secara aditif dapat dipisahkan dalam variabel, sehingga tidak ada istilah variabel campuran seperti $c_{kj}x_kx_j$.

Tingkat aktivitas atau variabel, dapat berupa nilai riil apa pun dalam rentang yang diizinkan. Jadi, jika suatu masalah mensyaratkan bahwa beberapa tingkat aktivitas harus berupa salah satu nilai dari himpunan nilai yang terbatas (seperti nilai diskrit dari bilangan riil atau bilangan bulat), permasalahan tersebut tidak dapat direpresentasikan sebagai program linear. Oleh karena itu, dibutuhkan asumsi kontinuitas di mana seluruh persamaan dalam program linear harus berada dalam rentang kontinu.

Syarat utama dari program linear adalah bahwa fungsi tujuan dan semua kendala harus linear. Jika suatu kendala melibatkan dua variabel keputusan, dalam diagram dimensi dua akan berupa garis lurus. Begitu juga, suatu kendala yang

melibatkan tiga variabel akan menghasilkan suatu bidang datar dan kendala yang melibatkan n variabel akan menghasilkan *hyperplane* (bentuk geometris yang rata) dalam ruang berdimensi n . Kata *linear* secara tidak mengartikan bahwa hubungannya proporsional, yang berarti tingkat perubahan atau kemiringan hubungan fungsional itu adalah konstan dan karena itu perubahan nilai variabel akan mengakibatkan perubahan relatif nilai fungsi dalam jumlah yang sama.

2.9 PEMODELAN SISTEM

Untuk mengetahui definisi dari model dan tujuan dari kegiatan memodelkan sistem, diperlukan pemahaman mengenai konsep dari sebuah sistem dan bagaimana cara mendefinisikan dan mendeskripsikan sebuah sistem.

2.9.1 Konsep Sistem

Salah satu sumber utama kebingungan ketika mendefinisikan suatu kumpulan hal yang terorganisir sebagai sistem adalah mengenai pandangan di luar sana (*out-there view*) tentang sistem yang berbeda dengan pandangan pengamat (*inside-us view*) tentang sistem. *Out-there view* adalah perspektif di mana sistem dipandang sebagai hal fisik dan abstrak yang membentuk keseluruhan kumpulan, hubungan, dan tingkah laku sistem. Sistem dilihat sebagai sesuatu yang absolut, sistem berwujud maupun akan berwujud pada suatu periode waktu dan independen dari keberadaan pengamat. *Inside-us view* adalah perspektif di mana sistem tidak lagi dipandang sebagai keberadaan yang independen dari pengamat, melainkan telah menjadi konstruksi mental dan pribadi bagi pengamat. Pilihan apa yang akan dimasukkan atau dikecualikan akan sangat tergantung pada apa yang pengamat tersebut lihat sebagai suatu sistem terkait dengan interpretasi pengamat (Daellenbach dan McNickle, 2005).

Dalam berbagai macam penelitian, pandangan pengamat (*inside-us*) terhadap sistem merupakan hal yang penting. Sistem dipandang sebagai konseptualisasi manusia. Meskipun sistem mungkin berwujud di luar sana, hanya pengamatan manusia yang memandang sesuatu sebagai suatu sistem. Sistem adalah konseptualisasi manusia yang didorong oleh fakta bahwa mayoritas sistem yang dipikirkan oleh manusia sebagai analisis bukanlah pandangan pribadi manusia tentang sejumlah hal nyata yang ada di luar sana, melainkan adalah visi seperti

konseptualisasi mental dari hal-hal yang mungkin belum ada, hal-hal yang direncanakan untuk diwujudkan, seperti perubahan atau perbaikan besar yang direncanakan untuk operasi yang telah ada. Kadang-kadang visi ini adalah idealisasi dari apa yang ingin manusia lihat, ideal yang manusia ketahui tidak akan pernah menjadi kenyataan sepenuhnya, tetapi tetap berusaha untuk mewujudkan setidaknya sebagian dari ideal tersebut (Daellenbach dan McNickle, 2005).

