

BAB II

KAJIAN LITERATUR

2.1 Badan Layanan Umum (BLU)

2.1.1 Definisi BLU Berdasarkan Peraturan Pemerintah

Badan Layanan Umum (BLU) adalah instansi di lingkungan pemerintah yang dibentuk untuk memberikan pelayanan kepada masyarakat berupa penyediaan barang dan/atau jasa yang dijual tanpa mengutamakan mencari keuntungan, serta dalam melakukan kegiatannya didasarkan pada prinsip efisiensi dan produktivitas [1].

Definisi ini secara tegas diatur dalam Peraturan Pemerintah Nomor 23 Tahun 2005 tentang Pengelolaan Keuangan Badan Layanan Umum, yang kemudian diperbaharui dengan Peraturan Pemerintah Nomor 74 Tahun 2012. Dalam regulasi tersebut, BLU diposisikan sebagai penerapan sistem manajerial dan pola pengelolaan keuangan yang fleksibel dalam rangka meningkatkan pelayanan kepada masyarakat sekaligus menjaga kesehatan keuangan publik [2].

Karakter utama dari status BLU adalah adanya fleksibilitas dalam pengelolaan keuangan, termasuk dalam hal pengelolaan pendapatan, belanja, dan aset, yang tidak sepenuhnya mengikuti pola pengelolaan anggaran pendapatan dan belanja negara (APBN) pada umumnya [3].

Dalam konteks rumah sakit, status BLU memberikan ruang gerak yang lebih luas dalam menentukan tarif layanan, mengelola sumber daya manusia, serta mengatur penggunaan aset untuk mendukung operasional secara lebih mandiri dan responsif terhadap kebutuhan masyarakat [4].

2.1.2 Karakteristik Utama BLU

Sebagai sebuah bentuk organisasi sektor publik yang menerapkan pola pengelolaan keuangan fleksibel, BLU memiliki tiga karakteristik utama yang saling berkaitan, yaitu fleksibilitas, akuntabilitas, dan transparansi.

1. Fleksibilitas

Fleksibilitas dalam pengelolaan BLU mencakup beberapa aspek, antara lain fleksibilitas dalam pengelolaan pendapatan, belanja, dan pengelolaan aset. Dalam hal pendapatan, BLU diperbolehkan untuk menggunakan secara langsung pendapatan yang diperoleh untuk membiayai operasionalnya tanpa harus disetorkan terlebih

dahulu ke kas negara. Fleksibilitas belanja memungkinkan BLU untuk mengalokasikan anggaran secara lebih adaptif sesuai dengan kebutuhan operasional, termasuk dalam hal pengadaan barang dan jasa, serta pengelolaan sumber daya manusia. Sementara itu, fleksibilitas pengelolaan aset memberikan kewenangan kepada BLU untuk mengelola, memanfaatkan, serta menghapus aset sesuai dengan ketentuan yang berlaku, selama tidak mengubah status kepemilikan aset sebagai kekayaan negara [20].

2. Akuntabilitas

Akuntabilitas merupakan prinsip yang menuntut BLU untuk mempertanggungjawabkan kinerja dan pengelolaan keuangannya kepada pemangku kepentingan, baik kepada pemerintah sebagai pemilik amanah maupun kepada masyarakat sebagai pengguna layanan. Akuntabilitas BLU diwujudkan melalui penyusunan rencana strategis bisnis, laporan keuangan yang diaudit, serta evaluasi kinerja secara periodik [21].

3. Transparansi

Transparansi dalam pengelolaan BLU mensyaratkan adanya keterbukaan informasi mengenai kebijakan, proses pengelolaan keuangan, dan pencapaian kinerja kepada publik. Dalam praktiknya, transparansi diwujudkan melalui publikasi laporan keuangan, rencana strategis, serta informasi layanan secara terbuka [22].

Ketiga karakteristik ini bersifat sinergis: fleksibilitas memberikan ruang untuk berinovasi, akuntabilitas memastikan bahwa fleksibilitas digunakan secara bertanggung jawab, dan transparansi menjadi jembatan antara institusi dengan publik.

2.1.3 Implikasi Status BLU

Penerapan status BLU di rumah sakit membawa implikasi signifikan terhadap pengelolaan keuangan dan aset. Dalam konteks manajemen keuangan, rumah sakit dengan status BLU memiliki kewenangan untuk menetapkan tarif layanan serta diperbolehkan untuk membentuk dana cadangan [22].

Dalam hal pengelolaan aset, status BLU memberikan implikasi pada tiga aspek utama:

1. Otonomi dalam pemanfaatan aset

BLU memiliki kewenangan yang lebih besar dalam memanfaatkan aset untuk mendukung operasional rumah sakit, termasuk dalam hal kerja sama pemanfaatan aset dengan pihak ketiga [23].

2. Kewajiban pencatatan dan pelaporan yang akurat

Meskipun diberikan fleksibilitas, BLU diwajibkan untuk menyelenggarakan akuntansi dan pelaporan keuangan yang sesuai dengan standar yang berlaku [24].

3. Keterkaitan antara kinerja operasional dan pengelolaan aset

Dalam kerangka BLU yang berbasis kinerja, pengelolaan aset tidak dapat dipisahkan dari pencapaian target layanan [25].

Implikasi-implikasi tersebut menuntut rumah sakit untuk mengembangkan sistem manajemen aset yang tidak hanya administratif, tetapi juga strategis dan berbasis risiko.

2.1.4 Tantangan Pengelolaan Aset di Era BLU

Meskipun status BLU memberikan fleksibilitas yang signifikan, pengelolaan aset di era BLU juga menghadapi sejumlah tantangan yang kompleks. Tantangan-tantangan tersebut antara lain [5]:

1. Transisi dari pola pengelolaan aset tradisional menuju pola berbasis kinerja

Rumah sakit yang baru bertransformasi menjadi BLU sering kali menghadapi tantangan dalam mengubah paradigma pengelolaan aset dari yang sebelumnya bersifat administratif dan berorientasi kepatuhan menjadi pengelolaan yang strategis dan berorientasi hasil.

2. Keterbatasan data aset yang akurat dan mutakhir

Salah satu tantangan fundamental dalam pengelolaan aset adalah ketersediaan data yang akurat, lengkap, dan mutakhir.

3. Kompleksitas karakteristik aset alat kesehatan

Alat kesehatan memiliki karakteristik yang sangat beragam, baik dari segi jenis, nilai, tingkat kekritisian, frekuensi penggunaan, maupun kompleksitas teknis.

4. Keterbatasan sumber daya dan optimalisasi anggaran

Dalam konteks BLU, rumah sakit dituntut untuk mengelola sumber daya secara efisien dan menghasilkan kinerja yang optimal.

5. Tuntutan akuntabilitas dan transparansi yang tinggi

Sebagai institusi publik yang dikelola dengan pola BLU, rumah sakit dituntut untuk mempertanggungjawabkan pengelolaan aset secara transparan kepada publik.

Menghadapi tantangan-tantangan tersebut, diperlukan pendekatan manajemen risiko aset yang terstruktur dan berbasis data. Pendekatan ini memungkinkan rumah sakit untuk mengidentifikasi aset-aset dengan tingkat risiko tertinggi, menyusun prioritas penanganan secara objektif, serta mengalokasikan sumber daya secara lebih efisien dan akuntabel [26].

2.2 Manajemen Aset

2.2.1 Definisi Aset dan Klasifikasi Aset

Aset didefinisikan sebagai sumber daya yang dikuasai dan/atau dimiliki oleh suatu organisasi sebagai akibat dari peristiwa masa lalu, yang darinya manfaat ekonomi dan/atau sosial di masa depan diharapkan dapat diperoleh. Dalam konteks organisasi sektor publik, aset tidak hanya dipandang dari nilai ekonominya, tetapi juga dari nilai pelayanan yang dapat dihasilkannya bagi masyarakat [27].

Klasifikasi aset dalam institusi pelayanan kesehatan pada umumnya dibedakan menjadi dua kategori utama, yaitu aset berwujud (*tangible assets*) dan aset tidak berwujud (*intangible assets*). Aset berwujud mencakup tanah, bangunan, infrastruktur, kendaraan, peralatan medis, dan peralatan penunjang. Sementara itu, aset tidak berwujud meliputi hak paten, lisensi, perangkat lunak, dan reputasi institusi [27].

Dalam konteks rumah sakit, alat kesehatan termasuk dalam kategori aset berwujud yang memiliki karakteristik spesifik. Alat kesehatan diklasifikasikan lebih lanjut berdasarkan tingkat kekritisannya terhadap pelayanan medis, kompleksitas teknis, nilai investasi, serta risiko yang ditimbulkan apabila terjadi kegagalan fungsi. Klasifikasi ini penting untuk menentukan pendekatan pengelolaan yang tepat, mengingat tidak semua aset memerlukan tingkat perhatian yang sama dalam hal pemeliharaan dan pengelolaan risiko [6].

2.2.2 Siklus Manajemen Aset

Manajemen aset merupakan serangkaian proses yang saling terkait dalam mengelola aset sepanjang siklus hidupnya (*life cycle management*). Siklus manajemen aset secara umum terdiri dari lima tahapan utama, yaitu perencanaan, pengadaan, pengoperasian, pemeliharaan, dan penghapusan [28].

1. Perencanaan

Tahap perencanaan merupakan fase awal yang menentukan arah pengelolaan aset secara keseluruhan. Pada tahap ini dilakukan identifikasi kebutuhan aset, analisis kelayakan, perencanaan anggaran, serta penetapan prioritas pengadaan berdasarkan kebutuhan operasional dan ketersediaan sumber daya. Dalam konteks rumah sakit, perencanaan aset harus selaras dengan rencana strategis institusi serta mempertimbangkan perkembangan teknologi medis.

2. Pengadaan

Tahap pengadaan mencakup proses pemilihan, pembelian, atau perolehan aset sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan. Proses ini meliputi penyusunan spesifikasi teknis, seleksi penyedia, negosiasi kontrak, serta penerimaan dan pengujian aset sebelum dioperasikan. Kualitas pengadaan sangat menentukan kinerja aset di tahap-tahap berikutnya.

3. Pengoperasian

Tahap pengoperasian merupakan fase di mana aset digunakan sesuai dengan fungsinya untuk mendukung pelayanan. Pada tahap ini, pengelolaan aset mencakup pengaturan penggunaan, pencatatan pemakaian, serta monitoring kinerja aset secara berkelanjutan. Efektivitas pengoperasian aset sangat dipengaruhi oleh ketersediaan sumber daya manusia yang kompeten serta prosedur operasional yang memadai.

4. Pemeliharaan

Pemeliharaan merupakan aktivitas yang dilakukan untuk mempertahankan fungsi aset agar tetap dapat beroperasi sesuai dengan spesifikasinya. Pemeliharaan dapat dibedakan menjadi pemeliharaan preventif (*preventive maintenance*) yang dilakukan secara terjadwal untuk mencegah kerusakan, serta pemeliharaan korektif (*corrective maintenance*) yang dilakukan setelah terjadi kerusakan untuk mengembalikan fungsi aset. Dalam konteks alat kesehatan, pemeliharaan juga mencakup kegiatan kalibrasi untuk memastikan keakuratan pengukuran.

5. Penghapusan

Tahap penghapusan merupakan akhir dari siklus hidup aset, di mana aset yang sudah tidak layak operasi atau tidak ekonomis lagi untuk dipertahankan dikeluarkan dari daftar inventaris. Penghapusan dapat dilakukan melalui penjualan, hibah, pemusnahan, atau penggantian dengan aset baru. Keputusan penghapusan harus didasarkan pada analisis yang mempertimbangkan kondisi teknis, biaya pemeliharaan, serta ketersediaan suku cadang.

