

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Net Zero Emission* (NZE) dan Pengelolaan Sampah Perkotaan

Laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) menyatakan total emisi GRK antropogenik mencapai 49 GtCO_{2e} per tahun pada 2000–2010, dengan laju peningkatan 1,0 GtCO_{2e} (2,2%) per tahun. Hal ini merupakan emisi GRK tertinggi dalam sejarah peradaban manusia bila dibanding periode 1970–2000 yang hanya 0,4 GtCO_{2e} (1,3%) per tahun (IPCC, 2014). Akumulasi emisi ini meningkatkan konsentrasi GRK di atmosfer, memicu pemanasan global yang cukup signifikan. IPCC, (2023) melaporkan bahwa suhu global telah meningkat 0,85°C sejak 1880 hingga 2012 dan diproyeksikan naik 1,5°C pada tahun 2021–2040. Peningkatan suhu global ini, merupakan ancaman bagi ekosistem, ketahanan pangan, serta kehidupan sosial ekonomi di berbagai belahan dunia.

Menghadapi krisis iklim tersebut, pada tanggal 12 Desember 2015 di Paris, Prancis diadakan *Conference of the Parties* (COP) ke-21, *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) yang menghasilkan Paris Agreement. Paris Agreement 2015 menargetkan pembatasan kenaikan suhu global di bawah 2°C, dengan upaya maksimal menjaga kenaikan tidak lebih dari 1,5°C. Pasal 4.1 dalam perjanjian ini mengusung konsep NZE, yaitu keseimbangan antara emisi antropogenik dan serapan karbon (UNFCCC, 2015). Dalam konteks ini, transisi menuju rendah karbon 2050 menjadi langkah strategis sebelum pencapaian

NZE 2060, yang menuntut transformasi besar-besaran dalam sektor energi, industri, transportasi, serta pengelolaan sampah dan limbah.

Konsep NZE 2060 makin mendapatkan perhatian secara global sebagai target penting dalam upaya mitigasi perubahan iklim. Pencapaian NZE memerlukan pengurangan emisi GRK hingga hampir nol setiap tahunnya, diikuti dengan upaya penyerapan karbon untuk menyeimbangkan sisa emisi yang sulit dieliminasi (Rogelj dkk., 2015). Sejumlah negara, seperti Arab Saudi dan Tiongkok, telah mengembangkan strategi transisi energi dan inovasi teknologi guna mencapai NZE (Al-Sinan, Bubshait & Alamri, 2023; Bian dkk., 2022). Indonesia menargetkan pengurangan emisi sebesar 29-41% pada 2030 melalui peningkatan energi terbarukan dan eksplorasi energi nuklir sebagai bagian dari strategi jangka panjang (Surya Husada & Erar Joesoef, 2022; Arifianto dkk., 2023).

Salah satu sektor yang berkontribusi dalam pencapaian NZE adalah pengelolaan sampah. Sektor ini dapat berperan penting dalam mencapai target netral karbon pada 2050-2060 melalui berbagai strategi mitigasi. Pada negara maju seperti Jepang, untuk mencapai *zero emission* atau bahkan negatif dalam pengelolaan sampah, Jepang melakukan langkah agresif seperti *carbon capture, utilization, & storage* (CCUS) serta konversi biomassa (Yamada, 2022; Yamada dkk., 2023). Zhang dkk., (2022) menyoroti pentingnya klasifikasi sampah dan daur ulang dalam mencapai netralitas karbon di Tiongkok. Sementara itu, di negara berkembang seperti Pakistan dan Indonesia menekankan perlunya peningkatan praktik pengelolaan sampah, yang mencakup penerapan *zero-landfill* dan integrasi ekonomi sirkular (Iqbal dkk., 2022; Zandieh, Thornley & Chong, 2024; Alawiyah

dkk., 2023). Studi lain menunjukkan bahwa digitalisasi dalam sektor daur ulang dapat meningkatkan efisiensi dan keuntungan ekonomi sekaligus mengurangi emisi GRK secara signifikan (Kurniawan dkk., 2022).

Komitmen Indonesia untuk mencapai NZE 2060 memerlukan strategi pengelolaan sampah yang berkelanjutan sebagai bagian dari upaya mitigasi emisi gas GRK. Meskipun kontribusinya lebih kecil dibandingkan sektor energi dan industri, sektor persampahan tetap menjadi sumber utama CH₄ dan CO₂ akibat aktivitas di TPA, pembakaran terbuka, dan pengolahan air limbah (Alawiyah dkk., 2023). Ikhtiar mengatasi dampak ini, berbagai strategi mitigasi telah diusulkan, seperti penerapan konsep *zero-landfill* berbasis 3R (*reduce, reuse, recycle*) secara optimal, peningkatan *recovery* gas dari TPA, serta optimalisasi tingkat daur ulang (Bogner dkk., 2008; Alawiyah dkk., 2023). Selain itu, penerapan prinsip ekonomi sirkular melalui kerangka kerja 9R berpotensi mengurangi konsumsi sumber daya sekaligus menekan emisi secara signifikan (Muljaningsih dkk., 2023). Inovasi di sektor pengolahan air limbah juga mulai mengeksplorasi kondisi *net-zero carbon* melalui optimasi proses dan efisiensi energi (Maktabifard dkk., 2023). Keberhasilan strategi ini sangat bergantung pada intervensi kebijakan yang kuat serta kolaborasi internasional guna mempercepat transisi menuju sistem pengelolaan sampah yang lebih berkelanjutan dan berkontribusi pada pencapaian tujuan pembangunan rendah karbon (Qalbie & Rahmaniah, 2023).

Emisi GRK dari sektor persampahan menyumbang sekitar 3-5% dari total emisi antropogenik global, dengan sumber utama berasal dari metana yang dihasilkan oleh TPA dan pengolahan air limbah (Bogner dkk., 2008; Gautam &

Agrawal, 2021). Negara maju telah berhasil menekan emisi melalui penerapan teknologi pengelolaan sampah yang lebih baik, sementara negara berkembang diperhadapkan pada peningkatan emisi akibat pertumbuhan populasi dan pesatnya urbanisasi (Wünsch & Kocina, 2019; Manuja, Kumar & Pandey, 2018). Berbagai strategi mitigasi telah dikembangkan, yang meliputi pemulihan gas metana dari TPA, peningkatan tingkat daur ulang, pengomposan, dan insinerasi dengan pemanfaatan energi (Bogner dkk., 2008; Mohareb, MacLean & Kennedy, 2011). Selain itu, banyak negara telah memasukkan sektor persampahan dalam NDC, dengan fokus pada pengurangan pembuangan sampah ke TPA dan pemanfaatan energi dari limbah (Powell, Chertow & Esty, 2018). Implementasi prinsip 5R (*refuse, reduce, reuse, recycle, recovery*) serta pemilahan sampah di sumber menjadi langkah kunci dalam upaya mengurangi emisi dan menjaga kelestarian lingkungan (Gautam & Agrawal, 2021; Kittipongvises & Polprasert, 2016).

Ekonomi sirkular teridentifikasi sebagai pendekatan yang dapat mendukung target NZE dengan mengurangi emisi gas rumah kaca baik dari sektor energi maupun non-energi (Khalifa dkk., 2022). Implementasi Ekonomi sirkular yang efektif terbukti meningkatkan kualitas lingkungan dengan menekan emisi CO₂ dan mengurangi konsumsi sumber daya alam (Hailemariam & Erdiaw-Kwasie, 2023). Keberhasilan penerapan ekonomi sirkular dipengaruhi oleh kebijakan pemerintah, kesadaran konsumen, insentif ekonomi, dan inovasi teknologi (Kumar, Gupta & Ur Rehman, 2023). Sektor konstruksi, yang menyumbang 39% emisi karbon global, diprediksi mendapat manfaat besar dari penerapan ES (Mishra & Yu, 2021). Dalam industri plastik, kombinasi daur ulang, pemrosesan biomassa, dan reduksi kimia

CO₂ berpotensi menghilangkan emisi secara keseluruhan (Meys dkk., 2021). Namun, tantangan seperti keterbatasan teknologi dan stagnasi kebijakan masih menjadi hambatan utama (Mujtaba dkk., 2024). Oleh karena itu, mengatasi hambatan ini membutuhkan kolaborasi lintas sektor, dukungan kebijakan yang kuat, serta inovasi berkelanjutan dalam integrasi prinsip ES di seluruh sektor industri dan ekonomi (Yang dkk., 2022; Royle & Gibson, 2023).

Kompleksitas urbanisasi, keterbatasan infrastruktur, rendahnya kesadaran masyarakat, dan pola konsumsi merupakan tantangan dalam pengelolaan sampah di negara berkembang (Guerrero, Maas & Hogland, 2013; Kumar & Agrawal, 2020). Analisis SWOT telah digunakan untuk mengevaluasi sistem pengelolaan sampah dan mengidentifikasi strategi perbaikannya di berbagai konteks, seperti di Bujumbura, Gurugram, dan Bogotá (Fridolin Nzambimana, El Zerey & Zerey-Belaskri, 2021; Chauhan & Sandeep, 2023; Pardo Martínez & Piña, 2017). Hambatan utama yang dihadapi antara lain kurangnya *monitoring*, intervensi politik, korupsi, serta keterbatasan anggaran (Mukwevho, Radzuma & Roos, 2024). Oleh karena itu, integrasi sektor formal dan informal melalui asosiasi daur ulang menjadi salah satu solusi potensial untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan sampah sekaligus memperbaiki kesejahteraan pelaku di sektor ini (Pardo Martínez & Piña, 2017). Keberhasilan strategi di negara berkembang membutuhkan pendekatan berbasis sistem adaptif yang mempertimbangkan karakteristik lokal dan kompleksitas sosial-ekonomi (Marshall & Farahbakhsh, 2013). Menurut Rosell, (2011), pedoman perencanaan strategis berbasis SWOT dapat membantu

pemerintah daerah mengatasi tantangan ini dan memastikan kepatuhan terhadap regulasi yang berlaku.