Menurut Daellenbach dan McNickle (2005) cara sesuatu dipandang sebagai suatu sistem tergantung pada kepentingan pribadi pengamat. Tujuan mempelajari kumpulan hal yang terorganisir sebagai suatu sistem akan menentukan jenis sistem yang dilihat. Namun, setiap orang yang melihat situasi yang sama dengan tujuan yang sama dapat membentuk konseptualisasi yang sangat berbeda dari kumpulan hal tersebut. Alasan untuk ini adalah cara seseorang memandang suatu situasi dipengaruhi oleh faktor-faktor yang sangat pribadi bagi individu tersebut, aspek-aspek yang bahkan mungkin tidak sepenuhnya disadari oleh orang tersebut.

Beberapa aspek yang memengaruhi pengamat dalam membuat deskripsi sistem adalah pandangan dunia (*weltanschauung*) dari pengamat dan efek dari pengetahuan sebelumnya (*partial knowledge*). Oleh karena itu, cara pengamat memandang sesuatu sebagai suatu sistem adalah sebagian besar subjektif. Sehingga penting untuk mengenali bahwa ketika orang lain melihat sistem yang sama, sangat mungkin untuk orang tersebut tidak menyimpulkan definisi yang sama dengan anda. Orang tersebut mungkin tidak hanya mengaitkan sistem dengan tujuan yang berbeda, tetapi juga dapat memasukkan dan mengecualikan aspek yang berbeda dalam sistem. Sehingga, suatu definisi tidak dapat dilabeli 'benar' atau 'valid' dan definisi yang lain dianggap 'salah' atau 'tidak valid'. Selama masing-masing definisi konsisten secara logis, masing-masing valid untuk pemiliknya. Satu-satunya penilaian yang dapat dibuat adalah bahwa salah satu definisi mungkin lebih efektif, mendalam, berguna, atau dapat dipertahankan dalam maksud atau tujuan pembangunan definisi. Dapat dikatakan bahwa pemikiran sistem (*system thinking*) bukanlah permasalahan yang hitam dan putih, tetapi merupakan kumpulan berbagai corak abu-abu (Daellenbach dan McNickle, 2005).

Sehingga, menurut Daellenbach dan McNickle (2005) definisi dari sistem secara formal adalah sebagai berikut:

1. Sistem adalah kumpulan komponen yang terorganisir. Terorganisir berarti bahwa terdapat hubungan khusus antara komponen-komponen tersebut. Hubungan antara komponen dapat bersifat *uni-directional* dan/atau kausal, yaitu bagian A mempengaruhi bagian B, tetapi sebaliknya A tidak dipengaruhi oleh B. Hubungan antar komponen juga mungkin mutual, yaitu A dan B keduanya saling mempengaruhi. Pengaruh timbal balik atau kausalitas meningkatkan kompleksitas perilaku sistem.
2. Sistem melakukan sesuatu seperti menunjukkan perilaku yang unik pada sistem.
3. Setiap komponen berkontribusi terhadap perilaku sistem dan perilakunya sendiri dipengaruhi oleh keberadaannya dalam sistem. Tidak ada komponen yang memiliki efek independen pada sistem. Bagian yang memiliki efek independen dan tidak terpengaruh oleh sistem adalah *input*, lihat pada pokok (5). Perilaku sistem berubah jika ada komponen yang dilepas atau ditinggalkan.
4. Kelompok komponen dalam sistem dapat dengan sendirinya memiliki sifat seperti pada pokok (1), (2), dan (3), yaitu mereka dapat membentuk subsistem.
5. Sistem memiliki bagian luar (lingkungan) yang menyediakan *input* ke dalam sistem dan menerima *output* dari sistem.
6. Sistem telah diidentifikasi oleh seseorang dengan minat khusus untuk tujuan tertentu.

Sehingga dapat diketahui bahwa unsur-unsur yang penting dari suatu sistem adalah komponennya, hubungan antara komponen, perilaku atau kegiatan sistem, lingkungan yang relevan, *input* dari lingkungan, *output* ke lingkungan, dan minat khusus pengamat.