2.2.3 Prinsip-Prinsip Manajemen Aset yang Efektif dan Efisien

Manajemen aset yang efektif dan efisien didasarkan pada sejumlah prinsip yang menjadi pedoman dalam pengelolaan aset sepanjang siklus hidupnya. Prinsip-prinsip tersebut antara lain:

1. Keselarasan dengan tujuan organisasi

Pengelolaan aset harus selaras dengan tujuan strategis organisasi. Aset dikelola tidak sekadar untuk mempertahankan keberadaannya, tetapi untuk mendukung pencapaian kinerja organisasi secara keseluruhan [29].

2. Pendekatan berbasis siklus hidup (*life cycle approach*)

Manajemen aset tidak hanya berfokus pada tahap pengadaan, tetapi mempertimbangkan seluruh siklus hidup aset mulai dari perencanaan hingga penghapusan. Pendekatan ini memungkinkan organisasi untuk mengoptimalkan total biaya kepemilikan (*total cost of ownership*) dan memaksimalkan nilai yang dihasilkan aset [30].

3. Berbasis risiko (*risk-based*)

Pengelolaan aset perlu mempertimbangkan tingkat risiko yang terkait dengan kegagalan aset, baik dari segi probabilitas kejadian maupun dampak yang ditimbulkan terhadap pelayanan. Aset dengan risiko tinggi memerlukan perhatian dan sumber daya yang lebih besar dibandingkan aset dengan risiko rendah [31].

4. Berbasis data dan informasi

Keputusan dalam pengelolaan aset harus didasarkan pada data dan informasi yang akurat, lengkap, dan mutakhir. Data yang dikelola dengan baik memungkinkan organisasi untuk melakukan analisis, prediksi, dan pengambilan keputusan yang lebih tepat [32].

5. Berkelanjutan (*sustainable*)

Manajemen aset perlu mempertimbangkan aspek keberlanjutan, baik dari segi ekonomi, sosial, maupun lingkungan. Hal ini mencakup perencanaan penggantian aset yang tepat waktu serta pengelolaan aset yang memperhatikan dampak lingkungan [33].

2.2.4 Manajemen Aset di Sektor Publik Vs Swasta

Manajemen aset di sektor publik memiliki karakteristik yang berbeda dengan sektor swasta, meskipun prinsip-prinsip dasar pengelolaannya memiliki banyak kesamaan. Perbedaan-perbedaan tersebut antara lain:

1. Tujuan pengelolaan

Di sektor swasta, pengelolaan aset terutama ditujukan untuk memaksimalkan keuntungan dan nilai bagi pemegang saham. Sementara itu, di sektor publik,

pengelolaan aset lebih ditekankan pada optimalisasi pelayanan kepada masyarakat dan pemanfaatan aset untuk kepentingan publik [34].

2. Sumber pendanaan

Sektor swasta memperoleh pendanaan dari modal pemilik, pinjaman, atau hasil operasional. Sebaliknya, sektor publik, termasuk rumah sakit dengan status BLU, memperoleh pendanaan dari Anggaran Pendapatan dan Belanja Negara (APBN) serta pendapatan operasional yang diperoleh dari layanan kepada masyarakat [35].

3. Akuntabilitas dan transparansi

Sektor publik dituntut untuk memiliki tingkat akuntabilitas dan transparansi yang lebih tinggi dibandingkan sektor swasta, mengingat sumber daya yang dikelola berasal dari masyarakat. Hal ini tercermin dalam kewajiban pelaporan keuangan yang diaudit serta publikasi informasi kinerja secara terbuka [36].

4. Fleksibilitas pengelolaan

Sektor swasta umumnya memiliki fleksibilitas yang lebih besar dalam mengelola aset, termasuk dalam hal penghapusan, penggantian, dan alih fungsi aset. Sektor publik, meskipun dengan status BLU diberikan fleksibilitas, tetap terikat pada regulasi dan ketentuan yang berlaku [37].

2.2.5 Tantangan Manajemen Aset di Rumah Sakit

Rumah sakit sebagai institusi pelayanan kesehatan menghadapi sejumlah tantangan spesifik dalam pengelolaan aset, terutama aset alat kesehatan. Tantangan-tantangan tersebut antara lain [38]:

1. Keberagaman jenis dan spesifikasi alat kesehatan

Rumah sakit mengelola ratusan hingga ribuan unit alat kesehatan dengan jenis, spesifikasi, dan karakteristik yang sangat beragam. Keberagaman ini menimbulkan kompleksitas dalam menetapkan standar pemeliharaan, jadwal kalibrasi, serta prioritas penanganan.

2. Perkembangan teknologi yang cepat

Teknologi medis berkembang sangat pesat, sehingga aset alat kesehatan cepat mengalami keusangan (obsolescence). Tantangan ini menuntut rumah sakit untuk memiliki perencanaan penggantian yang matang agar tidak tertinggal dari perkembangan teknologi sekaligus tidak membebani anggaran secara berlebihan.

3. Tingkat kekritisitas yang tinggi terhadap pelayanan

Sebagian besar alat kesehatan bersifat kritis terhadap kelancaran pelayanan medis. Kegagalan fungsi alat kesehatan dapat berdampak langsung terhadap keselamatan pasien dan mengganggu operasional rumah sakit secara keseluruhan.

4. Keterbatasan sumber daya pemeliharaan

Rumah sakit sering kali menghadapi keterbatasan sumber daya, baik dari segi anggaran, tenaga teknis, maupun ketersediaan suku cadang. [Keterbatasan ini menuntut adanya mekanisme prioritas yang tepat agar sumber daya yang tersedia dapat dialokasikan pada aset-aset yang paling membutuhkan.

5. Kepatuhan terhadap regulasi dan standar

Alat kesehatan wajib memenuhi berbagai regulasi dan standar, baik dalam hal keamanan, kinerja, maupun kalibrasi. Ketidakpatuhan terhadap regulasi dapat berimplikasi pada aspek hukum dan keselamatan pasien.

6. Ketersediaan data yang akurat untuk pengambilan keputusan

Pengambilan keputusan yang tepat dalam pengelolaan aset memerlukan data yang akurat mengenai kondisi fisik, riwayat pemeliharaan, frekuensi kerusakan, dan biaya operasional aset. Namun, dalam praktiknya, ketersediaan data yang terstruktur dan mudah diakses masih menjadi tantangan di banyak rumah sakit.

Menghadapi tantangan-tantangan tersebut, rumah sakit perlu mengembangkan pendekatan manajemen aset yang sistematis dan berbasis risiko. Pendekatan ini memungkinkan rumah sakit untuk mengidentifikasi aset-aset prioritas, mengoptimalkan alokasi sumber daya, serta meningkatkan akuntabilitas pengelolaan aset secara keseluruhan [39].

Berdasarkan uraian di atas, manajemen aset di rumah sakit memerlukan pendekatan yang sistematis dan berbasis risiko. Prinsip-prinsip seperti keselarasan dengan tujuan organisasi, pendekatan siklus hidup, dan berbasis data menjadi landasan penting dalam penelitian ini. Data inventaris alat kesehatan di Rumah Sakit Bhayangkara TK.II Medan yang memiliki 3.390 unit memerlukan pendekatan manajemen aset yang tidak hanya administratif tetapi juga strategis. Oleh karena itu, penelitian ini mengadopsi pendekatan risk-based asset management yang akan diimplementasikan melalui integrasi Spectral Clustering dan PROMETHEE.

2.3 Manajemen Risiko Aset

2.3.1 Definisi Risiko dalam Konteks Manajemen Aset

Risiko dalam konteks manajemen aset didefinisikan sebagai efek ketidakpastian terhadap pencapaian tujuan organisasi yang berkaitan dengan aset. Secara lebih spesifik, risiko aset merupakan kemungkinan terjadinya peristiwa yang mengakibatkan penurunan fungsi, kegagalan operasional, atau hilangnya nilai aset, sehingga berdampak terhadap kinerja organisasi secara keseluruhan [40].

Dalam perspektif manajemen aset, risiko tidak selalu dipandang sebagai ancaman semata, tetapi sebagai faktor yang perlu dikelola secara sistematis untuk mencapai keseimbangan antara biaya, kinerja, dan risiko. Pendekatan ini menekankan bahwa pengelolaan aset yang optimal bukan berarti menghilangkan semua risiko, tetapi mengelola risiko pada tingkat yang dapat diterima (*acceptable level*) sesuai dengan kapasitas dan prioritas organisasi [41].

Khusus untuk aset alat kesehatan di rumah sakit, risiko didefinisikan sebagai fungsi dari kemungkinan terjadinya gangguan fungsi alat serta besarnya dampak yang ditimbulkan terhadap keselamatan pasien, kelancaran pelayanan medis, dan aspek operasional rumah sakit. Definisi ini menjadi landasan penting dalam pengembangan model manajemen risiko aset yang terstruktur dan berbasis data [42].

2.3.2 Komponen Risiko

Risiko secara fundamental terdiri dari dua komponen utama yang saling terkait, yaitu probabilitas (*likelihood*) dan dampak (*consequence*).

1. Probabilitas (*Likelihood*)

Probabilitas mengacu pada kemungkinan terjadinya suatu peristiwa risiko dalam periode waktu tertentu. Dalam konteks manajemen aset alat kesehatan, probabilitas dapat diukur berdasarkan frekuensi kerusakan, usia alat, kondisi fisik, serta riwayat pemeliharaan. Semakin tinggi frekuensi kerusakan suatu alat, semakin besar probabilitas terjadinya kegagalan fungsi di masa mendatang [43].

Penilaian probabilitas dalam praktiknya dapat dilakukan secara kualitatif melalui skala (misalnya: sangat jarang, jarang, mungkin, sering, sangat sering) maupun secara kuantitatif berdasarkan data historis. Penggunaan data historis memungkinkan perhitungan probabilitas yang lebih objektif dan akurat [44].

2. Dampak (*Consequence*)

Dampak mengacu pada konsekuensi yang ditimbulkan apabila peristiwa risiko benar-benar terjadi. Dalam konteks alat kesehatan, dampak dapat diukur dari berbagai aspek, antara lain dampak terhadap keselamatan pasien, dampak terhadap kelancaran pelayanan medis, dampak terhadap biaya perbaikan atau penggantian, serta dampak terhadap reputasi institusi [45].

Penilaian dampak juga dapat dilakukan secara kualitatif (misalnya: ringan, sedang, berat, sangat berat) maupun kuantitatif berdasarkan nilai kerugian yang ditimbulkan. Dalam konteks rumah sakit, dampak terhadap keselamatan pasien sering kali menjadi pertimbangan utama karena berkaitan langsung dengan aspek etis dan hukum [7].

Kombinasi antara probabilitas dan dampak membentuk tingkat risiko (*level of risk*) yang menjadi dasar dalam menentukan prioritas penanganan aset. Rumus dasar tingkat risiko adalah [46]:

$$\text{Risiko} = \text{Probabilitas} \times \text{Dampak} \dots\dots\dots(2.1)$$

2.3.3 Proses Manajemen Risiko

Manajemen risiko merupakan proses sistematis yang terdiri dari beberapa tahapan berkelanjutan. Proses ini mengacu pada kerangka yang dikembangkan dalam standar manajemen risiko internasional [47]. Dalam konteks manajemen aset alat kesehatan, proses manajemen risiko mencakup lima tahapan utama:

1. Identifikasi Risiko

Tahap identifikasi bertujuan untuk mengenali dan mendokumentasikan sumber-sumber risiko yang berpotensi mempengaruhi kinerja aset. Pada tahap ini, dilakukan pengumpulan data mengenai karakteristik aset, kondisi fisik, riwayat kerusakan, serta faktor-faktor eksternal yang dapat mempengaruhi kinerja aset [48]. Identifikasi risiko yang komprehensif menjadi fondasi bagi tahapan selanjutnya.