Dalam konteks transisi menuju NZE, pendekatan konvensional dalam pengelolaan sampah semakin dianggap kurang efektif. Konsep *waste to resource* yang berbasis ekonomi sirkular telah berkembang sebagai pendekatan inovatif untuk meminimalkan emisi melalui optimalisasi daur ulang dan pemanfaatan kembali sumber daya yang ada. Konsep ini menekankan bahwa limbah bukan hanya sekedar masalah lingkungan, tetapi juga merupakan sumber daya potensial untuk ekonomi hijau (Viglioglia dkk., 2021). Integrasi pendekatan ekonomi sirkular dengan kebijakan dekarbonisasi dan inovasi teknologi, seperti penggunaan AI dalam pengelolaan sampah, berpotensi menciptakan sistem pengelolaan yang lebih efisien dan berkelanjutan (Ghisellini, Cialani & Ulgiati, 2016). Melalui pendekatan tersebut, negara berkembang seperti Indonesia dapat mempercepat upaya mitigasi perubahan iklim serta mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan secara lebih efektif.

Salah satu kota di Indonesia yang menghadapi tantangan dalam penerapan praktik berkelanjutan dan pengurangan emisi GRK di sektor persampahan adalah Kota Kendari. Kota ini menargetkan penanganan 73,30% sampah perkotaan melalui perbaikan sistem pengumpulan dan pengelolaan (Sudirman & Phradiansah, 2019; Apriyanti, Hikmawati & Jaya, 2019). Upaya yang dilakukan mencakup penerapan konsep 3R (Yaqub dkk., 2022) serta eksplorasi teknologi *waste to energy* untuk mengurangi ketergantungan pada TPA Puuwatu yang menjadi sumber utama emisi (Chaerul, Dirgantara & Akib, 2016). Dalam upaya mencapai NZE, strategi

seperti insinerasi berbasis energi dan peningkatan daur ulang dapat dipertimbangkan (Yuliani dkk., 2022; Putri Damayanti, Waluyo & Candrakirana, 2023). Penerapan konsep *smart city* dan otomatisasi dalam pengelolaan sampah juga berpotensi mempercepat pencapaian target reduksi emisi (Bramantya, Untari & Mawarti, 2024). Selain itu, menurut Indriyani dkk., (2022) analisis jejak karbon serta inisiatif penanaman pohon dilakukan sebagai langkah kompensasi emisi di tingkat lokal.

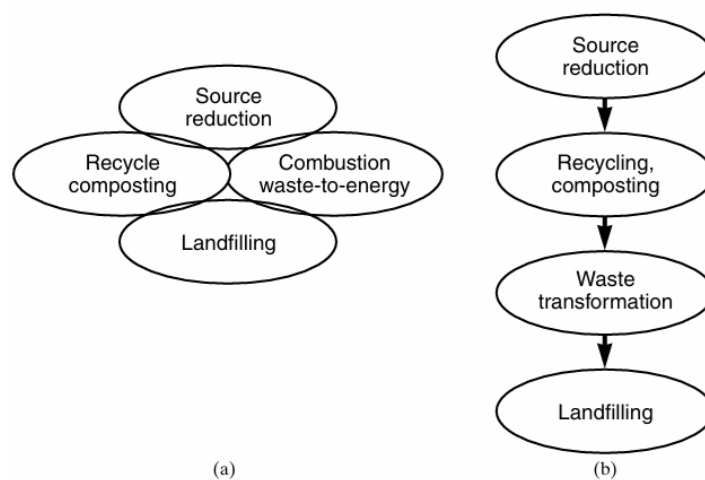
NZE 2060 menuntut strategi mitigasi emisi GRK yang sistematis, dimana sektor persampahan berperan dalam menekan emisi CH₄ dan CO₂ melalui *zero-landfill*, ekonomi sirkular, dan teknologi WtE. Optimalisasi pengelolaan TPA, pemulihan gas metana, serta digitalisasi daur ulang menjadi langkah kunci dalam transisi ini. Namun, negara berkembang menghadapi tantangan yang berupa pesatnya urbanisasi, kurangnya infrastruktur, rendahnya kesadaran masyarakat, dan pola konsumsi sehingga strategi berbasis sistem adaptif diperlukan untuk efektivitas implementasi. Kota Kendari sebagai studi kasus menunjukkan urgensi otomatisasi pengelolaan sampah, pendekatan berbasis karbon guna mengurangi ketergantungan pada TPA dan meningkatkan efisiensi daur ulang. Melalui kombinasi inovasi teknologi, kebijakan berbasis insentif, dan kolaborasi lintas sektor, sektor persampahan dapat menjadi elemen strategis dalam pencapaian NZE 2060 secara berkelanjutan.

2.2 Pengelolaan Sampah Terpadu (*Integrated Solid Waste Management*)

Konsep *Integrated Waste Management* (IWM) menurut Tchobanoglous (2002) dan US EPA menekankan penerapan serangkaian strategi terpadu untuk mencapai tujuan pengelolaan sampah secara berkelanjutan melalui pemilihan teknologi dan program yang sesuai. Pendekatan ini didasarkan pada empat opsi utama, yaitu pengurangan di sumber (*source reduction*), daur ulang dan pengomposan (*recycling and composting*), pembakaran dengan pemulihan energi (*waste-to-energy combustion*), dan penimbunan akhir (*landfilling*). Pendekatan IWM ini bersifat interaktif dan hierarkis. Pendekatan interaktif menekankan keterkaitan dinamis antara berbagai strategi pengelolaan *source reduction*, *recycling and composting*, *waste-to-energy combustion*, dan *landfilling* yang saling melengkapi dalam mencapai efisiensi lingkungan dan ekonomi secara keseluruhan. Sementara itu, pendekatan hierarkis merupakan opsi pengelolaan secara berurutan berdasarkan prioritas keberlanjutan, dimana pengurangan sampah pada sumber menjadi langkah pertama, diikuti oleh daur ulang dan pemanfaatan kembali, kemudian transformasi energi, dan terakhir penimbunan akhir. Hierarki ini merefleksikan prinsip pengelolaan yang berorientasi pada pencegahan dan minimalisasi limbah, memastikan bahwa setiap opsi diterapkan setelah potensi reduksi dan pemanfaatan sumber daya telah dimaksimalkan.

Pendekatan IWM merepresentasikan pergeseran paradigma dari sistem linear menuju sistem pengelolaan yang terintegrasi dan berorientasi sumber daya, dimana sampah diperlakukan sebagai sumberdaya yang dapat dimanfaatkan kembali (Awino dkk., 2023; Arya dkk., 2025). Sejalan dengan prinsip ekonomi

sirkular, IWM berkontribusi dalam memaksimalkan daur ulang material, meminimalkan pembuangan ke TPA, serta mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDG), khususnya SDG 11 tentang kota dan permukiman berkelanjutan serta SDG 12 tentang konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab (Schroeder dkk, 2019). Pendekatan interaktif dan pendekatan hierarkis dalam IWM digunakan untuk menggambarkan struktur operasional dan hubungan fungsional yang menjadi dasar analisis dalam penelitian ini yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 berikut.

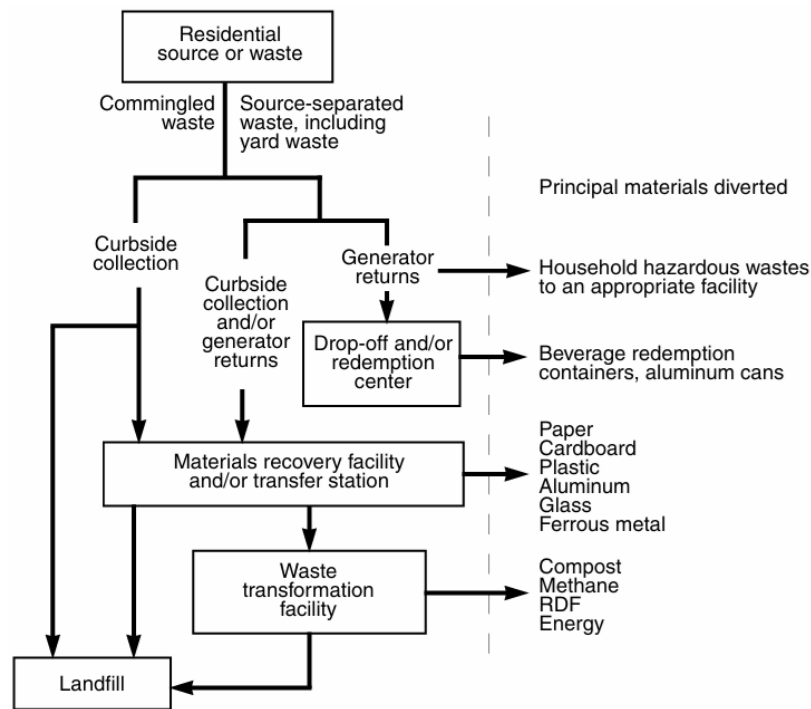


Gambar 2.1 Sistem Pengelolaan Sampah Terpadu: (a) bersifat interaktif, dan (b) bersifat hierarkis (Sumber: Tchobanoglous, dkk., 2002)

Implementasi IWM mencakup evaluasi biaya, keberterimaan sosial, serta kontrol emisi untuk memastikan perlindungan lingkungan dan kesehatan masyarakat, dengan teknologi modern seperti *landfill gas recovery* dan sistem pengontrolan pencemar yang ketat. Dalam konteks pengelolaan sampah rumah tangga penerapan *Integrated Waste Management* (IWM) memiliki alur yang sistematis. Alur sistem pengelolaan sampah terpadu tingkat rumah tangga (*residential integrated waste management*) yang menekankan keterpaduan antara

pemilahan sumber, pengumpulan, pemrosesan, dan pembuangan akhir. Aliran dimulai dari sumber domestik yang menghasilkan sampah campuran (*commingled waste*) dan sampah terpilah (*source-separated waste*), kemudian dikumpulkan melalui sistem pengumpulan tepi jalan (*curbside collection*) atau dikembalikan oleh penghasil sampah (*generator returns*). Sampah terpilah dapat dialirkan ke pusat penukaran atau pengumpulan (*drop-off/redeem center*) untuk material bernilai seperti kertas, logam, kaca, dan plastik, sedangkan bahan organik diolah menjadi kompos, gas metana, atau *Refuse-Derived Fuel* (RDF) melalui fasilitas transformasi sampah (*waste transformation facility*). Sementara itu, residu yang tidak dapat dimanfaatkan dialirkan ke TPA (*landfill*). Hal ini menegaskan prinsip hierarki dalam *Integrated Solid Waste Management* (IWM) dimana prioritas diberikan pada pengurangan, pemanfaatan kembali, dan daur ulang sebelum pembuangan akhir, guna meminimalkan timbulan sampah dan emisi gas rumah kaca. Alur pengelolaan sampah pemukiman secara terpadu ditunjukkan pada Gambar 2.2.