Menurut Daellenbach dan McNickle (2005) seperti halnya dalam semua disiplin ilmu, sistem diklasifikasikan menurut sifat yang membedakannya. Berdasarkan keadaan terhadap perubahan waktu, sistem dibedakan menjadi sistem

diskrit dan kontinu. Pada sistem diskrit, terjadi perubahan keadaan (*state*) pada titik-titik waktu yang diskrit. Di antara titik-titik waktu ini, kondisi sistem tetap tidak berubah. Pada sistem kontinu, keadaan (*state*) sistem terus berubah secara kontinu pada suatu rentang waktu. Karena variabel keadaan adalah variabel kontinu, jumlah keadaan yang mungkin adalah tak terhingga besar, bahkan jika setiap variabel dibatasi pada rentang nilai yang kecil. Berdasarkan prediktabilitas perilakunya, sistem dibedakan menjadi sistem deterministik dan sistem stokastik.

Jika perilaku suatu sistem dapat diprediksi dalam setiap detail, sistem tersebut bersifat deterministik. Namun, beberapa fenomena dalam kehidupan nyata, terutama yang melibatkan orang, tidak berperilaku dengan cara deterministik. Fenomena ini umumnya tidak sepenuhnya dapat diprediksi, beberapa perilaku mungkin dipengaruhi oleh *input* acak atau stokastik, sistem seperti ini disebut dengan sistem stokastik. Berdasarkan interaksi sistem dengan lingkungannya, sistem dibedakan menjadi sistem terbuka dan sistem tertutup. Sistem tertutup tidak memiliki interaksi apa pun dengan lingkungannya, tidak ada *input* maupun *output*. Bahkan, sistem ini tidak memiliki lingkungan. Sebaliknya, sistem terbuka berinteraksi dengan lingkungan, dengan menerima *input* dari lingkungan dan menyediakan *output* untuk lingkungan. (Daellenbach dan McNickle, 2005).

2.9.2 Konsep Model

Model memiliki banyak arti, didefinisikan dalam *Webgi's Collegiate Dictionary* sebagai deskripsi atau analogi yang digunakan untuk membantu memvisualisasikan sesuatu (sebagai atom) yang tidak dapat diamati secara langsung, walaupun dalam beberapa kasus kita mungkin dapat mengamati aspek tertentu dari itu. Hal ini tampaknya persis seperti apa yang dilakukan ketika mendefinisikan suatu sistem. Oleh karena itu, model sistem adalah representasi dari semua bagian penting dari suatu sistem. Karena suatu sistem adalah konstruksi mental abstrak, sebuah konseptualisasi pribadi dan karenanya tidak independen dari pribadi yang bersangkutan (berhubungan dengan konsep subjektivitas konsensual). Jadi, model adalah abstraksi lain pada tingkat yang berbeda, dan bukan hal yang nyata (Daellenbach dan McNickle, 2005).

Model dapat berupa suatu model ikonik, analog, atau simbolis. Model ikonik adalah reproduksi dari benda-benda fisik, biasanya ke skala yang berbeda dan

kurang detail, seperti model miniatur mobil, maket arsitektur bangunan, atau pesawat skala kecil yang diuji dalam terowongan angin untuk mempelajari aerodinamika dari benda asli. Model analog adalah representasi yang menggantikan sifat atau fitur dari apa yang dimodelkan dengan cara alternatif dengan sedemikian rupa sehingga model mampu meniru aspek apa pun dari hal yang nyata yang menarik bagi pemodel. Contoh dari model analog adalah gambar *display* yang terus diperbarui yang diamati oleh pengontrol lalu lintas udara pada monitor radar adalah analog dari lalu lintas udara di sektor tertentu dari ruang udara nyata. Model simbolik adalah representasi dari hubungan antara berbagai entitas atau konsep melalui simbol. Model simbolik dapat berupa grafik seperti diagram garis yang menggambarkan bagaimana variabel tertentu bervariasi sebagai fungsi dari variabel lain atau seperti diagram alir yang menggambarkan suatu proses atau kegiatan. Jenis lain dari model simbolik yang banyak digunakan dalam *hard operations research* adalah model matematika di mana hubungan antara entitas direpresentasikan dalam bentuk ekspresi matematika, seperti fungsi, persamaan, dan pertidaksamaan (Daellenbach dan McNickle, 2005).