2. Analisis Risiko

Tahap analisis bertujuan untuk memahami karakteristik risiko secara lebih mendalam, termasuk menentukan probabilitas dan dampak dari setiap risiko yang telah diidentifikasi. Analisis risiko dapat dilakukan secara kualitatif menggunakan matriks risiko, atau secara kuantitatif menggunakan metode statistik dan pemodelan. Dalam konteks alat kesehatan, analisis risiko perlu mempertimbangkan data historis kerusakan, biaya pemeliharaan, serta tingkat kekritisan alat terhadap pelayanan [49].

3. Evaluasi Risiko

Tahap evaluasi bertujuan untuk membandingkan tingkat risiko yang telah dianalisis dengan kriteria risiko yang telah ditetapkan oleh organisasi. Pada tahap ini, risiko-risiko dikelompokkan berdasarkan tingkat keparahannya, misalnya risiko rendah, sedang, atau tinggi. Evaluasi risiko menjadi dasar untuk menentukan risiko mana yang memerlukan penanganan prioritas dan risiko mana yang dapat diterima tanpa tindakan khusus [50].

4. Mitigasi Risiko

Tahap mitigasi bertujuan untuk merancang dan menerapkan tindakan pengendalian terhadap risiko-risiko yang telah dievaluasi. Tindakan mitigasi dapat berupa pemeliharaan preventif, penyediaan suku cadang, penggantian alat, atau pengalihan fungsi. Pemilihan tindakan mitigasi perlu mempertimbangkan efektivitas, biaya, dan dampaknya terhadap operasional secara keseluruhan [51].

5. Monitoring dan Review

Tahap monitoring bertujuan untuk memastikan bahwa tindakan mitigasi yang diterapkan berjalan efektif dan risiko tetap berada pada tingkat yang dapat diterima. Proses ini bersifat berkelanjutan dan mencakup pemantauan kinerja aset, evaluasi efektivitas tindakan, serta penyesuaian strategi jika diperlukan [52].

2.3.4 *Risk-Based Asset Management*

Risk-based asset management (RBAM) merupakan pendekatan pengelolaan aset yang menempatkan risiko sebagai pertimbangan utama dalam setiap keputusan pengelolaan aset. Pendekatan ini mengakui bahwa sumber daya yang tersedia untuk pengelolaan aset selalu terbatas, sehingga perlu dialokasikan secara proporsional berdasarkan tingkat risiko aset [53].

Konsep RBAM didasarkan pada beberapa prinsip utama:

1. Prioritas berdasarkan risiko

Aset dengan tingkat risiko lebih tinggi mendapat prioritas lebih besar dalam hal alokasi sumber daya, intensitas pemeliharaan, dan frekuensi monitoring. Sebaliknya, aset dengan risiko rendah dapat dikelola dengan pendekatan yang lebih sederhana dan efisien [54].

2. Keseimbangan antara biaya, kinerja, dan risiko

RBAM bertujuan untuk mencapai keseimbangan optimal antara biaya pengelolaan aset, kinerja yang dihasilkan, dan tingkat risiko yang ditanggung. Pengelolaan aset

tidak selalu bertujuan untuk meminimalkan biaya atau meminimalkan risiko secara ekstrem, tetapi mencari titik keseimbangan yang paling sesuai dengan tujuan organisasi [55].

3. Pendekatan sistematis dan terdokumentasi

Implementasi RBAM memerlukan proses yang sistematis, terdokumentasi, dan dapat diulang (reproducible). Hal ini mencakup penggunaan data yang akurat, metodologi yang jelas, serta dokumentasi keputusan yang transparan [56].

Dalam implementasinya di rumah sakit, RBAM untuk alat kesehatan memerlukan beberapa langkah strategis [57]:

1. Pengembangan basis data aset: Mengumpulkan dan mengintegrasikan data seluruh alat kesehatan, termasuk karakteristik teknis, kondisi fisik, riwayat kerusakan, dan biaya pemeliharaan.
2. Penetapan kriteria dan bobot risiko: Menentukan kriteria yang relevan untuk menilai risiko alat kesehatan serta bobot kepentingan masing-masing kriteria berdasarkan perspektif pemangku kepentingan.
3. Penilaian dan pemetaan risiko: Melakukan penilaian risiko untuk setiap alat kesehatan dan memetakannya ke dalam matriks risiko atau kluster-kluster berdasarkan tingkat risikonya.
4. Penetapan strategi penanganan: Menentukan strategi penanganan yang tepat untuk setiap kelompok risiko, mulai dari pemeliharaan rutin, peningkatan intensitas monitoring, hingga penggantian alat.
5. Monitoring dan evaluasi berkelanjutan: Melakukan pemantauan secara berkala terhadap kinerja aset dan efektivitas strategi penanganan yang diterapkan.

2.3.5 Matriks Risiko dan *Risk Ranking*

Matriks risiko merupakan alat visual yang digunakan untuk memetakan risiko berdasarkan dua dimensi utama, yaitu probabilitas dan dampak. Matriks ini memungkinkan organisasi untuk mengklasifikasikan risiko ke dalam berbagai tingkat keparahan, sehingga memudahkan proses penetapan prioritas penanganan [58].

Secara umum, matriks risiko disusun dalam bentuk tabel dengan sumbu horizontal mewakili probabilitas (misalnya: jarang, mungkin, sering, sangat sering) dan sumbu vertikal mewakili dampak (misalnya: ringan, sedang, berat, sangat berat). Setiap sel dalam matriks mewakili kombinasi probabilitas dan dampak tertentu, yang kemudian diberi kode warna

(hijau untuk risiko rendah, kuning untuk risiko sedang, merah untuk risiko tinggi) untuk memudahkan interpretasi [59].

Risk ranking atau perangkingan risiko merupakan proses pengurutan risiko berdasarkan tingkat keparahannya, baik secara keseluruhan maupun per kategori. Proses ini memungkinkan organisasi untuk mengidentifikasi risiko-risiko yang paling membutuhkan perhatian segera [60].

Dalam konteks alat kesehatan, risk ranking dapat dilakukan dengan dua pendekatan utama:

1. Pendekatan sederhana

Setiap alat kesehatan diberi skor untuk masing-masing kriteria risiko (misalnya skala 1-5 untuk probabilitas dan skala 1-5 untuk dampak), kemudian kedua skor dikalikan untuk mendapatkan nilai risiko. Alat dengan nilai risiko tertinggi menjadi prioritas utama [61].

2. Pendekatan multi-kriteria

Pendekatan ini mempertimbangkan lebih dari dua kriteria dalam menilai risiko. Selain probabilitas dan dampak, kriteria lain seperti biaya pemeliharaan, ketersediaan suku cadang, dan tingkat kekritisian juga dipertimbangkan secara simultan. Pendekatan ini lebih kompleks namun menghasilkan penilaian yang lebih komprehensif dan sesuai dengan kompleksitas pengelolaan aset alat kesehatan [62].

2.3.6 Kriteria Risiko untuk Alat Kesehatan

Penilaian risiko untuk alat kesehatan memerlukan penetapan kriteria yang relevan dengan karakteristik aset dan konteks operasional rumah sakit [63]. Berdasarkan penelitian terdahulu, terdapat beberapa kriteria risiko yang umum digunakan dalam manajemen risiko aset alat kesehatan:

1. Kekritisian terhadap layanan (criticality to service)

Kekritisian mengacu pada sejauh mana suatu alat kesehatan mempengaruhi kelancaran pelayanan medis apabila mengalami kegagalan fungsi. Alat yang bersifat kritis seperti ventilator, monitor pasien, dan mesin anestesi memiliki dampak yang sangat besar terhadap keselamatan pasien dan kelancaran operasional rumah sakit [64].

2. Frekuensi penggunaan (frequency of use)

Frekuensi penggunaan merupakan indikator seberapa sering alat kesehatan dioperasikan dalam periode waktu tertentu. Alat dengan frekuensi penggunaan tinggi

cenderung memiliki tingkat keausan yang lebih cepat dan probabilitas kerusakan yang lebih besar dibandingkan alat yang jarang digunakan [8].

3. Biaya perbaikan (repair cost)

Biaya perbaikan mencakup biaya suku cadang, biaya tenaga teknis, serta biaya lain yang diperlukan untuk mengembalikan fungsi alat setelah mengalami kerusakan. Alat dengan biaya perbaikan tinggi memerlukan pertimbangan khusus, terutama jika dibandingkan dengan nilai aset atau biaya pengantiannya [65].

4. Ketersediaan suku cadang (spare parts availability)

Ketersediaan suku cadang mengacu pada kemudahan memperoleh komponen pengganti ketika alat mengalami kerusakan. Alat dengan suku cadang yang sulit diperoleh cenderung memiliki downtime yang lebih panjang, sehingga berdampak lebih besar terhadap kelancaran pelayanan [66].

5. Nilai aset (asset value)

Nilai aset merupakan besaran investasi yang ditanamkan dalam pengadaan alat kesehatan. Alat dengan nilai aset tinggi memerlukan perlindungan yang lebih besar mengingat dampak finansial yang signifikan apabila terjadi kerusakan atau kehilangan [67].

6. Kondisi fisik (physical condition)

Kondisi fisik mencerminkan keadaan aktual alat kesehatan, termasuk tingkat keausan, usia alat, serta riwayat kerusakan sebelumnya. Alat dengan kondisi fisik yang buruk cenderung memiliki probabilitas kerusakan yang lebih tinggi dan memerlukan perhatian lebih dalam pemeliharaannya [68].

Kriteria-kriteria ini tidak berdiri sendiri, melainkan saling terkait dalam membentuk profil risiko yang komprehensif. Dalam praktiknya, penetapan bobot untuk masing-masing kriteria perlu mempertimbangkan konteks spesifik rumah sakit serta perspektif para pemangku kepentingan. Pendekatan multi-kriteria memungkinkan integrasi seluruh kriteria ini secara simultan untuk menghasilkan penilaian risiko yang lebih akurat dan sesuai dengan kompleksitas pengelolaan aset alat kesehatan [69].

Kriteria risiko yang telah diidentifikasi (kekritisan, frekuensi penggunaan, biaya pemeliharaan, ketersediaan suku cadang, nilai aset, dan kondisi fisik) menjadi dasar dalam penelitian ini untuk menilai prioritas penanganan alat kesehatan. Pendekatan multi-kriteria diperlukan karena risiko aset tidak dapat dinilai hanya dari satu atau dua kriteria, melainkan memerlukan pertimbangan simultan dari berbagai aspek. Hal ini menjadi justifikasi penggunaan metode MCDM (PROMETHEE) dalam penelitian ini.

2.4 Spectral Clustering

2.4.1 Konsep Dasar Spectral Clustering

Spectral Clustering merupakan metode pengelompokan data (clustering) yang memanfaatkan konsep teori graf dan aljabar linear untuk mengidentifikasi struktur cluster dalam suatu dataset. Berbeda dengan metode clustering konvensional yang bekerja langsung pada ruang data asli, Spectral Clustering melakukan transformasi data ke dalam ruang spektral (spectral embedding) berdasarkan dekomposisi eigen dari matriks yang merepresentasikan hubungan antar data [12].

Konsep dasar Spectral Clustering adalah merepresentasikan data sebagai graf. Dalam representasi ini, setiap titik data (data point) dipandang sebagai simpul (vertex) dalam graf, sementara hubungan kemiripan antara dua titik data direpresentasikan sebagai sisi (edge) yang menghubungkan kedua simpul tersebut. Bobot pada sisi mencerminkan tingkat kemiripan antara dua data, di mana nilai bobot yang tinggi menunjukkan kedua data memiliki karakteristik yang sangat mirip [70].

Pendekatan berbasis graf ini memungkinkan Spectral Clustering untuk menangkap struktur data yang kompleks yang tidak dapat diidentifikasi oleh metode clustering berbasis jarak Euclidean konvensional. Dengan memanfaatkan sifat-sifat graf, Spectral Clustering dapat mengidentifikasi cluster yang terpisah secara jelas meskipun batas antar cluster tidak berbentuk linear [13].