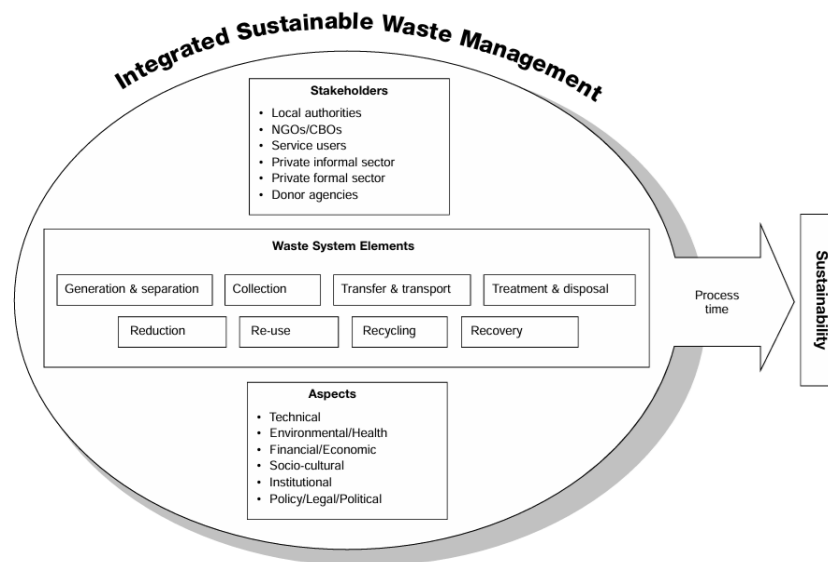
SEKOLAH PASCASARJANA



Gambar 2.2 Diagram Alir Pengelolaan Sampah Permukiman Secara Terpadu
(Sumber: Tchobanoglous dkk., 2002)

Dalam upaya memahami, merencanakan, dan menerapkan sistem pengelolaan sampah secara holistik, terpadu, dan berkelanjutan maka dikembangkan kerangka konseptual model *Integrated Sustainable Waste Management* (ISWM). Model ini menekankan keterpaduan antara tiga komponen utama, yaitu pemangku kepentingan (*stakeholders*), elemen sistem pengelolaan sampah (*waste system elements*), dan aspek keberlanjutan (*aspects*) yang mencakup dimensi teknis, lingkungan, ekonomi, sosial, kelembagaan, serta kebijakan dan hukum. Pemangku kepentingan mencakup pemerintah setempat, lembaga swadaya masyarakat, sektor formal dan informal, pengguna layanan, serta lembaga donor yang berperan dalam seluruh tahapan sistem. Elemen sistem mencakup proses dari pembangkitan dan pemilahan, pengumpulan, pemindahan, pengangkutan, hingga

pengolahan dan pembuangan akhir, yang terintegrasi dengan upaya reduksi, penggunaan kembali, daur ulang, dan pemulihan sumber daya. Setiap elemen dianalisis melalui dimensi teknis, lingkungan, ekonomi, sosial-budaya, kelembagaan, serta kebijakan-politik untuk memastikan efektivitas dan keberlanjutan proses pengelolaan. Pendekatan ini menegaskan bahwa keberlanjutan pengelolaan sampah hanya dapat dicapai melalui interaksi dinamis antara dimensi teknis dan sosial yang berlangsung secara berkesinambungan sepanjang waktu. Model ISWM ditunjukkan pada Gambar 2.3.

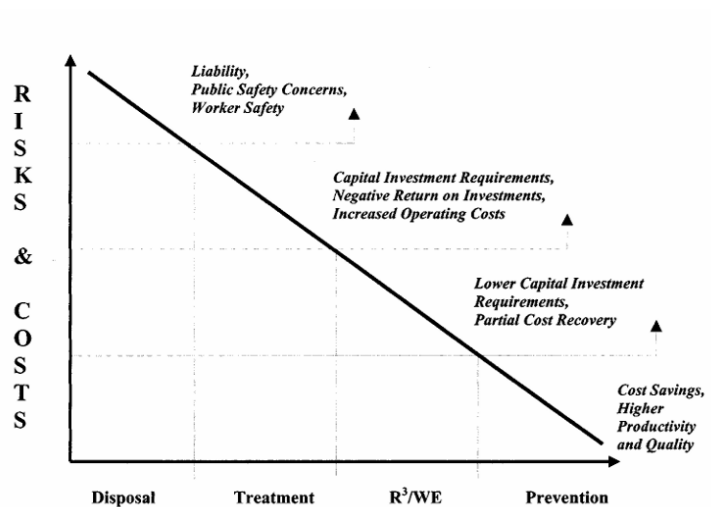


Gambar 2.3 Model *Integrated Sustainable Waste Management* (ISWM)
(Sumber: Anschutz dkk. , 2004)

Pendekatan hierarkis dalam pengelolaan sampah menempatkan upaya pencegahan dan pengurangan timbulan sebagai prioritas utama dibandingkan dengan penanganan di hilir seperti pengolahan dan pembuangan. Perspektif ini menunjukkan pergeseran paradigma dari *end-of-pipe management* menuju *preventive waste management*, dimana pengendalian limbah dilakukan sejak tahap awal produksi atau konsumsi untuk meminimalkan dampak lingkungan dan beban

ekonomi. Dalam konteks tersebut, efektivitas pengelolaan sampah diukur tidak hanya dari kemampuan teknis dalam menangani residu, tetapi juga dari sejauh mana sistem mampu mengurangi risiko dan biaya secara simultan melalui penerapan prinsip efisiensi sumber daya dan ekonomi sirkular. Risiko dan biaya dengan pendekatan pengelolaan limbah yang bergerak dari pembuangan (*disposal*) menuju pencegahan (*prevention*) memiliki hubungan terbalik. Semakin tinggi posisi dalam hierarki pengelolaan limbah dari pembuangan, pengolahan (*treatment*), daur ulang dan pemulihan energi (R³/WE), hingga pencegahan semakin rendah risiko lingkungan, kesehatan, dan keselamatan kerja, serta semakin efisien secara ekonomi. Pada tahap pembuangan, risiko tanggung jawab hukum dan keselamatan publik relatif tinggi, sedangkan kebutuhan investasi besar dan pengembalian modal rendah terjadi pada tahap pengolahan. Daur ulang dan pemulihan energi menawarkan sebagian pemulihan biaya dengan investasi yang lebih rendah, sementara pencegahan menghasilkan penghematan biaya, peningkatan produktivitas, dan mutu yang lebih tinggi. Secara konseptual, diagram ini menegaskan bahwa strategi pencegahan dan pengurangan timbulan sampah di hulu lebih efektif dalam menekan risiko dan biaya jangka panjang dibandingkan pendekatan pengelolaan di hilir. Risiko dan biaya dalam pengelolaan sampah disajikan pada Gambar 2.4.

SEKOLAH PASCASARJANA



Gambar 2.4 Hirarki Resiko dan biaya dalam pengelolaan sampah
(Sumber: Cheremisinoff, 2003)

Integrated Sustainable Waste Management (ISWM) semakin berkembang seiring dengan kemajuan inovasi teknologi yang mendorong efisiensi pengolahan sampah serta peningkatan pemulihan sumber daya secara ramah lingkungan. Berbagai teknologi kunci telah diterapkan, termasuk komposting, biogas, RDF, insinerator ramah lingkungan, dan teknologi BSF yang terbukti efektif dalam mengurangi beban sampah organik (Farooq dkk., 2021). Transformasi digital melalui pemanfaatan IoT, GIS, dan sistem pendukung keputusan semakin memperkuat perencanaan pengelolaan sampah berbasis data (Akram dkk., 2021).

2.3 Timbulan, Kuantitas, dan Karakteristik Persampahan Perkotaan

Timbulan sampah perkotaan dipengaruhi oleh berbagai faktor sosial-ekonomi seperti tingkat pendapatan, pertumbuhan penduduk, dan urbanisasi (Karak, Bhagat & Bhattacharyya, 2012; Liu dkk., 2019). Negara maju umumnya menghasilkan lebih banyak sampah per kapita dibandingkan negara berkembang karena pola

konsumsi yang lebih tinggi dan gaya hidup yang lebih konsumtif (Beede, D.N., Bloom, 1995; Huang dkk., 2021). Selain itu, ketimpangan pendapatan juga mempengaruhi pola timbulan sampah, dimana daerah berpendapatan tinggi cenderung menghasilkan lebih banyak sampah non-organik, sedangkan daerah berpendapatan rendah lebih banyak menghasilkan sampah organik (Vieira & Matheus, 2018).