Seperti yang dinyatakan oleh definisi Webster, model hanyalah sebagian representasi dari apa yang seharusnya ditangkap dalam sistem. Model akan berisi berbagai macam perkiraan dan penyederhanaan melalui asumsi, beberapa dari asumsi itu dapat dianggap tidak penting tetapi ada pula yang memiliki konsekuensi besar. Ada tiga alasan utama untuk melakukan penyederhanaan dan perkiraan (Daellenbach dan McNickle, 2005):

1. Untuk memastikan bahwa semua pemangku kepentingan menyadari keterbatasan model.
2. Untuk menyoroti kebutuhan untuk mempelajari perubahan perilaku sistem dengan memodifikasi perkiraan dan asumsi jika memungkinkan.
3. Untuk memastikan bahwa, jika model ditinjau kembali pada suatu waktu di masa mendatang dengan maksud untuk melakukan modifikasi, analisis sepenuhnya menyadari setiap perkiraan dan asumsi yang dimasukkan di dalamnya.

Menurut Daellenbach dan McNickle (2005) deskripsi sistem atau model sistem harus terdiri dari beberapa hal yang penting dan perlu diperhatikan, yaitu:

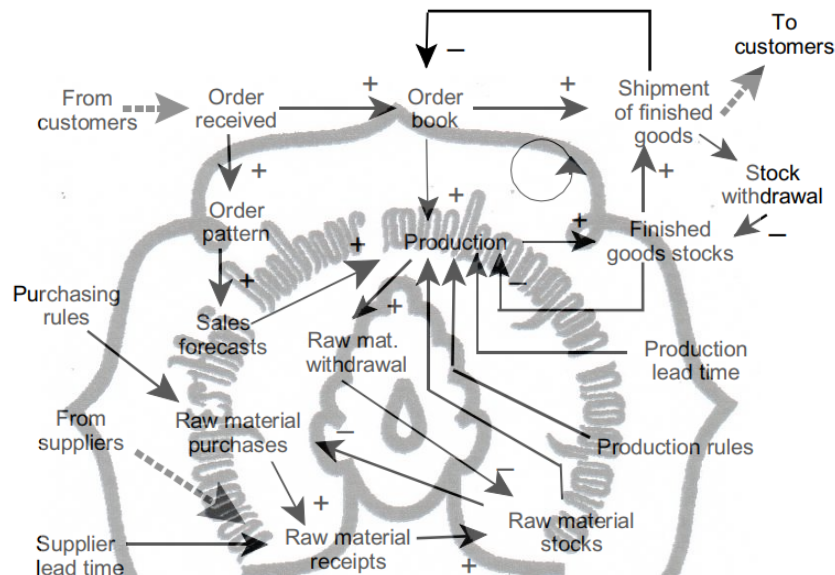
1. Proses transformasi atau kegiatan dalam sistem.
2. Batasan pada sistem seperti apa yang ada di dalam sistem untuk memperkecil sistem sesuai dengan minat pengamatan dan apa yang membentuk lingkungannya atau seberapa luas minat pengamatan.
3. Komponen dan subsistem dari sistem terbatas yang terlibat dalam proses transformasi, baik hubungan dinamis maupun hubungan stabil atau struktur.
4. Masukan tak terkendali (*uncontrollable input*) dalam sistem dari lingkungan serta masukan kontrol (*control input*) yang berupa keputusan dan aturan keputusan.
5. Keluaran (*output*) dari sistem baik diinginkan (*desired output*) maupun tidak diinginkan (*undesired output*), baik direncanakan (*planned output*) maupun tidak direncanakan (*unplanned output*), dan keluaran mana yang berfungsi sebagai ukuran kinerja untuk sistem.