2.4.2 Matriks Similaritas dan Pembobotan Graf

Matriks similaritas merupakan komponen fundamental dalam Spectral Clustering karena matriks ini merepresentasikan hubungan kemiripan antar seluruh pasangan data dalam dataset. Matriks similaritas dinotasikan sebagai W berukuran $n \times n$, di mana n adalah jumlah data, dan setiap elemen W_{ij} menyatakan bobot kemiripan antara data ke- i dan data ke- j [71].

Pembentukan matriks similaritas umumnya dilakukan melalui dua pendekatan utama:

1. Fungsi kernel Gaussian (RBF - Radial Basis Function)

Fungsi RBF menghitung kemiripan berdasarkan jarak Euclidean antar data dengan rumus:

$$W_{ij} = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right) \dots\dots\dots(2.2)$$

di mana σ (sigma) adalah parameter skala yang mengontrol seberapa cepat bobot menurun seiring dengan bertambahnya jarak antar data. Pendekatan ini menghasilkan matriks similaritas yang bersifat fully connected, di mana setiap pasangan data memiliki bobot kemiripan non-negatif [72].

2. Metode k-Nearest Neighbors (kNN)

Metode kNN membangun matriks similaritas yang sparse dengan hanya mempertahankan bobot untuk k tetangga terdekat dari setiap data, sementara bobot untuk data lainnya diatur menjadi nol. Pendekatan ini menghasilkan graf yang lebih efisien secara komputasi dan lebih robust terhadap outlier [73].

Pemilihan metode pembobotan sangat mempengaruhi kualitas cluster yang dihasilkan. Metode RBF menghasilkan graf yang lebih dense dan cocok untuk data dengan struktur cluster yang tidak terlalu jelas, sementara metode kNN menghasilkan graf yang sparse dan lebih efisien untuk dataset berukuran besar [74].

2.4.3 Laplacian Matrix dan Dekomposisi Eigen

Setelah matriks similaritas W terbentuk, langkah berikutnya adalah membangun matriks Laplacian yang menjadi dasar analisis spektral [14]. Terdapat beberapa varian matriks Laplacian yang umum digunakan, antara lain [75]:

1. Unnormalized Laplacian

Matriks Laplacian tak ternormalisasi didefinisikan sebagai:

$$L = D - W \dots\dots\dots(2.3)$$

di mana D adalah matriks diagonal yang elemen diagonalnya merupakan derajat (degree) dari setiap simpul, yaitu $D_{ii} = \sum_j W_{ij}$

2. Normalized Laplacian (Symmetrik)

Matriks Laplacian ternormalisasi versi simetrik didefinisikan sebagai:

$$L_{Sym} = I - D^{-\frac{1}{2}} W D^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(2.4)$$

Varian ini lebih sering digunakan karena memiliki sifat spektral yang lebih baik untuk clustering.

Setelah matriks Laplacian terbentuk, dilakukan dekomposisi eigen (eigen decomposition) untuk memperoleh nilai eigen (eigenvalues) dan vektor eigen (eigenvectors). Proses dekomposisi eigen menghasilkan:

$$L_v = \lambda_v \dots\dots\dots(2. 5)$$

di mana λ adalah nilai eigen dan v adalah vektor eigen yang bersesuaian.

Dalam konteks Spectral Clustering, vektor-vektor eigen yang berkorespondensi dengan nilai eigen terkecil (setelah nilai eigen nol) mengandung informasi penting tentang struktur cluster dalam data. Vektor-vektor eigen ini kemudian digunakan sebagai representasi data baru dalam ruang spektral berdimensi lebih rendah [76].

2.4.4 Algoritma Spectral Clustering

Algoritma Spectral Clustering secara umum mengikuti langkah-langkah sistematis sebagai berikut [77]:

1. Langkah 1: Pembentukan Matriks Similaritas

Bangun matriks similaritas W berukuran $n \times n$ menggunakan fungsi kemiripan yang dipilih (misalnya RBF atau kNN).

2. Langkah 2: Pembentukan Matriks Laplacian

Hitung matriks derajat D dengan $D_{ii} = \sum_j W_{ij}$, kemudian bentuk matriks Laplacian ternormalisasi $L_{Sym} = I - D^{-\frac{1}{2}} W D^{-\frac{1}{2}}$

3. Langkah 3: Dekomposisi Eigen

Lakukan dekomposisi eigen pada matriks L_{Sym} untuk memperoleh nilai eigen dan vektor eigen. [x] Ambil k vektor eigen pertama yang berkorespondensi dengan k nilai eigen terkecil (tidak termasuk nilai eigen nol). Bentuk matriks U berukuran $n \times k$ yang kolom-kolomnya adalah vektor-vektor eigen tersebut.

4. Langkah 4: Normalisasi Vektor Eigen

Normalisasi setiap baris matriks U sehingga memiliki norma satuan, membentuk matriks T dengan elemen:

$$T_{ii} = \frac{U_{ij}}{\sqrt{\sum_i U_{ij}^2}} \dots\dots\dots(2. 6)$$

5. Langkah 5: Clustering pada Ruang Spektral

Terapkan algoritma clustering konvensional (misalnya K-Means) pada matriks T untuk mengelompokkan n data ke dalam k cluster. Setiap baris dalam T merepresentasikan data asli dalam ruang spektral.

6. Langkah 6: Pemetaan Kembali

Setiap data asli diberi label cluster sesuai dengan hasil clustering pada ruang spektral.

Implementasi algoritma ini dapat dilakukan menggunakan berbagai library komputasi seperti scikit-learn dalam Python atau toolkit serupa dalam bahasa pemrograman lainnya [78].

2.4.5 Keunggulan Spectral Clustering Dibanding Metode Konvensional

Spectral Clustering memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan metode clustering konvensional seperti K-Means, terutama dalam menangani data dengan struktur yang kompleks:

1. Mampu menangani struktur data non-linear dan kompleks

K-Means bekerja dengan asumsi bahwa cluster berbentuk hiperbola dan terpisah secara linear, sehingga kinerjanya menurun ketika dihadapkan pada data dengan struktur non-linear seperti lingkaran konsentris atau bulan sabit yang saling terkait. Sebaliknya, Spectral Clustering mampu mengidentifikasi cluster dengan batas non-linear karena pendekatan berbasis grafnya yang menangkap struktur manifold data [17].

2. Tidak terbatas pada cluster berbentuk bola (spherical)

K-Means mengelompokkan data berdasarkan jarak Euclidean, sehingga secara implisit mengasumsikan cluster berbentuk bola (spherical clusters). Spectral Clustering tidak memiliki keterbatasan ini karena bekerja pada representasi spektral yang dapat menangkap berbagai bentuk cluster, termasuk bentuk memanjang, melengkung, atau tidak beraturan [79].

3. Robust terhadap outlier

K-Means sangat sensitif terhadap keberadaan outlier karena perhitungan centroid dipengaruhi secara signifikan oleh titik-titik ekstrem. Spectral Clustering lebih robust terhadap outlier karena proses clustering dilakukan pada ruang spektral hasil dekomposisi eigen yang meredam pengaruh outlier melalui representasi berbasis kemiripan lokal [80].

Keunggulan-keunggulan ini menjadikan Spectral Clustering sebagai pilihan yang lebih tepat untuk dataset dengan struktur yang kompleks dan tidak diketahui bentuk distribusinya.

Dalam konteks data aset alat kesehatan yang memiliki enam kriteria dengan skala dan distribusi yang berbeda-beda, Spectral Clustering memiliki keunggulan dibandingkan K-Means. K-Means mengelompokkan data berdasarkan jarak Euclidean dan mengasumsikan cluster berbentuk bola (spherical clusters), sehingga kinerjanya menurun

ketika dihadapkan pada data dengan struktur non-linear [17]. Sebaliknya, Spectral Clustering menggunakan pendekatan berbasis graf yang menangkap struktur manifold data, sehingga lebih sesuai untuk data dengan kompleksitas seperti yang dimiliki oleh aset alat kesehatan [13]. Penelitian Srilekha (2025) dan Zamzam dkk. (2021) yang menggunakan K-Means untuk data alat kesehatan menunjukkan keterbatasan dalam menangkap struktur data yang kompleks, sehingga menjadi justifikasi penggunaan Spectral Clustering dalam penelitian ini [7], [9].

2.4.6 Parameter dalam Spectral Clustering

Implementasi Spectral Clustering memerlukan penentuan beberapa parameter penting yang mempengaruhi kualitas hasil clustering:

1. Jumlah cluster (k)

Parameter k menentukan berapa banyak kelompok yang akan dibentuk dari data. Penentuan k yang tepat merupakan tantangan tersendiri karena tidak selalu diketahui sebelumnya. [x] Beberapa metode yang umum digunakan untuk menentukan k antara lain eigengap heuristic (mencari celah terbesar antara nilai eigen berturut-turut), silhouette analysis, dan elbow method [81].

2. Jenis affinity (RBF, kNN)

Parameter affinity menentukan metode pembentukan matriks similaritas [82].

- a. RBF (Radial Basis Function): Menghasilkan matriks similaritas dense dengan parameter σ yang mengontrol tingkat kemiripan.
- b. kNN (k-Nearest Neighbors): Menghasilkan matriks similaritas sparse dengan parameter k yang menentukan jumlah tetangga yang dipertimbangkan.
- c. Nearest Neighbors with radius: Menghubungkan data yang berada dalam radius tertentu.

3. Gamma (γ)

Parameter γ muncul dalam fungsi kernel RBF sebagai pengganti σ dengan hubungan [83]:

$$\gamma = \frac{1}{2\sigma^2} \dots\dots\dots(2. 7)$$

Nilai γ yang terlalu kecil menyebabkan bobot kemiripan cenderung seragam untuk semua pasangan data, sementara nilai γ yang terlalu besar menyebabkan bobot kemiripan hanya signifikan untuk data yang sangat berdekatan. Pemilihan γ yang tepat sangat mempengaruhi kualitas cluster yang dihasilkan.

Pemilihan parameter yang optimal umumnya dilakukan melalui eksperimen dengan berbagai kombinasi nilai dan evaluasi menggunakan metrik validasi clustering.

2.4.7 Aplikasi Spectral Clustering dalam Berbagai Domain

Spectral Clustering telah diterapkan secara luas di berbagai domain karena kemampuannya dalam menangani data kompleks:

1. Pengolahan citra dan visi komputer

Dalam domain ini, Spectral Clustering digunakan untuk segmentasi citra (image segmentation) dengan merepresentasikan setiap piksel sebagai simpul dalam graf berdasarkan kemiripan warna, intensitas, atau posisi spasial. Pendekatan ini mampu menghasilkan segmentasi yang lebih akurat dibandingkan metode konvensional [84].

2. Analisis data biologi dan bioinformatika

Spectral Clustering digunakan untuk mengelompokkan data ekspresi gen (gene expression data) yang memiliki dimensi tinggi dan struktur kompleks. Metode ini membantu mengidentifikasi kelompok gen dengan pola ekspresi serupa yang terkait dengan fungsi biologis tertentu [85].

3. Analisis data jaringan dan media sosial

Dalam analisis jaringan sosial, Spectral Clustering digunakan untuk mendeteksi komunitas (community detection) dalam graf yang merepresentasikan hubungan antar pengguna [86].

4. Aplikasi di bidang kesehatan

Dalam konteks kesehatan, Spectral Clustering telah diterapkan untuk berbagai tujuan, antara lain:

- a. Segmentasi citra medis (MRI, CT scan) untuk mengidentifikasi area yang mengalami kelainan [87].
- b. Pengelompokan data pasien berdasarkan karakteristik klinis untuk mendukung diagnosis dan terapi yang lebih personal [88].
- c. Analisis data fisiologis (seperti sinyal EEG) untuk mengidentifikasi pola yang terkait dengan kondisi patologis tertentu [89].