Faktor lain yang turut menentukan jumlah dan karakteristik sampah meliputi tingkat pendidikan, ukuran rumah tangga, konsumsi energi, serta perkembangan infrastruktur perkotaan (Liu & Wu, 2011; Alzamora & Barros, 2020). Kompleksitas hubungan antara faktor-faktor ini menekankan perlunya pendekatan berbasis data dalam perencanaan pengelolaan sampah yang efektif, terutama di wilayah yang mengalami urbanisasi yang pesat (Torrente-Velásquez dkk., 2020). Pada konteks ini, strategi pengelolaan sampah yang berkelanjutan harus mempertimbangkan aspek sosial-ekonomi dan karakteristik regional untuk menghasilkan kebijakan yang adaptif dan berbasis bukti ilmiah (Liu dkk., 2019; Alzamora & Barros, 2020). Selain itu, peningkatan pengetahuan, sikap, dan dukungan keluarga juga berperan penting dalam mendorong perilaku pemanfaatan sampah yang lebih berkelanjutan (Febriandi dkk., 2020).

Besarnya timbulan sampah perkotaan merupakan aspek penting dalam perencanaan sistem pengelolaan sampah yang efektif. Dalam praktiknya, metode tradisional seperti analisis berat-volume, keseimbangan material, dan perhitungan muatan masih banyak digunakan. Namun, teknik yang lebih modern seperti model statistik, analisis deret waktu, dan *artificial neural network* (ANN) semakin

dikembangkan untuk meningkatkan akurasi prediksi timbulan sampah (Donevska, 2020; Johnson dkk., 2017). Negara maju cenderung menghasilkan lebih banyak sampah per kapita dibandingkan negara berkembang, dengan limbah makanan sebagai komponen utama yang terus meningkat, seperti yang terjadi di China (Karak, Bhagat & Bhattacharyya, 2012; Gu dkk., 2017). Terkait dengan hal ini, karakterisasi sampah yang akurat dan kuantifikasi berbasis sumber sangat penting untuk optimalisasi perencanaan serta pengalokasian sumber daya dalam sistem pengelolaan sampah (Mbande, 2003; Gawaikar & Deshpande, 2006). Pengumpulan data yang komprehensif, mencakup aspek sosial-ekonomi dan lingkungan, dapat meningkatkan akurasi model prediksi pengelolaan sampah serta mendukung pengambilan keputusan yang lebih tepat dalam pengelolaannya (Johnson dkk., 2017; He dkk., 2022).

Komposisi sampah perkotaan sangat dipengaruhi oleh lokasi geografis, faktor sosial-ekonomi, serta perubahan musiman (Zhu dkk., 2023; Adeleke dkk., 2021; Agrawal dkk., 2013). Wilayah berpendapatan tinggi cenderung menghasilkan lebih banyak sampah yang dapat didaur ulang, sedangkan daerah berpendapatan rendah lebih banyak menghasilkan sampah organik (Tambe dkk., 2016; Nguyen dkk., 2020). Urbanisasi dan pertumbuhan penduduk tidak hanya meningkatkan volume dan kompleksitas sampah tetapi juga menambah tantangan dalam pengelolaannya (Vergara & Tchobanoglous, 2012). Sistem pengelolaan sampah yang kurang optimal berisiko menimbulkan dampak lingkungan dan kesehatan (Omole & Alakinde, 2013). Untuk itu, karakterisasi sampah menjadi langkah penting dalam menentukan strategi pengelolaan yang efektif, seperti daur ulang, pengomposan,

dan pemanfaatan energi dari sampah (Al-Jarallah & Aleisa, 2014). Komponen sampah meliputi bahan organik, kertas, plastik, kaca, dan tekstil, dengan proporsi yang bervariasi antar sektor dan wilayah (Al-Jarallah & Aleisa, 2014; Tambe dkk., 2016). Pemahaman yang mendalam terhadap variasi komposisi sampah ini sangat penting bagi pembuat kebijakan dan pengelola sampah untuk menerapkan solusi berkelanjutan serta mendorong ekonomi sirkular (Zhu dkk., 2021; Nguyen dkk., 2020).

Meningkatnya timbulan sampah, keterbatasan infrastruktur, dan kendala finansial merupakan hambatan kompleks dalam pengelolaan sampah di negara berkembang (Garcia, 2015). Praktik *open dumping*, sistem pengumpulan yang tidak efisien, serta rendahnya pemilahan sampah dari sumber memperburuk kondisi lingkungan dan meningkatkan resiko emisi gas rumah kaca (Zohoori & Ghani, 2017). Keberadaan sektor informal berperan penting dalam mendukung kegiatan daur ulang, namun keberadaannya sering kali belum terintegrasi secara formal (Ezeah, Fazakerley & Roberts, 2013). Kondisi serupa terjadi diberbagai kota di Indonesia, termasuk Kota Kendari dimana tantangan teknis, kelembagaan dan sosial ekonomi menjadi penghambat utama menuju sistem pengelolaan sampah yang berkelanjutan dan rendah karbon.

Dalam mengatasi permasalahan ini, *integrated sustainable waste management* (ISWM) telah muncul sebagai pendekatan kompherensif, untuk mengubah sampah menjadi sumber daya bernilai, sekaligus memperhatikan dimensi lingkungan, ekonomi, dan sosial (Arya & Shukla, 2025). Kerangka ISWM mencakup berbagai integrasi berbagai dimensi seperti teknologi informasi,

infrastruktur operasional, tata kelola, ekonomi, serta aspek sosial-budaya, dan keterlibatan yang lebih luas dari para pemangku kepentingan (Wirani dkk., 2024). Selain itu Kota Kendari dapat mengadopsi ekonomi sirkular, teknologi WtE serta integrasi sektor informal untuk menjadi solusi potensial untuk meningkatkan pengelolaan sampah dan mengurangi emisi karbon (Bartl, 2015; Zhang dkk., 2024; Ezeah, Fazakerley & Roberts, 2013). Pendekatan berbasis data yang mengintegrasikan aspek sosial, ekonomi, dan teknologi diperlukan agar strategi mitigasi berbasis pemulihan sumber daya dapat mendukung pencapaian NZE 2060.

2.4 Pengelolaan Sampah Perkotaan

Salah satu konsep global yang berkembang dalam pengelolaan sampah adalah *zero waste*, yang menekankan upaya pencegahan, pengurangan, penggunaan kembali, dan daur ulang sebagai strategi berkelanjutan (Sutisna, 2024). Di samping itu, inisiatif *smart city* yang mengintegrasikan *Internet of Things* (IoT) dan teknologi komunikasi informasi terbukti mampu meningkatkan efisiensi operasional pengelolaan sampah perkotaan (Szpilko dkk., 2023; Manik dkk., 2024). Selain pendekatan teknologi, perguruan tinggi dan mahasiswa berperan penting dalam meningkatkan kesadaran masyarakat serta mendorong partisipasi komunitas dalam praktik pengelolaan sampah (Sasono, 2024). Implementasi kebijakan yang efektif, disertai penguatan aspek sosial dan ekonomi, menjadi faktor kunci dalam mempercepat kematangan sistem pengelolaan sampah perkotaan di Indonesia (Lodan dkk., 2022).

Sampah perkotaan mencakup limbah yang dihasilkan dari aktivitas domestik, komersial, dan konstruksi, yang dikelola oleh pemerintah kota (Karak, Bhagat &

Bhattacharyya, 2012). Komposisinya terdiri atas material organik, anorganik, dan residu yang membutuhkan pendekatan pengelolaan berkelanjutan (El-Haggar & Samaha, 2022). Dalam konteks ini, hierarki 3R, ekonomi sirkular, dan *zero waste* merupakan strategi utama untuk menekan timbulan sampah dan memaksimalkan pemulihan sumber daya (Ali dkk., 2021; Khatiwada dkk., 2021; Sondh dkk., 2024). Keberhasilan penerapan strategi tersebut menuntut sinergi antara pemerintah, sektor swasta, dan masyarakat guna menekan dampak lingkungan akibat aktivitas perkotaan (Napitupulu & Muhyidin, 2021).

Pendekatan modern dalam pengelolaan sampah telah mencakup pemilahan dari sumber, daur ulang, pengomposan, teknologi *waste-to-energy* (WtE), dan penggunaan *landfill* sebagai opsi terakhir (Kollikkathara, Feng & Stern, 2009). Kerangka ekonomi sirkular berpotensi mentransformasi sistem pengelolaan sampah linier menjadi sistem yang lebih berkelanjutan, mendukung transisi menuju kota rendah karbon dan minim limbah (Khatiwada dkk., 2021). Namun, di Indonesia, pengelolaan sampah masih menghadapi tantangan signifikan, seperti keterbatasan fasilitas pengumpulan, transportasi, dan pengolahan, serta kapasitas TPA yang rendah (Fatimah dkk., 2020; Damanhuri, 2008; Marshall & Farahbakhsh, 2013). Sebagian besar wilayah masih bergantung pada praktik *open dumping*, dengan tingkat pengangkutan sampah hanya sekitar 60–70% dari total timbulan (Wikurendra, Abdeljawad & Nagy, 2023; Gutama & Iresha, 2023). Kondisi ini berbeda dengan negara maju seperti Korea Selatan yang telah menerapkan *sanitary landfill* secara menyeluruh (Kusumaningrum dkk., 2020).

Upaya mengatasi permasalahan tersebut, penerapan ekonomi sirkular, teknologi Industri 4.0, dan kebijakan WtE menjadi alternatif yang semakin banyak dikaji (Fatimah dkk., 2020; Azis dkk., 2022; Manik, 2024). Upaya peningkatan pengelolaan juga memerlukan strategi holistik yang mencakup edukasi publik, penguatan infrastruktur, serta peningkatan partisipasi komunitas (Dhokhikah & Trihadiningrum, 2012; Mustafia & Sukmana, 2024). Pendekatan ini sejalan dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) yang menekankan keseimbangan aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan dalam sistem pengelolaan sampah.