2.9.3 Causal Loop Diagram dan Influence Diagram

Menurut Daellenbach dan McNickle (2005) *causal loop diagram* merupakan diagram yang menggambarkan hubungan sebab-akibat antara berbagai aspek, entitas, atau variabel. Jika entitas A memengaruhi entitas B, hal ini akan menyebabkan satu atau lebih atribut entitas B berubah, seperti nilai numerik atau statusnya. Pengaruh ini ditunjukkan dengan menghubungkan kedua entitas dengan anak panah yang mengarah dari A ke B. Selanjutnya, perubahan pada entitas B menjadi penyebab perubahan pada entitas C, dan seterusnya, menghasilkan rantai sebab dan akibat (*cause-effect chain*). Tanda positif (atau huruf 'd' pada arah yang sama) yang melekat pada kepala panah berarti bahwa peningkatan nilai pada entitas A menyebabkan peningkatan nilai pada entitas B. Sedangkan tanda negatif (atau huruf 'o' pada arah berkebalikan) menunjukkan bahwa peningkatan nilai pada entitas A akan menyebabkan penurunan nilai pada entitas B.

Panah dari suatu entitas yang berhubungan dengan beberapa entitas lain dalam rantai sebab dan akibat lalu kembali lagi pada entitas semula disebut dengan *feedback loop*. Jika jumlah tanda negatif yang melekat pada panah dalam

keseluruhan *loop* adalah bilangan ganjil, *loop* tersebut merupakan *feedback loop* negatif yang bersifat meredam (*dampening*) efek kumulatif dari penyebabnya. Sementara bila jumlah tanda panah negatif merupakan bilangan genap, maka *loop* tersebut adalah *feedback loop* positif yang bersifat mengacaukan (*destabilizing*) efek kumulatif (Daellenbach dan McNickle, 2005). Gambar 2.23 adalah contoh diagram *causal loop* yang menggambarkan sistem produksi dan persediaan.








Gambar 2.23 Diagram *Causal Loop* Sistem Produksi dan Persediaan (Daellenbach dan McNickle, 2005)

Beberapa panah tidak memiliki tanda, hal ini dikarenakan entitas yang bersangkutan merupakan input konstan, seperti *production lead time*, atau entitas yang bersangkutan membatasi entitas lain atau variabel. Diagram di atas berisi dua lingkaran umpan balik (*feedback loop*) sederhana dan satu *loop* kompleks (yang ditunjukkan oleh panah melingkar), dan semuanya merupakan *feedback loop* negatif (Daellenbach dan McNickle, 2005).

Influence diagram merupakan versi yang lebih formal dari diagram *causal loop*. Diagram ini sangat berguna saat pemodel menggunakan pendekatan proses. Diagram ini menggambarkan proses transformasi sistem secara visual (Daellenbach dan McNickle, 2005). Tabel 2.11 menunjukkan konvensi diagramatik yang digunakan dalam *influence diagram*. Notasi yang digunakan secara jelas mengidentifikasi sifat berbagai elemen seperti masukan kontrol, masukan tak terkendali, keluaran, dan komponen sistem. Komponen sistem diwakili oleh atributnya, karena atributlah yang dipengaruhi atau diubah oleh hubungan antar

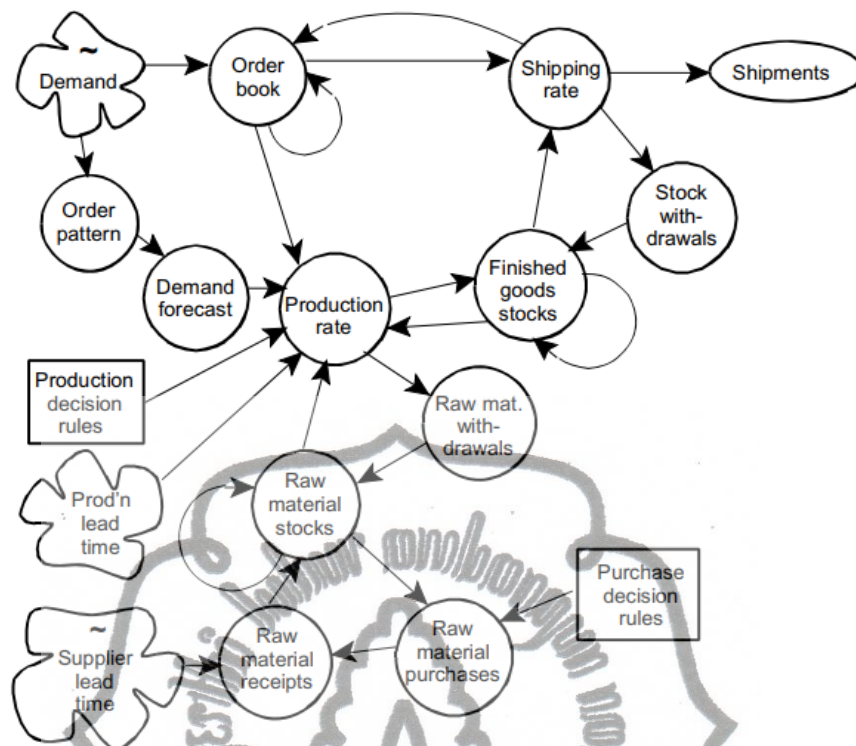
komponen. Setiap atribut ditampilkan secara terpisah dan disebut sebagai variabel sistem.