Meskipun aplikasi Spectral Clustering pada data alat kesehatan untuk keperluan manajemen risiko aset masih terbatas, potensi penerapannya cukup besar mengingat kompleksitas struktur data aset yang mencakup berbagai kriteria dengan skala dan distribusi yang berbeda-beda. Kemampuan Spectral Clustering dalam menangani data non-linear dan

tidak berbentuk bola menjadikannya metode yang potensial untuk mengelompokkan alat kesehatan berdasarkan karakteristik risiko yang kompleks.

Berdasarkan uraian di atas, Spectral Clustering dipilih dalam penelitian ini karena kemampuannya menangani struktur data non-linear dan kompleks, yang sesuai dengan karakteristik data aset alat kesehatan yang memiliki enam kriteria dengan skala dan distribusi yang berbeda-beda. Kemampuan ini mengatasi keterbatasan K-Means yang digunakan pada penelitian terdahulu [7], [9]. Dengan demikian, Spectral Clustering menjadi metode yang tepat untuk mengelompokkan alat kesehatan berdasarkan kemiripan karakteristik risiko pada tahap awal model yang dikembangkan.

2.5 PROMETHEE

2.5.1 Sejarah dan perkembangan PROMETHEE

Metode PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*) pertama kali diperkenalkan oleh Jean-Pierre Brans dan Ph. Vincke pada tahun 1985 sebagai bagian dari keluarga metode Multi-Criteria Decision Aid (MCDA). Pengembangan metode ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan akan pendekatan pengambilan keputusan multi-kriteria yang lebih intuitif, mudah diimplementasikan, dan mampu memberikan interpretasi yang jelas terhadap preferensi pengambil keputusan [15].

Sejak diperkenalkan, PROMETHEE telah mengalami perkembangan signifikan. Versi awal PROMETHEE I menyediakan partial ranking yang memungkinkan adanya hubungan indifferensi dan incomparability antar alternatif. Selanjutnya, PROMETHEE II dikembangkan untuk menghasilkan complete ranking atau perangkingan penuh tanpa adanya hubungan indifferensi. Perkembangan lebih lanjut melahirkan PROMETHEE III yang menyediakan ranking based on intervals, PROMETHEE IV untuk kasus dengan kontinuitas alternatif, serta PROMETHEE V untuk kasus dengan kendala segmentasi [90].

Salah satu kontribusi penting dalam perkembangan PROMETHEE adalah pengenalan GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Aid) oleh Brans dan Mareschal pada tahun 1994, yang memungkinkan visualisasi interaktif dari hasil analisis multi-kriteria dalam bentuk bidang dua dimensi [91]. Pengembangan ini menjadikan PROMETHEE tidak hanya sebagai metode perangkingan, tetapi juga sebagai alat analisis yang kuat untuk mendukung pemahaman terhadap struktur masalah pengambilan keputusan.

2.5.2 Konsep Dasar

Metode PROMETHEE didasarkan pada konsep outranking yang membandingkan setiap pasangan alternatif untuk setiap kriteria yang ditetapkan [92]. Terdapat dua konsep fundamental dalam PROMETHEE, yaitu fungsi preferensi dan indeks preferensi multi-kriteria.

1. Fungsi Preferensi

Fungsi preferensi $P_j(a, b)$ didefinisikan untuk setiap kriteria j dan setiap pasangan alternatif a dan b [93]. Fungsi ini mengukur tingkat preferensi alternatif a terhadap alternatif b berdasarkan kriteria j , dengan nilai antara 0 dan 1.

$$P_j(a, b) = F_j[d_j(a, b)] \dots\dots\dots(2. 8)$$

di mana $d_j(a, b)$ adalah deviasi atau selisih nilai alternatif a dan b pada kriteria j (yaitu $f_j a - f_j b$).

Interpretasi dari fungsi preferensi adalah sebagai berikut:

- $P_j(a, b) = 0$: tidak ada preferensi a terhadap b pada kriteria j
- $P_j(a, b) \approx 0$: preferensi lemah a terhadap b pada kriteria j
- $P_j(a, b) \approx 1$: preferensi kuat a terhadap b pada kriteria j
- $P_j(a, b) = 1$: preferensi mutlak a terhadap b pada kriteria j

2. Indeks Preferensi Multi-Kriteria

Indeks preferensi multi-kriteria $\pi(a, b)$ merupakan agregasi dari fungsi preferensi seluruh kriteria dengan mempertimbangkan bobot masing-masing kriteria [16].

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^k w_j \cdot P_j(a, b) \dots\dots\dots(2. 9)$$

di mana w_j adalah bobot kriteria ke- j dengan indeks $\pi(a, b)$ mencerminkan derajat preferensi alternatif a terhadap alternatif b secara keseluruhan, dengan nilai antara 0 dan 1. Nilai $\pi(a, b)$ mendekati 1 menunjukkan bahwa a secara kuat lebih disukai dibandingkan b berdasarkan seluruh kriteria, sementara nilai mendekati 0 menunjukkan preferensi yang lemah.

2.5.3 Jenis-Jenis Fungsi Preferensi

PROMETHEE menyediakan enam jenis fungsi preferensi yang dapat dipilih sesuai dengan karakteristik kriteria dan preferensi pengambil keputusan [94]. Pemilihan fungsi preferensi yang tepat sangat mempengaruhi hasil perankingan.

1. Fungsi Biasa (Usual Criterion)

Fungsi ini memberikan preferensi 0 jika deviasi $d \leq 0$ dan preferensi 1 jika $d > 0$. Fungsi ini cocok untuk kriteria yang bersifat kualitatif atau ketika pengambil keputusan menghendaki preferensi tegas tanpa ambang batas [95].

2. Fungsi Berbentuk U (U-Shape Criterion)

Fungsi ini memberikan preferensi 0 jika deviasi $d \leq q$, dan preferensi 1 jika $d > q$, di mana q adalah ambang batas indiferensi. Fungsi ini cocok untuk kriteria dengan ambang batas tertentu, di mana perbedaan nilai yang sangat kecil dianggap tidak signifikan [95].

3. Fungsi Berbentuk V (V-Shape Criterion)

Fungsi ini memberikan preferensi yang meningkat secara linear dari 0 hingga 1 seiring dengan meningkatnya deviasi, dengan parameter p sebagai ambang batas preferensi mutlak. Fungsi ini cocok untuk kriteria dengan skala kontinu dan preferensi yang proporsional terhadap besarnya deviasi [95].

4. Fungsi Bertingkat (Level Criterion)

Fungsi ini memberikan preferensi 0 jika $d \leq q$, preferensi 0,5 jika $q < d \leq p$, dan preferensi 1 jika $d > p$. Fungsi ini cocok untuk situasi di mana preferensi berubah secara bertahap [95].

5. Fungsi Gaussian (Gaussian Criterion)

Fungsi ini menggunakan kurva Gaussian untuk menentukan preferensi, dengan parameter σ yang mengontrol bentuk kurva. Fungsi ini cocok untuk kriteria dengan distribusi data yang mendekati normal [95].

Pemilihan fungsi preferensi dilakukan berdasarkan pemahaman terhadap karakteristik kriteria dan preferensi pengambil keputusan. Dalam praktiknya, fungsi V-Shape dan Linear paling sering digunakan untuk kriteria kuantitatif, sementara fungsi Usual dan U-Shape lebih cocok untuk kriteria kualitatif.

2.5.4 Alur PROMETHEE

Alur metode PROMETHEE terdiri dari beberapa tahapan sistematis yang menghasilkan perankingan alternatif. Berikut adalah langkah-langkah utama dalam implementasi PROMETHEE [96]:

1. Perhitungan deviasi antar alternatif

Langkah pertama adalah menghitung deviasi $d_j(a, b)$ untuk setiap pasangan alternatif (a, b) pada setiap kriteria j . Deviasi dihitung sebagai selisih nilai alternatif a dan b pada kriteria tersebut:

$$d_j(a, b) = f_j(a) - f_j(b) \dots\dots\dots(2. 10)$$

Deviasi positif menunjukkan bahwa alternatif a lebih baik dari alternatif b pada kriteria j , sementara deviasi negatif menunjukkan sebaliknya.

2. Aplikasi fungsi preferensi

Setelah deviasi dihitung, fungsi preferensi $P_j(a, b)$ diterapkan untuk setiap deviasi berdasarkan jenis fungsi preferensi yang telah dipilih untuk masing-masing kriteria. Hasilnya adalah nilai preferensi antara 0 dan 1 yang mencerminkan tingkat preferensi a terhadap b pada kriteria j .

3. Perhitungan leaving flow (Φ^+) dan entering flow (Φ^-)

Leaving flow (Φ^+) dan entering flow (Φ^-) dihitung untuk setiap alternatif sebagai agregasi dari indeks preferensi multi-kriteria.

Leaving flow didefinisikan sebagai:

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in A} \pi(a, b) \dots\dots\dots(2. 11)$$

di mana n adalah jumlah alternatif dan A adalah himpunan seluruh alternatif. Φ^+ mengukur seberapa kuat alternatif a mengungguli alternatif lainnya.

Entering flow didefinisikan sebagai:

$$\Phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in A} \pi(b, a) \dots\dots\dots(2. 12)$$

Φ^- mengukur seberapa kuat alternatif a dikalahkan oleh alternatif lainnya.

4. Perhitungan net flow (Φ) untuk PROMETHEE II

Untuk menghasilkan perankingan penuh (complete ranking), PROMETHEE II menggunakan net flow yang merupakan selisih antara leaving flow dan entering flow:

$$\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a) \dots\dots\dots(2. 13)$$

Net flow memiliki rentang nilai antara -1 hingga 1. Semakin tinggi nilai net flow suatu alternatif, semakin baik peringkatnya. Alternatif dengan net flow tertinggi ditempatkan pada peringkat pertama, dan seterusnya.

2.5.5 Visualisasi dalam PROMETHEE

Salah satu keunggulan utama PROMETHEE adalah kemampuannya dalam menyajikan hasil analisis secara visual melalui berbagai alat visualisasi.

1. GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Aid) plane

GAIA merupakan alat visualisasi yang dikembangkan untuk mendukung interpretasi hasil PROMETHEE. GAIA plane menyajikan representasi dua dimensi dari alternatif dan kriteria dalam satu bidang, sehingga memungkinkan pengambil keputusan untuk memahami struktur masalah secara visual [19].

Dalam GAIA plane, setiap alternatif direpresentasikan sebagai titik, sementara setiap kriteria direpresentasikan sebagai vektor. Panjang vektor kriteria menunjukkan tingkat diskriminasi kriteria tersebut, sementara arah vektor menunjukkan kesesuaian kriteria dengan alternatif. Kriteria yang berdekatan menunjukkan adanya korelasi positif, sementara kriteria yang berlawanan arah menunjukkan korelasi negatif.

GAIA plane juga menampilkan sumbu keputusan (decision axis) yang merepresentasikan arah preferensi gabungan dari seluruh kriteria. Proyeksi alternatif pada sumbu keputusan memberikan gambaran peringkat yang konsisten dengan net flow PROMETHEE II [19].

2. Rainbow diagram

Rainbow diagram merupakan visualisasi pelengkap yang menyajikan peringkat alternatif beserta kontribusi masing-masing kriteria terhadap net flow. Diagram ini berbentuk batang horizontal dengan warna berbeda untuk setiap kriteria, sehingga pengambil keputusan dapat melihat secara langsung kriteria mana yang mendukung atau menentang suatu alternatif [97].

Rainbow diagram sangat berguna untuk analisis sensitivitas dan pemahaman mendalam terhadap kelebihan dan kekurangan setiap alternatif. Dengan melihat distribusi warna pada diagram, pengambil keputusan dapat mengidentifikasi kompromi antar kriteria yang terjadi pada setiap alternatif [97].

2.5.6 Keunggulan PROMETHEE dibanding Metode MCDM Lain

Metode PROMETHEE memiliki sejumlah keunggulan yang membedakannya dari metode Multi-Criteria Decision Making (MCDM) lainnya.