Dari sisi regulasi, Indonesia telah memiliki dasar hukum melalui Undang-Undang No. 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah. Namun, efektivitas implementasinya masih bervariasi di berbagai daerah (Simamora & Junuudhizbulloh, 2023). Tantangan utama meliputi ketiadaan standar teknis yang spesifik, kondisi TPA yang tidak memenuhi syarat, serta rendahnya kesadaran publik terhadap pengelolaan berkelanjutan (Fadzoli, Subekti & Waluyo, 2023). Selain itu, lemahnya penerapan prinsip tanggung jawab produsen memperburuk ketidakpastian hukum (Hardi, Senastri & Wiryani, 2024). Untuk memperkuat sistem, Indonesia dapat mencontoh kebijakan WtE di Uni Eropa, mengintegrasikan sektor informal, dan mengembangkan teknologi pengolahan yang efisien (Azis dkk., 2022).

Sektor informal, yang melibatkan pemulung dan pengepul, memainkan peran penting dalam rantai daur ulang di negara berkembang (Masood & Barlow, 2013; Oguntoyinbo, 2012). Selain berkontribusi pada konservasi sumber daya dan penguatan ekonomi sirkular, sektor ini turut membantu pengentasan kemiskinan

(Morais dkk., 2022). Namun, keterbatasan akses terhadap jaminan sosial, kondisi kerja yang tidak layak, dan stigma sosial masih menjadi tantangan utama (Yang dkk., 2018). Oleh karena itu, integrasi sektor informal ke dalam sistem resmi merupakan langkah strategis untuk meningkatkan kesejahteraan pekerja sekaligus memperkuat efektivitas daur ulang (Silva de Souza Lima & Mancini, 2017; Paul dkk., 2012).

Peningkatan urbanisasi di Indonesia berkontribusi signifikan terhadap meningkatnya volume sampah (Fatimah dkk., 2020). Berbagai teknologi seperti WtE, komposting, dan *anaerobic digestion* telah dikaji sebagai solusi untuk mengurangi beban TPA (Romianingsih, 2023; Farahdiba dkk., 2023). Di sisi lain, digitalisasi berperan dalam meningkatkan efisiensi sistem, sebagaimana ditunjukkan melalui aplikasi JAKI di Jakarta (Baharuddin & Tjenreng, 2025) dan sistem manajemen sampah pintar (Manik dkk., 2024; Fatimah dkk., 2020). Meskipun demikian, penerapan teknologi WtE masih terkendala oleh tingginya kadar air dalam sampah dan rendahnya tingkat pemilahan (Romianingsih, 2023). Teknologi *anaerobic digestion* dinilai potensial untuk kawasan padat seperti Jabodetabek dalam mengolah sampah organik menjadi energi terbarukan.

Dalam konteks dekarbonisasi, Indonesia dapat belajar dari negara lain yang berhasil menerapkan digitalisasi ekonomi sirkular (Kurniawan dkk., 2024). Kombinasi pendekatan *top-down* dan *bottom-up*, seperti di Uni Eropa, terbukti efektif dalam memperkuat kebijakan pengelolaan sampah (Azis dkk., 2022). Keberhasilan pengelolaan sampah berkelanjutan pada akhirnya memerlukan

integrasi teknologi, digitalisasi, dan kebijakan yang komprehensif guna meningkatkan efisiensi dan menekan dampak lingkungan.

Pengalaman negara maju seperti Jepang, Swedia, dan Jerman menunjukkan bahwa keberhasilan strategi pengelolaan sampah sangat ditentukan oleh kolaborasi multi-pemangku kepentingan, regulasi yang kuat, serta penerapan *Integrated Sustainable Waste Management* (ISWM) (Zurbrügg dkk., 2012; Rahman dkk., 2020). Di Indonesia, Surabaya menjadi contoh kota yang berhasil menurunkan timbulan sampah hingga 20% melalui penerapan ISWM berbasis pemilahan, komposting, dan partisipasi masyarakat (Premakumara dkk., 2018). Beberapa kota lain seperti Pontianak dan wilayah kepulauan juga mulai mengadopsi pendekatan serupa, meskipun masih menghadapi kendala implementasi (Rahman dkk., 2020; Rahmania dkk., 2021). Selain itu, pembelajaran dari Korea Selatan menunjukkan pentingnya penguatan kelembagaan, pendanaan, dan regulasi, disertai peningkatan partisipasi publik (Hendra, 2016). Pendekatan *zero waste* seperti yang diterapkan di Canberra dan Stockholm dapat diadaptasi untuk menekan timbulan sampah dan meningkatkan efisiensi daur ulang (Sutisna, 2024). Lebih jauh, pengembangan teknologi WtE dan pengelolaan limbah konstruksi sebagaimana diterapkan di negara maju berpotensi memperkuat sistem nasional (Azis dkk., 2022; Fitri, Hatmoko & Hermawan, 2019). Melalui adopsi praktik terbaik global yang disesuaikan dengan konteks lokal, efektivitas pengelolaan sampah di Indonesia dapat terus ditingkatkan.

Kota Kendari, sebagai salah satu contoh kota menengah di Indonesia, menghadapi tantangan signifikan berupa ketimpangan antara timbulan sampah dan

kapasitas pengelolaan (Apriyanti, Hikmawati & Jaya, 2019). Rendahnya kesadaran masyarakat, keterbatasan pendanaan, dan minimnya sumber daya manusia turut menurunkan efektivitas sistem (Apriyanti, Hikmawati & Jaya, 2019; Sudirman & Phradiansah, 2019). Walaupun cakupan pelayanan telah mencapai 73,30% (Sudirman & Phradiansah, 2019), partisipasi masyarakat masih dominan dalam bentuk kontribusi finansial daripada keterlibatan langsung (Algiffari, Rianse & Sidu, 2021). Untuk meningkatkan efektivitasnya, diperlukan strategi berbasis penguatan kapasitas sumber daya manusia, perubahan perilaku, serta pemahaman sosial-ekonomi dan budaya masyarakat pesisir (Wahyuni, 2021).

Secara keseluruhan, pengelolaan sampah di Indonesia masih didominasi oleh praktik *open dumping* dan keterbatasan infrastruktur. Pendekatan ekonomi sirkular, *zero waste*, dan digitalisasi berbasis *smart city* menawarkan solusi inovatif dan efisien. Sektor informal tetap menjadi aktor penting, namun perlu dukungan kebijakan dan perlindungan sosial. Pembelajaran dari Jepang, Korea Selatan, dan Surabaya menunjukkan bahwa regulasi kuat, kolaborasi lintas sektor, dan partisipasi publik merupakan elemen krusial bagi keberhasilan sistem berkelanjutan. Kota Kendari, yang merefleksikan tantangan nasional, perlu mengadopsi pendekatan berbasis data, kolaboratif, dan partisipatif untuk mendukung transisi menuju kota rendah karbon dan pencapaian *Net Zero Emission* 2060.

2.5 Pengelolaan Sampah Perkotaan dan Penerapan Konsep 3R (*Reduce, Reuse and Recycle*) Skala Rumah Tangga

Pengelolaan sampah skala rumah tangga melalui konsep 3R memiliki peran penting dalam upaya pengurangan limbah padat. Program berbasis komunitas, seperti bank sampah dan TPS3R, terbukti efektif dalam mengurangi timbunan sampah serta meningkatkan kualitas lingkungan (Putri dkk., 2020; Sukadaryati & Andini, 2022). Selain manfaat ekologis, inisiatif ini juga memberikan dampak ekonomi positif bagi masyarakat melalui sistem insentif berbasis sampah (Kholil & Amaningsih Jumhur, 2018; Nuraini dkk., 2023). Namun, efektivitas program ini bervariasi antar daerah, bergantung pada tingkat partisipasi masyarakat, ketersediaan infrastruktur, serta dukungan regulasi yang memadai (Putri dkk., 2020; Ramadhani & Iskandar, 2022).

Prinsip 3R merupakan pendekatan berkelanjutan dalam pengelolaan sampah yang bertujuan meminimalkan timbulan sampah serta dampak lingkungan (Hamid dkk., 2024). Implementasi konsep ini di tingkat rumah tangga mencakup penggunaan kembali material, pemanfaatan wadah bekas, serta daur ulang material seperti botol plastik (Ridayati & Yunastiawan, 2022; Apriyani, Susilo & Habibi, 2021). Negara maju telah berhasil menerapkan praktik 3R, sehingga mampu mengurangi pembuangan sampah ke TPA hingga 1%, sementara negara berkembang masih menghadapi tantangan akibat keterbatasan teknologi, lemahnya regulasi, serta rendahnya kesadaran masyarakat (Rahmah, Koestoer & Yusuf, 2024). Oleh sebab itu, edukasi dan keterlibatan komunitas menjadi elemen kunci dalam meningkatkan efektivitas penerapan prinsip 3R (Rahmi dkk., 2024).

Bank sampah sebagai inisiatif berbasis komunitas mendorong pemilahan sampah, daur ulang, serta peningkatan kesadaran lingkungan (Widiyanto & Rahab, 2017; Luqman Hakim & Hidayati, 2023). Model operasionalnya melibatkan pengumpulan, pemrosesan, dan daur ulang sampah menjadi produk bernilai ekonomi (Hakim & Hidayati, 2023). Selain mengurangi timbunan sampah di TPA, bank sampah juga memiliki dampak ekonomi yang signifikan, seperti peningkatan pendapatan dan pemberdayaan masyarakat lokal (Wulandari, Utomo & Narmaditya, 2017; Febrian dkk., 2024). Namun, keberlanjutan program ini masih menghadapi tantangan, termasuk partisipasi masyarakat yang fluktuatif, pemasaran produk daur ulang, serta kesinambungan operasional (Suardi dkk., 2018; Ismiraj dkk., 2023). Dukungan dari berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah dan organisasi non-profit, sangat diperlukan untuk mengatasi kendala ini (Jaya & Machdum, 2022; Budiarto, Clarke & Ross, 2024).