Tabel 2.11 Konversi Notasi Diagramatik pada *Influence Diagram*

No.	Notasi Diagramatik	Deskripsi
1		Notasi awan (<i>cloud</i>) merepresentasikan masukan tak terkendali (<i>uncontrollable input</i>), data, dan kendala atau batasan
2		Notasi persegi panjang (<i>rectangle</i>) merepresentasikan masukan kendali (<i>control input</i>) seperti keputusan, dan aturan keputusan
3		Notasi elips (<i>oval</i>) merepresentasikan keluaran (<i>output</i>)
4		Notasi lingkaran (<i>circle</i>) merepresentasikan variabel sistem yang terdiri dari atribut komponen dan nilai variabel
5		Notasi lingkaran (<i>circle</i>) merepresentasikan hubungan pengaruh (<i>influence relationship</i>) antara dua notasi

Untuk atribut yang dapat diukur secara numerik, variabel sistem adalah nilai dari variabel keadaan (*state variable*) terkait. Misalnya, dalam sistem produksi dan persediaan pada Gambar 2.24, *raw material withdrawal* merupakan variabel sistem dan jumlah atau tingkat bahan baku yang ditarik merupakan nilainya. Variabel ini mengurangi nilai variabel sistem lain yaitu *raw material stock* dengan jumlah yang sama.

Influence diagram dan diagram *causal loop* dapat membantu pemodel dalam mengeksplorasi kompleksitas dalam suatu sistem. Diagram pengaruh seringkali merupakan sarana yang sangat efektif untuk mendefinisikan sistem yang relevan untuk masalah yang diteliti, dengan begitu maka *influence diagram* dapat digunakan sebagai pengganti definisi sistem formal.



Gambar 2.24 *Influence Diagram* Sistem Produksi dan Persediaan (Daellenbach dan McNickle, 2005)

2.9.4 Verification, Validation, and Testing (VVT)

Menurut Daellenbach dan McNickle (2005) terdapat dua jenis validitas (*validity*) model, yaitu validitas internal (*internal validity*) yang diketahui melalui proses verifikasi (*verification*) dan validitas eksternal (*external validity*) yang diketahui melalui proses validasi (*validation*).

Verifikasi dilakukan untuk memeriksa bahwa model benar secara logis dan matematis dan bahwa data yang digunakan sudah benar. Dilakukan pemeriksaan dengan cermat bahwa semua ekspresi matematika mewakili hubungan yang diasumsikan dengan benar dan bahwa ekspresi matematika telah diimplementasikan dengan benar dalam program komputer. Verifikasi dicapai dengan mencetak hasil intermediet dengan terperinci pada setiap langkah eksekusi. Jika dapat dilakukan secara komputasi (*computationally feasible*), model harus diverifikasi dengan memeriksa hasil secara numerik dengan kalkulator tangan untuk berbagai *input* yang cukup luas. Verifikasi juga dilakukan dengan memastikan bahwa setiap ekspresi sudah memiliki dimensi yang konsisten. Misalnya, jika sisi kanan persamaan memiliki satuan x , maka pada sisi kiri

persamaan harus tereduksi dalam satuan x . Kebenaran semua konstanta numerik juga harus diverifikasi. Analis melakukan banyak pengecekan validitas internal saat mengembangkan model. Dengan demikian, membangun validitas internal tidak dapat dipisahkan dari pembangunan model yang sebenarnya (Daellenbach dan McNickle, 2005).