1. Intuitif dan mudah dipahami

Konsep dasar PROMETHEE yang berbasis perbandingan berpasangan (pairwise comparison) dan fungsi preferensi yang sederhana membuat metode ini mudah

dipahami oleh pengambil keputusan yang tidak memiliki latar belakang matematika yang kuat. Proses penalaran dalam PROMETHEE sesuai dengan cara berpikir alami manusia dalam membandingkan alternatif [98].

2. Visualisasi yang kuat untuk mendukung keputusan

Keberadaan GAIA plane dan rainbow diagram memberikan keunggulan signifikan dibanding metode MCDM lain yang hanya menghasilkan nilai numerik atau peringkat. Visualisasi ini memungkinkan pengambil keputusan untuk memahami struktur masalah, melihat konflik antar kriteria, dan mengeksplorasi alternatif secara interaktif [99].

3. Tidak memerlukan asumsi normalisasi tertentu

Berbeda dengan metode seperti TOPSIS atau SAW yang memerlukan normalisasi data untuk menyamakan skala kriteria, PROMETHEE bekerja langsung dengan nilai asli kriteria melalui fungsi preferensi. Hal ini menghindarkan dari masalah kehilangan informasi akibat proses normalisasi [18].

4. Dapat menangani kriteria kuantitatif dan kualitatif

PROMETHEE mampu menangani campuran kriteria kuantitatif (yang diukur dalam skala numerik) dan kriteria kualitatif (yang diukur dalam skala ordinal seperti "buruk", "cukup", "baik") secara simultan. Fleksibilitas ini sangat berguna dalam masalah pengambilan keputusan dunia nyata yang sering melibatkan berbagai jenis data [100].

Keunggulan-keunggulan tersebut menjadikan PROMETHEE sebagai salah satu metode MCDM yang paling banyak diadopsi dalam berbagai bidang aplikasi.

Dalam konteks pemilihan metode MCDM untuk perancangan prioritas alat kesehatan, PROMETHEE memiliki keunggulan dibandingkan AHP dan TOPSIS. AHP memerlukan perbandingan berpasangan yang menjadi tidak praktis jika jumlah alternatif (alat kesehatan) sangat banyak [10]. TOPSIS memerlukan normalisasi data yang dapat menyebabkan kehilangan informasi [18]. Sementara itu, PROMETHEE bekerja langsung dengan nilai asli kriteria melalui fungsi preferensi, sehingga menghindari masalah kehilangan informasi akibat normalisasi [15]. Selain itu, PROMETHEE mampu menangani campuran kriteria kuantitatif dan kualitatif secara simultan [100], serta menyediakan visualisasi GAIA plane yang memudahkan interpretasi hasil [19]. Kemampuan ini sangat sesuai dengan kebutuhan penelitian yang melibatkan enam kriteria risiko dengan karakteristik yang berbeda-beda.

Berdasarkan uraian di atas, PROMETHEE dipilih dalam penelitian ini karena kemampuannya menangani kriteria kuantitatif dan kualitatif secara simultan, tidak memerlukan normalisasi data yang berisiko kehilangan informasi, serta menyediakan visualisasi GAIA plane dan rainbow diagram yang memudahkan interpretasi hasil. Keunggulan ini sangat sesuai dengan kebutuhan penelitian yang melibatkan enam kriteria risiko dengan karakteristik berbeda-beda dan memerlukan output berupa peringkat prioritas yang mudah dipahami oleh pengambil keputusan di rumah sakit.

2.6 Penelitian Terdahulu

Penelitian tentang manajemen risiko aset, penerapan metode clustering, serta penggunaan Multi-Criteria Decision Making (MCDM) di sektor kesehatan telah banyak dilakukan oleh para peneliti sebelumnya. Sub-bab ini menyajikan review terhadap penelitian-penelitian terdahulu yang relevan, yang kemudian digunakan untuk mengidentifikasi celah penelitian (research gap) serta menegaskan posisi dan kebaruan (novelty) dari penelitian ini.

2.6.1 Penelitian tentang Manajemen Risiko Aset di Rumah Sakit

Pimenta dan Vieira (2025) melakukan systematic review dengan tujuan menyediakan ringkasan komprehensif tentang pendekatan yang dapat digunakan atau diadaptasi untuk menyeleksi dan memprioritaskan alat kesehatan dalam evaluasi Health Technology Assessment (HTA). Penelitian ini dilatarbelakangi oleh tidak adanya pendekatan yang diterima secara umum untuk prioritasasi alat kesehatan dalam HTA, serta kebutuhan untuk memahami metode-metode yang telah dikembangkan. Pencarian literatur dilakukan di PubMed, Web of Science, Scopus, INAHTA, dan CRD hingga Desember 2024. Dari 1.055 records yang diidentifikasi, 51 studi dinyatakan layak untuk direview. Hasil analisis menunjukkan bahwa hanya 31 studi yang menyebutkan metode value assessment yang digunakan, dan mayoritas (77%) menggunakan Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA). Dari 22 studi yang secara spesifik berfokus pada prioritasasi HTA, atribut nilai yang paling sering digunakan adalah Clinical efficacy and/or effectiveness (95%), Impact of the disease (59%), Ethical, social and legal aspects (50%), Target population (45%), dan Budget impact (45%). Metode sosial yang umum diimplementasikan adalah kuesioner/survei (25%) dan teknik Delphi (12%). Penelitian ini menemukan bahwa tren publikasi meningkat signifikan dalam 8 tahun terakhir (2015-2024) dengan 63% studi dipublikasikan pada periode tersebut. Sebagian besar studi (35%) bersifat global dan tidak spesifik negara, sementara 59% studi

ditujukan untuk negara tertentu. Dalam hal fokus teknologi kesehatan, 41% studi berfokus pada alat kesehatan dan 39% pada teknologi kesehatan umum. Metode MCDM yang paling banyak digunakan adalah Analytic Hierarchy Process (AHP) dengan 11 aplikasi (19%), diikuti TOPSIS (7%), PAPRIKA (5%), dan VIKOR (3%). Namun, 34% metode yang ditemukan tidak dispesifikasikan dengan jelas. Penelitian ini menyimpulkan bahwa belum ada pendekatan standar untuk memprioritaskan alat kesehatan dalam HTA, namun MCDM mendominasi aplikasi yang ada. Underreporting komponen teknis dan sosial masih sering terjadi, yang mengganggu transparansi dan replikabilitas. Penelitian ini merekomendasikan pengembangan kerangka sosio-teknis yang robust untuk memandu keputusan prioritas alat kesehatan, dengan melibatkan berbagai pemangku kepentingan termasuk providers, payers, policy makers, dan scientific experts. Pasien dan publik masih jarang dilibatkan (hanya 14%), padahal perspektif mereka penting dalam pengambilan keputusan [101].

2.6.2 Penelitian tentang Penerapan Metode Clustering pada Aset Kesehatan

Zamzam dkk. (2021) melakukan penelitian di Malaysia dengan tujuan mengembangkan sistem penilaian prioritas dan prediksi untuk manajemen pemeliharaan strategis alat kesehatan yang komprehensif, mencakup preventive maintenance, corrective maintenance, dan replacement programme. Penelitian ini menggunakan dataset 13.352 unit alat kesehatan dari 19 kategori yang tersebar di fasilitas kesehatan publik di 10 negara bagian Malaysia, dengan periode data 2015-2020. Penelitian ini menggunakan kombinasi unsupervised dan supervised machine learning dalam tiga tahap. Tahap pertama adalah prioritisation analysis menggunakan modified k-Means clustering dengan 16 fitur yang dikelompokkan berdasarkan jenis pemeliharaan (9 fitur untuk preventive maintenance, 9 fitur untuk corrective maintenance, dan 11 fitur untuk replacement programme). Fitur-fitur tersebut meliputi age, support service, asset condition, function, preventive maintenance status, missed PPM, request to repair time, maintenance requirement, maintenance complexity, repair time, downtime, number of failures, asset status, backup or alternative unit, operations, dan maintenance cost. Tahap kedua adalah model training dengan enam algoritma machine learning (Decision Tree, Linear Discriminant, Naive Bayes, Support Vector Machine, K-Nearest Neighbour, dan Bagged Trees). Tahap ketiga adalah pengembangan predictive model untuk masing-masing jenis pemeliharaan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Support Vector Machine menjadi algoritma terbaik untuk prediksi preventive maintenance dengan akurasi 99,42% (hanya 77 misklasifikasi dari 13.352 unit), K-Nearest Neighbour menjadi algoritma terbaik untuk prediksi corrective maintenance

dengan akurasi 98,93% (11 misklasifikasi dari 1.028 unit yang malfunctioning), dan Support Vector Machine kembali menjadi algoritma terbaik untuk prediksi replacement programme dengan akurasi 99,80% (27 misklasifikasi dari 13.352 unit). Analisis clustering menghasilkan tiga tingkat prioritas (high, medium, low) untuk masing-masing jenis pemeliharaan. Untuk preventive maintenance, high priority (3.603 unit) didominasi alat dengan usia >10 tahun, missed PPM 1-7 kali, downtime >1 hari (75%), dan frekuensi kerusakan 1-41 kali. Untuk corrective maintenance, high priority didominasi alat dengan response time hingga 148 hari, repair time hingga 478 hari, frekuensi kerusakan hingga 29 kali, dan biaya perbaikan hingga MYR86.000. Untuk replacement programme, high priority (4.351 unit) didominasi alat dengan usia 2-41 tahun (88% >10 tahun), obsolescent, frekuensi kerusakan hingga 41 kali, dan biaya pemeliharaan hingga MYR212.000. Penelitian ini menyimpulkan bahwa sistem penilaian prioritas dan prediksi yang dikembangkan dapat membantu clinical engineers dalam mengelola anggaran pemeliharaan, menyusun jadwal kerja, mengelola sumber daya, dan merencanakan penggantian alat. Penelitian ini juga menekankan bahwa teknik clustering (k-Means) berhasil mengelompokkan alat berdasarkan pola data tanpa intervensi manual, sementara supervised learning memberikan prediksi akurat untuk dataset baru. Kontribusi utama penelitian ini adalah penggunaan 16 fitur novel dalam satu kerangka terpadu untuk tiga jenis pemeliharaan, validasi pada dataset besar (13.352 unit) dengan berbagai kategori alat, serta perbandingan komprehensif enam algoritma machine learning [7].