TPS3R merupakan fasilitas pengolahan sampah berbasis komunitas yang bertujuan mengurangi beban TPA melalui pemilahan, pengolahan, dan daur ulang sampah di tingkat lokal (Putri dkk., 2020). Meskipun sistem ini berpotensi dalam mengurangi sampah, efektivitasnya masih bervariasi antar daerah, dengan sebagian besar wilayah belum mencapai target nasional pengurangan sampah sebesar 30%. Indikator keberhasilan TPS3R meliputi optimalisasi pemilahan sampah, pemrosesan yang efektif, serta manajemen yang aktif (Saleh & Sururi, 2024). Namun, keterbatasan pendanaan, kendala operasional, dan rendahnya partisipasi masyarakat menjadi hambatan utama (Oktaviani & Asyiwati, 2013; Wahyuningsih dkk., 2021). Inovasi teknologi, seperti mesin pencacah sampah organik dan alat

pengomposan, telah diterapkan untuk meningkatkan efisiensi TPS3R (Suryawan, 2022). Beberapa daerah bahkan berhasil mencapai pengurangan sampah hingga 63%, menunjukkan potensi besar sistem ini dalam mendukung pengelolaan sampah berkelanjutan (Sakti, 2022).

Dalam hal pengurangan timbulan sampah, pemulung memainkan peran penting dalam sektor daur ulang informal, terutama dalam mendukung ekonomi sirkular dan pengentasan kemiskinan di negara berkembang (Morais dkk., 2022); (Gutberlet & Careno, 2020). Kontribusi mereka dalam mengurangi timbunan sampah dan meningkatkan tingkat daur ulang sangat signifikan. Namun, pemulung sering menghadapi tantangan, seperti kondisi kerja yang tidak layak, risiko kesehatan, serta stigma sosial (Oguntoyinbo, 2012; Barford & Ahmad, 2021). Pandemi COVID-19 semakin memperburuk kondisi ekonomi mereka, menyoroti kerentanan sektor informal dalam sistem pengelolaan sampah (Hartmann, Hegel & Boampong, 2022). Oleh sebab itu, integrasi pemulung ke dalam sistem pengelolaan sampah formal menjadi langkah strategis untuk meningkatkan kesejahteraan mereka sekaligus memperkuat efisiensi pemulihan sumber daya (Velis, 2017).

Sinergi antara konsep 3R, bank sampah, TPS3R, dan sektor informal, seperti pemulung, memiliki peran penting dalam membangun sistem pengelolaan sampah berbasis komunitas yang efektif. TPS3R berfungsi sebagai fasilitas pengolahan sampah yang menerapkan konsep 3R untuk mengurangi timbunan sampah dan meningkatkan praktik daur ulang (Ramadhani & Iskandar, 2022). Sementara itu, bank sampah berperan dalam edukasi masyarakat mengenai pemilahan dan daur ulang sampah, sekaligus memberikan manfaat ekonomi bagi partisipan (Sabela

dkk., 2022). Keberhasilan implementasi sistem ini bergantung pada partisipasi aktif masyarakat, ketersediaan infrastruktur yang memadai, serta dukungan regulasi yang jelas (Rahmadhani, Aziz & Indah, 2024). Oleh karena itu, pengakuan terhadap peran pemulung sebagai aktor utama dalam ekonomi sirkular serta penerapan kebijakan inklusif menjadi langkah strategis dalam mewujudkan sistem pengelolaan sampah yang lebih berkelanjutan dan berkeadilan sosial (Gutberlet dkk., 2017).

Implementasi konsep 3R di tingkat rumah tangga di Kota Kendari masih terbatas akibat rendahnya kesadaran masyarakat dan minimnya fasilitas pendukung (Apriyanti, Hikmawati & Jaya, 2019; Ismail, Yasnani & Nurmaladewi, 2022). Upaya perbaikan dilakukan melalui inisiatif berbasis komunitas dan penerapan hukum lingkungan (Kasmir, Yaqub & Djaoe, 2022; Sudirman & Phradiansah, 2019). Bank sampah diperkenalkan sebagai strategi rekayasa sosial untuk mendorong pemilahan dan daur ulang sampah. Namun, keterbatasan pendanaan, sumber daya manusia yang belum memadai, serta rendahnya partisipasi publik masih menjadi kendala dalam penerapan sistem pengelolaan sampah yang terintegrasi (Apriyanti, Hikmawati & Jaya, 2019). Menurut Natalia, Wihardja & Ningsih, (2021), optimalisasi infrastruktur, edukasi masyarakat, dan keterlibatan aktif pemerintah menjadi langkah strategis dalam meningkatkan efektivitas pengelolaan sampah di Kota Kendari.

Konsep 3R berperan penting dalam mengurangi limbah padat, dengan inisiatif berbasis komunitas seperti bank sampah dan TPS3R terbukti efektif secara ekologis dan ekonomi. Namun, efektivitasnya masih bervariasi karena faktor

partisipasi masyarakat, infrastruktur, dan. Negara maju telah berhasil mengoptimalkan 3R, sementara negara berkembang masih menghadapi keterbatasan teknologi dan kesadaran publik. Bank sampah mendorong daur ulang berbasis ekonomi sirkular, tetapi masih bergantung pada dukungan pemerintah dan organisasi non-profit. Sementara itu, TPS3R mampu mengurangi beban TPA hingga 63%, meskipun terkendala pendanaan dan partisipasi masyarakat. Pemulung turut berkontribusi dalam ekonomi sirkular, tetapi menghadapi tantangan sosial dan ekonomi yang membutuhkan integrasi ke dalam sistem formal. Kota Kendari yang merefleksikan tantangan umum pengelolaan sampah di Indonesia, di mana minimnya infrastruktur dan rendahnya kesadaran masyarakat menghambat efektivitas 3R, sehingga diperlukan sinergi kebijakan, edukasi publik, serta dukungan pemerintah untuk sistem pengelolaan sampah yang berkelanjutan.

2.6 Pengelolaan Sampah Perkotaan dan Potensi Emisi Gas Rumah Kaca

Produksi sampah perkotaan terus meningkat secara global, terutama di negara berkembang seperti Indonesia, dan menjadi kontributor signifikan terhadap emisi GRK (Purwanta, 2009; Sekarsari, Kristanto & Dahlan, 2023). TPA menjadi sumber utama emisi metana akibat degradasi sampah organik, dengan proyeksi menunjukkan peningkatan signifikan dalam beberapa tahun ke depan (Kristanto & Koven, 2019). Dalam upaya menekan emisi, berbagai strategi telah dikaji, seperti pengomposan, pengolahan anaerobik, insinerasi, serta penerapan prinsip 3R (Sekarsari, Kristanto & Dahlan, 2023; Alawiyah dkk., 2023). Melalui berbagai metode yang tersedia, pendekatan berbasis 3R dan daur ulang terbukti lebih efektif

dibandingkan metode lain dalam menekan emisi GRK, sementara pengomposan menghasilkan emisi lebih rendah dibandingkan penimbunan di TPA (Sunarto, Purwanto & Hadi, 2017; Lou & Nair, 2009). Oleh karena itu, penerapan sistem pengelolaan sampah berkelanjutan melalui pemilahan dari sumber, teknologi pengolahan lanjut, serta pemanfaatan gas metana dari TPA menjadi langkah strategis dalam mitigasi emisi GRK (Gautam & Agrawal, 2021; Friedrich & Trois, 2013).

Dalam konteks mitigasi, insinerasi dengan pemulihan energi dapat mengurangi emisi dengan menggantikan penggunaan energi fosil dalam jaringan listrik (Liu, Sun & Liu, 2017; Wang & Nakakubo, 2020). Sementara itu, pengomposan dan pengolahan anaerobik memiliki potensi pengurangan emisi, meskipun masih tetap menghasilkan GRK dalam prosesnya (Liu, Sun & Liu, 2017; Tayyeba, Olsson & Brandt, 2011). Agar dapat memahami dampak berbagai metode pengelolaan sampah terhadap emisi, beberapa model perhitungan telah dikembangkan, seperti pedoman IPCC dan model EPA WARM (Mohareb, MacLean & Kennedy, 2011). Namun, keterbatasan data dan kapasitas teknis masih menjadi kendala utama dalam pelaporan emisi di negara berkembang (Friedrich & Trois, 2013). Oleh karena itu, strategi mitigasi yang efektif harus mencakup pemanfaatan gas metana dari TPA, pemilahan sampah dari sumbernya, serta penerapan prinsip 5R (*refuse, reduce, reuse, recycle, recovery*) untuk meminimalkan dampak lingkungan (Ngnikam dkk., 2002; Gautam & Agrawal, 2021). Melalui penerapan sistem pengelolaan sampah yang lebih berkelanjutan,

emisi GRK dapat ditekan secara signifikan, sejalan dengan target mitigasi perubahan iklim global.

Perhitungan emisi GRK dari sektor persampahan umumnya menggunakan Model IPCC 2006 dengan pendekatan *first order decay* (FOD) untuk mengestimasi emisi metana berdasarkan komposisi sampah, iklim, dan kondisi TPA. Model ini merupakan penyempurnaan dari metode sebelumnya dengan mempertimbangkan berbagai jenis pembuangan sampah dan karakteristik wilayah tertentu. Penerapannya telah dilakukan di berbagai negara, seperti Panama, Tiongkok, dan Korea Selatan, guna mengestimasi potensi emisi metana secara lebih akurat (Peng dkk., 2016; Park dkk., 2014). Parameter utama dalam model ini adalah potensi pembentukan metana (L_0) dan konstanta laju pembentukan metana (k), yang bervariasi antarwilayah (Ishii & Furuichi, 2013; Park dkk., 2014). Meskipun model ini telah menjadi standar dalam perhitungan emisi, ketidakpastian tetap ada akibat variabilitas parameter dan keterbatasan validasi lapangan (Amini, Reinhart & Niskanen, 2013). Oleh sebab itu, model ini tetap menjadi alat penting dalam perhitungan emisi sektor persampahan serta sebagai dasar pengambilan kebijakan mitigasi perubahan iklim (Kalantarifard & Yang, 2011).