Validitas eksternal menjawab pertanyaan seperti apakah model tersebut sudah mencukupi untuk mewakili sistem nyata, apakah model memberikan informasi dan jawaban yang bermanfaat, dan apakah model dalam bentuk yang sesuai untuk melakukan pengambilan keputusan. Validitas eksternal jauh lebih sulit dibangun daripada validitas internal. Mengetahui apakah aproksimasi cukup dekat atau tidak merupakan masalah penilaian. Jawabannya harus bergantung pada tujuan pembuatan model dan tujuan penggunaan solusinya. Perkiraan kasar mungkin cukup baik untuk model perencanaan eksplorasi, sementara model yang dimaksudkan untuk keputusan operasional yang terperinci mungkin perlu representasi realitas yang cukup akurat (Daellenbach dan McNickle, 2005).

Semua pemangku kepentingan harus menyadari bahwa tidak mungkin untuk membuktikan bahwa model itu valid secara eksternal, melainkan hanya mungkin untuk menunjukkan bahwa model itu salah. Oleh karena itu validasi eksternal adalah pertanyaan untuk membangun kredibilitas model. Jika model ini kredibel, pengguna akan memiliki keyakinan di dalamnya. Validitas eksternal sering dapat diasumsikan jika model meniru kenyataan secara akurat. Oleh karena itu, analis perlu memastikan tanggapan model terhadap perubahan input, apakah sudah seperti yang diharapkan dan jika tidak, mengapa mereka berbeda. Sistem yang kompleks sering menunjukkan perilaku yang berlawanan dengan intuisi. Validitas model dipertanyakan kecuali perilaku tersebut dapat dijelaskan secara meyakinkan (Daellenbach dan McNickle, 2005).

Pengujian (*testing*) dilakukan untuk melihat bagaimana model dan solusinya bekerja. Apa peningkatan dalam manfaat atau biaya yang ditawarkannya dibandingkan dengan mode operasi saat ini. Jika proyek berurusan dengan usulan sistem masa depan, berapa kisaran potensi manfaat yang dapat diharapkan. Jawaban atas pertanyaan-pertanyaan ini akan menentukan apakah proyek tersebut

ditinggalkan, diorientasikan, atau diizinkan untuk melanjutkan kegiatan saat ini (Daellenbach dan McNickle, 2005).

2.10 PETA RISET

Bagian ini memberikan gambaran posisi penelitian dibandingkan dengan penelitian terdahulu. Model acuan pertama yang digunakan yaitu model dari Hacer G. Goren (2018). Model ini merupakan model pemilihan pemasok dan alokasi pesanan yang berfokus pada keberlanjutan (*sustainability*). Kerangka kerja yang diusulkan terdiri dari tiga komponen terintegrasi. Pertama, *fuzzy Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory* (DEMATEL) digunakan untuk menghitung bobot kriteria berkelanjutan yang dipertimbangkan dalam proses pengambilan keputusan. Kedua, bobot ini digunakan sebagai input dalam Fungsi *Taguchi Loss* untuk menentukan peringkat dan menghitung nilai peringkat masing-masing pemasok. Nilai-nilai ini kemudian digunakan untuk menentukan jumlah pesanan optimal yang harus dialokasikan untuk setiap pemasok menggunakan optimasi program linear bilangan bulat campuran (*mixed integer linear programming*) bi-objektif deterministik.