Srilekha (2025) melakukan penelitian di Rumah Sakit X, Chennai, India dengan tujuan melakukan stratifikasi alat kesehatan menggunakan algoritma K-means clustering dan mengoptimalkan penjadwalan pemeliharaan berdasarkan prioritas yang dihasilkan. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan manajemen pemeliharaan alat kesehatan yang strategis untuk mengoptimalkan alokasi sumber daya dan memastikan keselamatan pasien. Penelitian ini menggunakan dataset 1.973 unit alat kesehatan dengan empat fitur utama: purchase cost, downtime per year, usage per week, dan preventive maintenance cost per year. Metode yang digunakan adalah K-means clustering dengan jumlah cluster ditentukan melalui silhouette analysis. Setelah clustering, dilakukan perhitungan criticality score dengan formula: $0,4 \times (\text{Downtime}/\text{Max Downtime}) + 0,3 \times (\text{PMCost}/\text{Max PMCost}) + 0,3 \times (\text{Usage}/\text{Max Usage})$. Berdasarkan criticality score, ditetapkan interval pemeliharaan yang dioptimalkan: High Priority (30 hari PM, 7 hari inspeksi, 90 hari kalibrasi), Medium Priority (60 hari PM, 14 hari inspeksi, 180 hari kalibrasi), dan Low Priority (90 hari PM, 30 hari inspeksi, 365 hari kalibrasi). Hasil penelitian menunjukkan bahwa K-means clustering

berhasil mengelompokkan 1.973 alat kesehatan ke dalam tiga kategori prioritas dengan distribusi hampir merata: High Priority (658 unit, 33,4%), Medium Priority (657 unit, 33,3%), dan Low Priority (658 unit, 33,4%). Silhouette score sebesar 0,154 menunjukkan validitas clustering yang cukup baik. Karakteristik masing-masing cluster: High Priority didominasi multiparameter monitor (164 unit), ventilator (141 unit), dan syringe infusion pump (137 unit) dengan rata-rata downtime 103,23 hari/tahun dan biaya PM rata-rata Rp 20.818. Medium Priority mencakup 242 multiparameter monitor, 87 pulse oximeter, dan 83 ventilator dengan downtime rata-rata 49,31 hari/tahun. Low Priority didominasi infusion pump (115 unit), syringe infusion pump (74 unit), dan defibrillator (61 unit) dengan downtime rata-rata 26,80 hari/tahun. Implementasi penjadwalan optimal menghasilkan total aktivitas PM tahunan 14.470, inspeksi 59.194, kalibrasi 4.604, dengan total jam pemeliharaan 79.584 jam (9.948 hari-orang) dan kebutuhan 39 teknisi full-time. Estimasi penghematan biaya tahunan mencapai Rp 1.580.337 (4,26%) dan pengurangan downtime 20.207 hari (17,1%). High Priority mengalami pengurangan downtime terbesar (13.585 hari atau 20%), diikuti Medium Priority (4.859 hari atau 15%) dan Low Priority (1.763 hari atau 10%). Penelitian ini menyimpulkan bahwa stratifikasi alat kesehatan berbasis clustering dapat meningkatkan efisiensi pemeliharaan dan mengurangi biaya operasional secara signifikan. Pendekatan yang berbeda untuk setiap kategori prioritas memastikan bahwa alat kritis mendapat perhatian lebih intensif sementara sumber daya dialokasikan secara optimal. Penelitian ini juga menekankan bahwa distribusi alat yang merata antar prioritas (33,3-33,4%) memastikan implementasi praktis yang layak [9].

2.6.3 Penelitian tentang Penerapan Metode MCDM di Sektor Kesehatan

Marciano dkk. (2022) melakukan penelitian di Rumah Sakit Moinhos de Vento, Porto Alegre, Brasil, dengan tujuan memilih penyedia jasa kalibrasi alat kesehatan terbaik menggunakan metode Analytical Hierarchy Process (AHP). Penelitian ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan rumah sakit untuk memastikan bahwa jasa kalibrasi dilakukan oleh perusahaan yang paling berkualifikasi, mengingat kalibrasi yang akurat sangat penting untuk keselamatan pasien dan keandalan alat medis. Penelitian ini mengidentifikasi 14 kriteria evaluasi untuk memilih penyedia jasa kalibrasi. Kriteria-kriteria tersebut dievaluasi oleh sekelompok ahli teknik klinis dengan latar belakang pendidikan dan pengalaman profesional yang beragam (hingga 25 tahun di bidangnya). Metode AHP digunakan untuk menentukan bobot prioritas masing-masing kriteria melalui perbandingan berpasangan (pairwise comparison) menggunakan skala fundamental Saaty (1-9). Konsistensi penilaian diuji

dengan consistency index dan consistency ratio. Hasil penelitian menunjukkan bahwa indeks konsistensi yang dicapai adalah 7%, yang mengindikasikan distribusi bobot yang baik. Setelah bobot kriteria ditetapkan, penilaian terhadap masing-masing perusahaan penyedia jasa dilakukan untuk menentukan perusahaan mana yang terbaik. Perusahaan dengan skor tertinggi kemudian dipilih sebagai penyedia jasa kalibrasi [10].

Huang dkk. (2024) melakukan penelitian di Shanghai, China, dengan tujuan mengembangkan model pengambilan keputusan multi-kriteria untuk prioritas penggantian alat kesehatan. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh fenomena bahwa keputusan penggantian alat besar sering didasarkan pada penilaian subjektif analisis objektif, serta belum adanya pendekatan standar. Penelitian ini membangun sistem indikator evaluasi prioritas penggantian alat kesehatan besar yang mencakup empat aspek utama: operational security (saturasi kerja, utilisasi peralatan, intensitas kerja), social benefits (rata-rata waktu tunggu pasien, rata-rata interval pemeriksaan pasien), technical specifications (indeks umur alat, frekuensi kerusakan), dan economic benefits (rasio biaya-manfaat, periode pengembalian modal). Total terdapat 9 indikator yang digunakan. Metodologi yang digunakan menggabungkan COWA (Combined Ordered Weighted Averaging) untuk menentukan bobot berdasarkan penilaian 8 ahli manajemen alat kesehatan, PCA (Principal Component Analysis) untuk menghitung bobot objektif dari indikator, serta game theory untuk mengintegrasikan bobot subjektif dan objektif menjadi bobot kombinasi yang optimal. Selanjutnya, metode GRA-TOPSIS (Grey Relational Analysis - Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) digunakan untuk merangking prioritas penggantian alat. Penelitian ini divalidasi menggunakan data 4 unit MRI di rumah sakit tersier. Hasil menunjukkan bahwa model efektif dalam memprioritaskan alat yang paling membutuhkan penggantian dengan tingkat diferensiasi yang lebih tinggi dibanding metode GRA atau TOPSIS saja. Nilai R^2 sebesar 0,9667 menunjukkan kesesuaian tinggi dengan realitas empiris, dan uji Kendall menghasilkan koefisien W sebesar 0,812 ($p=0,039$) yang menunjukkan konsistensi signifikan antar metode. Penelitian ini menyimpulkan bahwa model MCDM terpadu memberikan alat yang akurat untuk mengoptimalkan keputusan penggantian alat kesehatan [11].

Abonyi dkk. (2022) melakukan penelitian di Hungaria dengan tujuan mengembangkan dan meningkatkan metode PROMETHEE-GAIA agar lebih interpretabel, terutama ketika jumlah kriteria sangat banyak. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh kelemahan GAIA yang menggunakan PCA, dimana semua kriteria asli membentuk principal components sehingga interpretasi menjadi sulit. Penelitian ini mengusulkan tiga metode

perbaikan: (1) P-PFA (Principal Factor Analysis dengan rotation dan communality analysis), (2) P-sPCA (integrasi Sparse PCA ke dalam PROMETHEE), dan (3) P-SRD (Sum of Ranking Differences). Metode-metode ini diuji menggunakan dataset I4.0+ yang mengukur kesiapan Industry 4.0 pada 314 region Eropa (NUTS 2) dengan 69 kriteria yang dikelompokkan dalam lima dimensi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa P-PFA berhasil mengeliminasi 34 kriteria multikolinier dari 69 variabel dan mengelompokkan kriteria ke dalam dua faktor utama: (1) employment rates and job opportunities, dan (2) academia sector dan employees in R&D fields coupled with I4.0-related news. P-sPCA berhasil mengidentifikasi dua principal components dengan sparse loadings: PC1 terkait human resources in science and technology dan PC2 terkait people employed in science and technology sectors coupled with I4.0-related news. P-SRD berhasil meranking kriteria berdasarkan kedekatannya dengan golden standard (average), dimana kriteria Human Resources in Science and Technology (HS5, HS7, HS9) menjadi yang paling determinan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa ketiga metode yang diusulkan efektif untuk meningkatkan interpretabilitas PROMETHEE-GAIA, terutama dalam menangani masalah dengan jumlah kriteria yang besar. P-PFA cocok untuk seleksi dan klasifikasi kriteria ketika banyak kriteria redundan. P-sPCA cocok untuk membuat composite criterion yang hanya mencakup beberapa kriteria paling determinan. P-SRD cocok untuk memvisualisasikan similaritas antar kriteria dan menyediakan uji statistik [102].

Al Awadh (2022) melakukan penelitian di Arab Saudi dengan tujuan mengevaluasi kualitas layanan kesehatan di tiga rumah sakit di wilayah Asir menggunakan metode Analytical Hierarchy Process (AHP). Penelitian ini dilatarbelakangi oleh meningkatnya kesadaran pasien akan kualitas layanan kesehatan dan kebutuhan rumah sakit untuk meningkatkan kepuasan pasien di tengah persaingan yang ketat. Penelitian ini menggunakan tujuh dimensi SERVQUAL yang diperluas (tangibles, responsiveness, reliability, assurance, empathy, constancy, dan security) dengan total 31 sub-kriteria. Metodologi yang digunakan melibatkan panel enam ahli (dua dokter, dua perawat, dan dua administrator dari masing-masing tiga rumah sakit) untuk melakukan perbandingan berpasangan. Tiga rumah sakit yang dievaluasi adalah Abha Private Hospital (APH), Asir General Hospital (AGH), dan Al Haya Hospital (AHH). Konsistensi penilaian diuji menggunakan consistency ratio (CR) dan nilai kappa sebesar 0,83 menunjukkan kesepakatan yang baik antar ahli. Hasil penelitian menunjukkan bahwa prioritas dimensi kualitas layanan kesehatan adalah reliability (0,2449) > tangibles (0,2166) > security (0,1633) > assurance (0,1153) > responsiveness (0,1019) > empathy (0,1007) > constancy (0,0574). Untuk sub-kriteria, hygiene (0,4650) menjadi

prioritas tertinggi dalam dimensi tangibles, sementara completeness (0,0260) menjadi prioritas terendah dalam dimensi responsiveness. Berdasarkan bobot global, sub-kriteria hospital infection safety (0,1069) menjadi yang paling berpengaruh, diikuti hygiene (0,1007) dan equipment (0,0536). Hasil perankingan ketiga rumah sakit menunjukkan Abha Private Hospital unggul dengan bobot global 0,4585, diikuti Al Haya Hospital (0,3604), dan Asir General Hospital (0,1811). Penelitian ini menyimpulkan bahwa rumah sakit harus paling berkonsentrasi pada reliability, tangibles, dan security, serta paling sedikit pada constancy. Pencegahan infeksi dan kebersihan menjadi prioritas utama rumah sakit. AHP terbukti efektif dalam memprioritaskan dimensi dan sub-kriteria kualitas layanan kesehatan serta memilih rumah sakit dengan layanan terbaik. Penelitian ini memberikan implikasi manajerial untuk memonitor sistem kesehatan dan meningkatkan kualitas layanan guna meningkatkan kepuasan pasien [103].

2.6.4 Penelitian tentang Integrasi Clustering dan MCDM

Bashir dkk. (2023) melakukan penelitian dengan tujuan mengembangkan algoritma clustering berurutan (ordered clustering) multi-kriteria berdasarkan partial net outranking flow dari metode PROMETHEE dan fuzzy c-means (FCM). Penelitian ini dilatarbelakangi oleh keterbatasan FCM konvensional yang menggunakan Euclidean norm dan tidak mempertimbangkan hubungan prioritas antar kriteria dalam pengelompokan data. Padahal, dalam konteks multi-kriteria, decision maker sering membutuhkan "ordered clusters" dengan informasi ranking yang jelas antar cluster. Penelitian ini mengusulkan algoritma Multicriteria Ordered Profile Fuzzy C-Means (MOPFCM) yang mengintegrasikan partial net outranking flow PROMETHEE ke dalam objective function FCM. Algoritma ini bekerja dengan: (1) menghitung partial net outranking flow $\phi_{gl}(a_i)$ dan net outranking flow $\phi(a_i)$ untuk setiap alternatif menggunakan PROMETHEE, (2) menginisialisasi membership secara random, (3) menghitung fuzzy centroids θ_{gl}^i berdasarkan partial net outranking flow, (4) menentukan ranking cluster berdasarkan fuzzy centroids, (5) mengupdate membership, dan (6) mengulang hingga konvergensi. Hasil akhirnya adalah cluster berurutan dengan ranking alternatif di dalam cluster dan antar cluster. Algoritma MOPFCM diuji pada studi kasus Human Development Index (HDI) dengan 179 negara dan tiga kriteria (life expectancy, adult literacy index, GDP). Hasil penelitian menunjukkan bahwa MOPFCM berhasil mengelompokkan 179 negara ke dalam 4 cluster berurutan: very high human development (52 negara), high human development (74 negara), medium human development (30 negara), dan low human development (23 negara). Setiap alternatif diberi

ranking tiga angka (cluster number, ranking within cluster, overall ranking), misalnya Qatar (1, 34, 36) yang berarti masuk cluster very high, peringkat 34 di dalam cluster, dan peringkat 36 secara keseluruhan. Perbandingan dengan FCM konvensional menunjukkan bahwa FCM gagal menghasilkan cluster yang sesuai dengan HDI ranking karena menggunakan Euclidean distance yang simetris dan tidak mempertimbangkan preferensi antar kriteria. Sementara itu, perbandingan dengan Ordered K-Means (OKM) menunjukkan hasil yang sangat mirip dengan MOPFCM, yang mengindikasikan bahwa integrasi PROMETHEE dengan algoritma clustering mampu menangkap struktur preferensi multi-kriteria dengan baik. Penelitian ini menyimpulkan bahwa MOPFCM memiliki beberapa keunggulan: (1) mempertimbangkan bobot setiap kriteria, (2) setiap profil kriteria merefleksikan preferensi alternatif dalam cluster yang sama, (3) centroid cluster membantu klasifikasi tingkat cluster, dan (4) menghasilkan ranking lengkap alternatif di dalam cluster dan antar cluster [104].