Negara berkembang memiliki keterbatasan infrastruktur, dominasi sektor informal, dan regulasi yang belum optimal dalam pengelolaan sampah (Mmereki, Baldwin & Li, 2016; Friedrich & Trois, 2011). Sistem pengelolaan yang masih mengandalkan pembuangan terbuka dan *landfill* konvensional menyebabkan emisi GRK yang lebih tinggi dibandingkan negara maju (Wünsch & Kocina, 2019). Sebaliknya, negara maju telah menerapkan teknologi rendah emisi seperti *waste-*

to-energy dan pemanfaatan gas *landfill* untuk energi (Niyati, 2015). Karakteristik sampah di negara berkembang yang didominasi oleh limbah organik menjadikan metode pengolahan biologis lebih sesuai dibandingkan teknologi termal (Aleluia & Ferrão, 2016). Namun, proyek *waste-to-energy* tetap memiliki potensi dalam mengatasi permasalahan sampah sekaligus memenuhi kebutuhan energi (Miito & Banadda, 2016; Roy dkk., 2022). Oleh karena itu, pendekatan sistem yang mempertimbangkan konteks lokal, faktor sosial-ekonomi, serta aspek budaya diperlukan untuk meningkatkan pengelolaan sampah secara berkelanjutan (Marshall & Farahbakhsh, 2013). Selain itu, peningkatan daur ulang dan integrasi sektor informal ke dalam sistem pengelolaan resmi dapat berkontribusi dalam pengurangan emisi serta peningkatan efisiensi pengelolaan sampah di negara berkembang (Niyati, 2015).

Sektor informal, khususnya pemulung, memainkan peran penting dalam sistem daur ulang dan pengurangan sampah yang berakhir di TPA. Kontribusi mereka terhadap keberlanjutan lingkungan dan konservasi sumber daya sangat signifikan, dengan tingkat daur ulang yang dapat mencapai 20–50% (Wilson dkk., 2009; Oguntoyinbo, 2012). Namun, sektor ini menghadapi berbagai tantangan, seperti stigma sosial, risiko kesehatan, serta kurangnya pengakuan dan perlindungan hukum (Ezeah, Fazakerley & Roberts, 2013; Yang dkk., 2018). Integrasi sektor informal ke dalam sistem pengelolaan sampah formal dapat meningkatkan efisiensi pengelolaan limbah serta memberikan manfaat sosial dan ekonomi bagi para pekerjanya (Godfrey, 2021; Labra Cataldo dkk., 2024). Agar tercapai integrasi ini, diperlukan kebijakan yang mendukung, pembentukan

koperasi, kemitraan dengan sektor swasta, peningkatan keterampilan, serta perlindungan hukum bagi pekerja informal (Ezeah, Fazakerley & Roberts, 2013). Dalam transisi menuju ekonomi sirkular, pengakuan dan pemberdayaan sektor informal menjadi penting dalam menciptakan sistem pengelolaan sampah yang lebih berkelanjutan di negara berkembang.

Teknologi WtE menjadi solusi potensial dalam mengurangi emisi metana dari TPA sekaligus memenuhi kebutuhan energi dan meningkatkan efisiensi pengelolaan sampah (Kumar & Samadder, 2017). Strategi mitigasi metana yang efektif mencakup pemulihan gas sejak dini dan pengurangan limbah organik sebelum dibuang ke TPA (Scharff dkk., 2023). Penerapan *sanitary landfill* dengan sistem pemulihan gas memiliki potensi besar dalam menghasilkan bioenergi yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan (Wedaa dkk., 2021). Teknologi *refuse-derived fuel* (RDF) terbukti mampu mengurangi volume sampah yang berakhir di TPA serta menekan emisi karbon dari sektor persampahan (Tayler dkk., 2013). Adanya berbagai pilihan teknologi seperti insinerasi, pirolisis, gasifikasi, dan pencernaan anaerob, negara berkembang dapat mengadopsi strategi yang paling sesuai dengan kondisi lokal (Alao, Popoola & Ayodele, 2022). Keberlanjutan ekonomi dari fasilitas WtE bergantung pada kebijakan emisi GRK serta faktor teknis yang mendukung efisiensi proses (Townsend & Webber, 2012). Untuk itulah, analisis sistem energi menunjukkan bahwa biogas dan gasifikasi termal memiliki potensi lebih besar sebagai alternatif terhadap insinerasi dalam pengelolaan sampah yang lebih ramah lingkungan.

Pengelolaan sampah perkotaan di Kota Kendari berkontribusi signifikan terhadap emisi GRK, terutama dari aktivitas *landfill* sebagai sumber utama yang menghasilkan sekitar 50.010 ton CO₂ ekuivalen per tahun, diikuti oleh pembakaran sampah dan komposting (Chaerul, Dirgantara & Akib, 2016). Produksi metana dari TPA Puuwatu diperkirakan mencapai puncaknya pada 14.400 Mg per tahun pada 2027 (Sumarlin, Purwanto & Syafrudin, 2023), dengan produksi harian metana dari sampah organik mencapai 15.360,31 m³ (Gunawan dkk., 2020). Namun, ruang terbuka hijau di Kota Kendari masih terbatas untuk menyerap emisi CO₂ yang dihasilkan (Hasddin dkk., 2022). Secara nasional, emisi metana dari sektor persampahan Indonesia diperkirakan meningkat pesat hingga mencapai 1.065 Gg pada 2025 (Purwanta, 2009). Oleh karena itu, strategi mitigasi yang mencakup pengurangan timbulan sampah, peningkatan operasional *landfill*, serta penerapan konsep 3R menjadi langkah krusial dalam menekan emisi GRK dari sektor persampahan (Chaerul, Dirgantara & Akib, 2016; Yaman, Anil & Alagha, 2020).

Produksi sampah perkotaan yang meningkat di negara berkembang, termasuk Indonesia, menjadi sumber utama emisi GRK, terutama dari TPA yang menghasilkan metana dalam jumlah besar. Strategi mitigasi seperti prinsip 3R dan daur ulang terbukti paling efektif dibandingkan insinerasi atau pengomposan, meskipun WtE tetap berpotensi menekan emisi sekaligus menghasilkan energi terbarukan. Tantangan utama pengelolaan sampah di negara berkembang meliputi keterbatasan infrastruktur, pendataan emisi yang kurang, serta dominasi sektor informal, yang jika diintegrasikan ke dalam sistem resmi dapat meningkatkan efisiensi daur ulang. Kota Kendari menghadapi tantangan serupa, dengan emisi

metana dari TPA Puuwatu yang terus meningkat dan ruang terbuka hijau yang terbatas, sehingga optimalisasi *landfill* dan penerapan 3R menjadi langkah penting menuju rendah karbon 2050 dan NZE 2060.

2.7 Model Mitigasi Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Persampahan Berkelanjutan Melalui Analisis SWOT

Sektor persampahan berkontribusi sekitar 3-5% terhadap total emisi gas rumah kaca global, terutama melalui pelepasan metana dari TPA dan pengolahan air limbah (Bogner dkk., 2008; Zandieh, Thornley & Chong, 2024). Meskipun proporsinya relatif kecil dibandingkan dengan sektor lain, peningkatan sistem pengelolaan sampah dapat memberikan dampak signifikan terhadap mitigasi perubahan iklim (Wilson dkk., 2024). Banyak negara telah memasukkan strategi mitigasi sektor persampahan dalam NDC, dengan fokus pada pengurangan sampah ke TPA serta pemanfaatan energi dari limbah (Powell, Chertow & Esty, 2018). Namun, negara berkembang masih menghadapi tantangan dalam pengumpulan dan pengolahan sampah, sementara negara maju semakin agresif mengadopsi teknologi canggih seperti penangkapan karbon dan konversi biomassa untuk menekan emisi sektor ini (Manuja, Kumar & Pandey, 2018; Yamada dkk., 2023). Untuk mencapai target rendah karbon 2050 dan NZE 2060, sektor persampahan perlu menerapkan perubahan teknis dan perilaku secara sistematis dan cepat (Hoy dkk., 2023). Pendekatan berbasis alam (*Nature-Based Solutions*) dan ekonomi sirkular menjadi strategi utama yang tidak hanya mengurangi emisi tetapi juga memberikan manfaat ekologis dan ekonomi, terutama bagi negara berkembang (Iqbal dkk., 2024).

Dalam konteks mitigasi emisi GRK dari sektor persampahan, analisis SWOT menjadi alat penting dalam mengevaluasi strategi yang diterapkan. Studi menunjukkan bahwa penerapan metode daur ulang, pengomposan, dan pengolahan anaerob secara signifikan lebih efektif dalam mengurangi emisi GRK dibandingkan dengan metode *landfill* (Michel Devadoss dkk., 2021; Budihardjo dkk., 2023). Analisis SWOT memungkinkan identifikasi kekuatan, kelemahan, peluang, dan ancaman dalam sistem pengelolaan sampah, sehingga menghasilkan strategi mitigasi yang lebih optimal (Samadi Khadem, Ojaghi Aghchekani & Fataei, 2022; Eheliyagoda, 2016). Analisis SWOT memungkinkan evaluasi komprehensif terhadap faktor internal (kekuatan dan kelemahan) serta faktor eksternal (peluang dan ancaman) yang memengaruhi sistem pengelolaan sampah. Melalui identifikasi tersebut, strategi mitigasi dapat dirancang secara lebih terarah, dengan memaksimalkan potensi yang ada dan meminimalkan risiko operasional maupun kebijakan. Pendekatan ini memastikan bahwa intervensi yang dihasilkan bersifat adaptif, kontekstual, dan berorientasi pada peningkatan efektivitas pengelolaan sampah secara berkelanjutan.