Model acuan kedua yang digunakan merupakan model dari Hosseini, dkk. (2019). Model ini merupakan model pemilihan pemasok dan alokasi pesanan yang berfokus pada ketahanan terhadap resiko disrupsi. Model yang diusulkan merupakan model berbasis program linear bilangan bulat campuran (*mixed integer linear programming*) bi-objektif stokastik untuk mendukung pengambilan keputusan tentang bagaimana dan kapan harus menggunakan strategi proaktif dan reaktif dalam pemilihan pemasok dan alokasi pesanan. Model ini secara simultan mempertimbangkan keputusan mitigasi proaktif sebelum terjadi disrupsi dan rencana restorasi reaktif setelah terjadi disrupsi. Selain itu, model ini juga mempertimbangkan kapasitas pemasok tambahan, keandalan (*reliability*) pemasok, pemasok cadangan (koneksi sekunder antara pemasok dan pelanggan), dan segregasi geografis antara pemasok sebagai fitur peningkatan ketahanan (*resilience*) rantai pasok.

Model acuan ketiga yang digunakan merupakan model dari Hsu, dkk. (2012). Model ini merupakan model pemilihan *vendor* untuk melakukan daur ulang bahan.

Dalam model ini digunakan pendekatan MCDM hibrida berdasarkan metode *Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory* (DEMATEL), *DEMATEL-based Analytic Network Process* (DANP), dan *VIKOR* (*Visekriter-ijumska Optimizacija i Kompromisno Resenje* atau *multicriteria optimization and compromise solution*). Model ini dirancang untuk menyelesaikan permasalahan pemilihan *vendor* yang berfokus pada masalah kualitas, pengiriman, resiko, pelayanan, dan lingkungan. DEMATEL digunakan untuk mengetahui struktur pengaruh antar kriteria. DANP digunakan untuk memberikan bobot pada setiap kriteria. VIKOR digunakan untuk menilai atau memperbaiki tingkat performansi yang diinginkan dari *vendor*.

Berikut merupakan tabel perbandingan antara model-model pemilihan pemasok dan alokasi pesanan yang telah dijelaskan di atas dengan model pemilihan pemasok dan alokasi pesanan yang dikembangkan pada penelitian ini:

Tabel 2.12 Perbandingan Riset

Indikator	Goren (2018)	Hosseini, dkk. (2019)	Hsu, dkk. (2012)	Model Usulan
Sistem Rantai Pasok	<i>Sustainable</i>	<i>Resilient</i>	-	<i>Sustainable, Resilient</i>
Kerangka pembobotan pemasok	<i>Fuzzy DEMATEL, Taguchi Loss Function</i>	-	DEMATEL, DANP, VIKOR	<i>Fuzzy DEMATEL, DANP, Taguchi Loss Function</i>
Pertimbangan Kriteria Kualitatif	Ya	Tidak	Ya	Ya
Aspek Ekonomi	Ya	Tidak	Ya	Ya
Aspek Lingkungan	Ya	Tidak	Ya	Ya
Aspek Sosial	Ya	Tidak	Tidak	Ya
Jenis <i>Input</i> MADM	<i>Fuzzy</i>	-	<i>Crisp</i>	<i>Fuzzy</i>
Jenis <i>Input</i> MILP	Deterministik	Stokastik	-	Stokastik
Multi-produk	Ya	Tidak	-	Ya
Fungsi Tujuan Minimasi Total Biaya	Ya	Ya	-	Ya
Fungsi Tujuan Maksimasi <i>Total Value Purchasing</i>	Ya	Tidak	-	Ya

Fungsi Tujuan Maksimasi Segregasi Geografis	Tidak	Ya	-	Ya
Bentuk Alokasi Pemesanan	<i>Integer</i>	Proporsi dari Permintaan	-	<i>Integer</i>
Tingkatan Persediaan Perusahaan	Ya	Tidak	-	Ya
Kapasitas Persediaan Maksimum	Tidak	Tidak	-	Ya
Batasan Minimum dan Maksimum Penetapan Pemasok	Tidak	Tidak	-	Ya
Kendala Probabilitas Disrupsi	Tidak	Ya	-	Ya
Kendala Evolusi Disrupsi	Tidak	Ya	-	Ya
Kendala Penalti Ketahanan	Tidak	Ya	-	Ya
Kendala Kapasitas Produksi	Berdasar waktu	Berdasar unit produk	-	Berdasar waktu
Batasan Waktu Tunggu	Tidak	Tidak	-	Ya