Barrera dkk. (2023) melakukan penelitian dengan tujuan mengembangkan metode sorting multi-kriteria yang robust untuk mengklasifikasikan supplier ke dalam kategori berurutan (ordered categories) dan memvalidasinya dalam konteks nyata. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan akan model yang aplikatif dalam manajemen supplier serta kelemahan metode sorting yang ada, seperti ketidakmampuan mengklasifikasikan semua supplier dan kebutuhan parameter tambahan untuk menangani alternatif yang tidak dapat dibandingkan (incomparable) atau indifferen. Metode yang diusulkan diberi nama GLNF Sorting (Global and Local Search based on Net Flow), yang didasarkan pada property net flow dari metode PROMETHEE dan menggunakan konsep global search dan local search yang umum dalam bidang optimasi. Algoritma ini bekerja dalam beberapa tahap: (1) global search dengan menerapkan PROMETHEE pada seluruh alternatif dan profil pembatas (limiting profiles) untuk mendapatkan klasifikasi awal berdasarkan net flow (ϕ_1), (2) intra-category local search dengan menerapkan PROMETHEE pada alternatif di setiap kategori termasuk profil pembatasnya untuk mendapatkan net flow intra-kategori (ϕ_2), (3) inter-category local search dengan menggabungkan alternatif dari dua kategori berdekatan yang memiliki tanda net flow berbeda dari hasil intra-category search untuk mendapatkan net flow (ϕ_3), dan (4) penentuan klasifikasi akhir berdasarkan hasil ketiga pencarian tersebut. Penelitian ini juga mengembangkan indeks kualitas baru yang disebut SILS (Silhouette for Sorting), yaitu ekstensi dari konsep silhouette dari data mining untuk mengukur kualitas pengelompokan dalam konteks sorting multi-kriteria. SILS didasarkan pada net flow PROMETHEE dan mengukur dissimilaritas suatu alternatif terhadap alternatif di kategorinya sendiri, kategori atas, dan kategori bawah. Nilai SILS berkisar antara -2 hingga

2, dengan nilai mendekati 0 menunjukkan klasifikasi yang baik, sementara nilai mendekati -2 atau 2 mengindikasikan alternatif sebaiknya dipindahkan ke kategori yang berdekatan. Metode GLNF diuji pada dua kasus: (1) data hipotetis supplier evaluation dari artikel PROMSORT (Araz dan Ozkarahan, 2007) dengan 22 supplier dan 4 kategori, dan (2) data riil dari perusahaan manufaktur multinasional dengan 20 supplier dan 4 kategori. Hasil penelitian menunjukkan bahwa GLNF mengklasifikasikan semua supplier tanpa terkecuali, berbeda dengan PROMSORT yang meninggalkan beberapa supplier tidak terklasifikasi. Perbandingan dengan PROMSORT menunjukkan bahwa GLNF menghasilkan kualitas klasifikasi yang sama atau lebih baik berdasarkan indeks Rosenfeld & De Smet (2020) dan indeks SILS yang diusulkan. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa GLNF lebih robust terhadap perubahan parameter preferensi dibanding PROMSORT [105].

Omurbek dkk. (2021) melakukan penelitian dengan tujuan mengelompokkan kota-kota di Turki berdasarkan karakteristik produksi pertanian lokal dan merankingnya dalam hal kinerja dengan menggabungkan cluster analysis dan metode multi-criteria decision-making (MCDM). Penelitian ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan untuk mengidentifikasi kota-kota dengan karakteristik produksi pertanian serupa sehingga dapat bekerja sama lebih efektif dalam pengambilan keputusan dan implementasi, serta untuk menentukan distribusi kinerja produksi pertanian di seluruh negeri. Penelitian ini mengembangkan pendekatan tiga fase. Fase pertama, metode Ward's digunakan untuk mengelompokkan 81 kota di Turki berdasarkan sembilan kriteria produksi pertanian yang dikumpulkan dari database Turkish Statistical Institute (TUIK) periode 2007-2018. Kriteria tersebut meliputi: (C1) jumlah sapi, (C2) nilai hewan hidup, (C3) nilai produksi hewan, (C4) nilai produksi pertanian per kapita, (C5) jumlah kecil ternak, (C6) jumlah produksi sereal dan produk tanaman lainnya, (C7) total area pertanian yang dibudidayakan, (C8) total nilai produksi pertanian, dan (C9) total nilai produksi tanaman. Fase kedua, metode CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation Technique) digunakan untuk menentukan bobot objektif dari kesembilan kriteria tersebut. CRITIC dipilih karena mempertimbangkan korelasi antar kriteria dan standar deviasi, sehingga menghasilkan bobot yang lebih objektif tanpa intervensi subjektif pengambil keputusan. Fase ketiga, metode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) digunakan untuk mengevaluasi dan meranking kinerja masing-masing cluster. Hasil penelitian menunjukkan bahwa 81 kota di Turki terbagi menjadi enam cluster berdasarkan karakteristik produksi pertanian. Cluster 6, yang hanya berisi kota Konya, menjadi cluster dengan kinerja tertinggi ($C_i^+ = 0,8729$). Cluster ini diikuti oleh Cluster 4 (Antalya dan Mersin) dengan nilai $C_i^+ = 0,5435$. Cluster 1

(25 kota) dan Cluster 2 (19 kota) menjadi cluster dengan hasil terendah. Temuan ini mengungkapkan bahwa hanya beberapa kota seperti Konya, Antalya, dan Mersin yang mampu memproduksi lebih banyak dibanding puluhan kota lainnya jika digabungkan. Uji Kruskal Wallis menunjukkan perbedaan signifikan antar cluster untuk semua kriteria kecuali C4 (nilai produksi pertanian per kapita). Penelitian ini menyimpulkan bahwa pemerintah daerah perlu mempertimbangkan kembali program pertanian mereka dan mengembangkan strategi baru di bawah arahan pemerintah pusat. Penulis juga menekankan pentingnya membangun mekanisme strategis dan berkelanjutan untuk menjamin pertumbuhan pertanian, termasuk perencanaan strategis pusat yang sukses, praktik lokal yang disiplin, dan penilaian kinerja [106].

Integrasi Spectral Clustering dan PROMETHEE dalam satu kerangka model memiliki kompatibilitas yang kuat. Spectral Clustering menghasilkan kluster-kluster berdasarkan kemiripan karakteristik data tanpa melibatkan preferensi pengambil keputusan [12]. Hasil clustering ini kemudian menjadi input bagi PROMETHEE yang melakukan perankingan dengan mempertimbangkan preferensi pemangku kepentingan melalui bobot kriteria [15]. Dengan demikian, kedua metode saling melengkapi: Spectral Clustering menangani struktur data yang kompleks secara objektif, sementara PROMETHEE menangani preferensi pengambil keputusan secara fleksibel. Potensi keterbatasan integrasi ini adalah jika hasil clustering tidak mencerminkan kelompok yang bermakna secara manajerial, sehingga perlu dilakukan evaluasi kualitas clustering menggunakan silhouette coefficient sebagaimana direncanakan dalam penelitian ini.

2.6.5 Sintesis dan Posisi Penelitian

Berdasarkan review terhadap penelitian-penelitian terdahulu, dapat disintesis beberapa temuan penting, seperti terlihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Sintesis Penelitian Terdahulu

Aspek	Temuan dari Penelitian Terdahulu	Kesenjangan yang Ditemukan
Objek Penelitian	Alat kesehatan, aset infrastruktur, aset jalan tol	Belum banyak penelitian pada alat kesehatan di RS yang bertransformasi menuju BLU di Indonesia
Metode Clustering	k-Means dominan digunakan untuk alat kesehatan (Zamzam dkk., 2021; Srilekha, 2025)	Penelitian dengan Spectral Clustering pada alat kesehatan masih terbatas dan belum diintegrasikan dengan MCDM
Metode MCDM	AHP (Marciano dkk., 2022; Al Awadh, 2022), TOPSIS (Huang dkk., 2024), dan PROMETHEE (Abonyi dkk., 2022) telah digunakan di berbagai konteks	PROMETHEE dengan visualisasi GAIA belum banyak diterapkan pada konteks pemeliharaan dan manajemen risiko alat kesehatan
Integrasi Clustering-MCDM	Integrasi PROMETHEE dengan fuzzy c-means (Bashir dkk., 2023), PROMETHEE dengan sparse PCA (Abonyi dkk., 2022), Ward's dengan TOPSIS (Omurbek dkk., 2021), dan PROMETHEE dengan global/local search (Barrera dkk., 2023) telah dilakukan	Integrasi Spectral Clustering dan PROMETHEE dalam satu kerangka utuh untuk manajemen risiko aset alat kesehatan belum ditemukan
Konteks Institusi	Rumah sakit umum, industri, infrastruktur	Konteks BLU di rumah sakit pemerintah Indonesia belum banyak dieksplorasi dengan pendekatan kuantitatif integratif

Berdasarkan sintesis pada Tabel 2.1, penelitian ini memilih Spectral Clustering karena keunggulannya dalam menangani struktur data non-linear yang menjadi kelemahan K-Means yang digunakan pada penelitian terdahulu [7], [9]. Penelitian ini memilih PROMETHEE karena kemampuannya menangani kriteria kuantitatif dan kualitatif secara simultan serta menyediakan visualisasi GAIA plane, yang belum banyak diterapkan pada konteks pemeliharaan alat kesehatan [102]. Integrasi kedua metode dipilih karena Spectral Clustering dan PROMETHEE saling melengkapi: Spectral Clustering mengidentifikasi pola struktur data secara objektif, sementara PROMETHEE memproses preferensi pemangku kepentingan secara fleksibel. Hal ini berbeda dengan penelitian Bashir dkk. (2023) dan Barrera dkk. (2023) yang mengintegrasikan PROMETHEE dengan FCM atau global/local search, namun belum diterapkan pada data alat kesehatan [104], [105].

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini mengisi gap pada:

1. Integrasi Metodologis: Menggabungkan Spectral Clustering dan Visual PROMETHEE yang belum pernah dilakukan sebelumnya.
2. Penerapan Algoritmik: Menggunakan Spectral Clustering untuk data alat kesehatan (baru pada data survei) dan Visual PROMETHEE untuk prioritas pemeliharaan.
3. Konteks Spesifik: Rumah Sakit Bhayangkara TK.II Medan sebagai instansi BLU dengan data inventaris 3.390 unit alat kesehatan.

Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi baik secara akademik (pengembangan metodologi integratif) maupun praktis (alat bantu pengambilan keputusan bagi manajemen rumah sakit).