Berbagai teknik pengelolaan limbah yang lebih maju, seperti pemulihan gas *landfill*, pemilihan metode pengolahan alternatif, memiliki potensi besar dalam menekan emisi GRK (Bogner dkk., 2008). Selain itu, integrasi sektor informal, adopsi teknologi pencernaan anaerob, serta penyusunan regulasi yang lebih jelas menjadi langkah penting dalam meningkatkan efektivitas pengelolaan sampah dan pengurangan emisi (Michel Devadoss dkk., 2021). Dalam upaya kuantifikasi emisi dan evaluasi skenario mitigasi, model IPCC dan *SWM-GHG calculator* dapat

dimanfaatkan (Berisha & Osmanaj, 2021; Xiao, Dong, Geng, Francisco, dkk., 2020).

Landfilling dan *open burning* merupakan sumber utama emisi gas rumah kaca, terutama CH₄ dan CO₂ (Zaman dkk., 2024; Doorn & Barlaz, 1995). Emisi ini terjadi akibat dekomposisi anaerobik limbah organik TPA serta pembakaran sampah di ruang terbuka (Sanci & Panarello, 2015; Gautam & Agrawal, 2021). Selain CH₄ dan CO₂, *landfillgass* (LFG) juga mengandung senyawa volatil organik dan senyawa sulfur dengan konsentrasi yang bervariasi tergantung pada komposisi limbah serta tahap dekomposisi (Duan dkk., 2020). Untuk mengukur emisi dari *landfill* dan tempat pembuangan sampah terbuka, berbagai metode seperti model empiris dan pengukuran lapangan dapat digunakan (Rafiq dkk., 2018); (Huang dkk., 2021). Penerapan strategi pengelolaan limbah yang lebih baik, seperti pemilahan limbah dan teknologi pengolahan lanjutan, berpotensi mengurangi emisi gas rumah kaca secara signifikan dari sektor ini (Zaman dkk., 2024; Gautam & Agrawal, 2021).

Strategi mitigasi yang efektif dalam menurunkan emisi GRK dari pengelolaan sampah perkotaan mencakup pendekatan ekonomi sirkular serta teknologi WtE. Strategi ekonomi sirkular, seperti pengurangan, penggunaan kembali, dan daur ulang sampah, merupakan pendekatan paling berkelanjutan dalam menekan emisi (Burley Farr dkk., 2023). Sementara itu, teknologi WtE seperti insinerasi dengan pemulihan energi dan pencernaan anaerob terbukti mampu mengurangi emisi GRK secara signifikan dibandingkan dengan metode pembuangan di TPA (Chen & Liu, 2021; Yaman, Anil & Alagha, 2020). Pemulihan gas metana dari TPA juga

memiliki potensi mitigasi besar jika diterapkan secara optimal (Bogner dkk., 2008). Selain itu, daur ulang material, khususnya logam dan kertas, tidak hanya berkontribusi terhadap pengurangan emisi tetapi juga meningkatkan efisiensi penggunaan energi (Chen, 2016). Efektivitas strategi ini bergantung pada efisiensi proses daur ulang, jarak transportasi, serta pemanfaatan akhir dari material yang dipulihkan (Gallego-Schmid dkk., 2020). Oleh sebab itu, kombinasi pendekatan yang terintegrasi, termasuk pemisahan sampah dari sumber, pemanfaatan gas TPA, dan optimalisasi sistem daur ulang, menjadi kunci dalam menekan emisi GRK dari sektor pengelolaan sampah (Xiao dkk., 2021).

Perencanaan strategis menjadi aspek krusial dalam mencapai target rendah karbon 2050 dan NZE 2060 melalui pengelolaan sampah yang berkelanjutan. Analisis SWOT telah digunakan secara luas untuk mengidentifikasi strategi yang tepat dalam pengelolaan sampah perkotaan (Budihardjo dkk., 2023b; Michel Devadoss dkk., 2021). Pendekatan yang efektif mencakup peningkatan tingkat daur ulang, pemilahan sampah dari sumber, serta pemanfaatan gas metana dari *landfill* sebagai energi alternatif (Xiao, dkk., 2020; Michel Devadoss dkk., 2021). Studi kasus di Tiongkok dan Indonesia menunjukkan bahwa pertumbuhan ekonomi dan peningkatan populasi menjadi faktor utama peningkatan emisi, sementara intensitas timbulan sampah serta struktur pengelolaannya dapat dimanfaatkan sebagai peluang dalam mitigasi emisi (Alawiyah dkk., 2023). Oleh sebab itu, peralihan menuju prinsip ekonomi sirkular dalam pengelolaan sampah menjadi keharusan dalam pencapaian target NZE.

Analisis SWOT merupakan perangkat strategis yang digunakan secara luas dalam pengambilan keputusan untuk mengevaluasi kekuatan (*strengths*), kelemahan (*weaknesses*), peluang (*opportunities*), dan ancaman (*threats*) dalam suatu sistem atau organisasi (Alptekin, 2013; Silva dkk., 2013). Meskipun SWOT memberikan dasar yang kuat dalam perumusan strategi, pendekatan ini memiliki keterbatasan dalam aspek pengukuran kuantitatif. Untuk mengatasi kelemahan tersebut, berbagai penelitian telah mengkombinasikan SWOT dengan metode analitis lainnya, seperti *technique for order of preference by similarity to ideal solution* (TOPSIS) dan *analytic hierarchy process* (AHP), guna meningkatkan efektivitas dalam perencanaan strategis (Alptekin, 2013; Kangas dkk., 2001). Namun jika penelitian tidak mengintegrasikan pendekatan kuantitatif, rasionalitas tetap dapat dijaga dengan memastikan proses identifikasi dan penilaian faktor SWOT dilakukan secara sistematis, berbasis data empiris, dan melibatkan pemangku kepentingan yang relevan. Validitas dapat diperkuat melalui triangulasi data, seperti membandingkan hasil observasi lapangan, wawancara, dan dokumen kebijakan (Carter, 2014). Oleh karena itu, meskipun bersifat kualitatif, analisis tetap logis, transparan, dan mampu memberikan dasar argumentatif yang kuat bagi perumusan strategi mitigasi.

Dalam konteks kebijakan lingkungan, analisis SWOT telah diterapkan dalam berbagai studi, seperti evaluasi strategi mitigasi emisi gas rumah kaca (Kongklaew, Phoungthong & Techato, 2021), adopsi kendaraan listrik di Thailand (Kongklaew dkk., 2021), serta strategi pemanfaatan gas alam di Turki (Genç dkk., 2018). Penerapan SWOT dalam berbagai sektor ini menunjukkan fleksibilitasnya dalam

mendukung pengambilan keputusan strategis, termasuk dalam kebijakan mitigasi perubahan iklim dan pengelolaan lingkungan. Dalam bidang pengelolaan sampah, analisis SWOT telah digunakan untuk mengevaluasi dan mengoptimalkan strategi di berbagai negara. SWOT digunakan untuk mengidentifikasi strategi terbaik dalam pengelolaan sampah perkotaan dengan menyoroti kebutuhan untuk mengurangi kelemahan internal dan ancaman eksternal di Meshgin Shahr, Iran, (Samadi Khadem, Ojaghi Aghchekani & Fataei, 2022). Penerapan serupa ditemukan di Venezuela (Rosell, 2011), Sri Lanka (Eheliyagoda, 2016), dan Bogotá, Kolombia; (Pardo Martínez & Piña, 2017), dimana analisis ini berkontribusi dalam penyusunan pedoman perencanaan serta integrasi sektor daur ulang informal. Sementara itu, di Kamerun, SWOT digunakan untuk mengkaji potensi kebijakan pengelolaan limbah plastik serta peluang dalam meningkatkan praktik daur ulang (Ngeh, Tembo & Walde, 2024).

Dalam penerapannya di Indonesia, pendekatan SWOT dikombinasikan dengan metode *quantitative strategic planning matrix* (QSPM) guna merancang strategi mitigasi emisi gas rumah kaca dari pengelolaan sampah perkotaan (Budihardjo dkk., 2023). Sementara di Qatar, SWOT *analysis* diterapkan untuk mengevaluasi praktik pengelolaan limbah konstruksi dan pembongkaran, yang menghasilkan rekomendasi strategi perbaikan yang lebih efektif (Abulebdah & Musharavati, 2016). Studi-studi ini menunjukkan bahwa SWOT dapat menjadi alat yang kuat dalam perencanaan strategis berbasis bukti untuk pengelolaan sampah yang berkelanjutan.

Lebih luas lagi, kerangka analisis SWOT telah diterapkan dalam perencanaan strategi mitigasi emisi guna mencapai target rendah karbon dan NZE di berbagai negara dan sektor. Studi terdahulu telah meneliti penerapan *co-firing* biomassa di Indonesia (Rahmanta & Cahyo, 2024), pembangunan pembangkit listrik tenaga nuklir (Rahmanta dkk., 2023), serta penggunaan instrumen keuangan di negara maju sebagai langkah transisi menuju ekonomi rendah karbon (Hu, Zhang & Wei, 2022). Selain itu, peran kecerdasan buatan dalam mendukung keberlanjutan lingkungan juga telah dieksplorasi sebagai bagian dari strategi mitigasi emisi (Greif dkk., 2024). Studi lain menyoroti analisis strategi transisi energi di Tiongkok (Jiao dkk., 2021) serta pengembangan ekonomi hidrogen di negara-negara *Gulf Cooperation Council* (GCC), (Khan & Al-Ghamdi, 2023), yang menunjukkan pentingnya pendekatan berbasis SWOT dalam perencanaan dekarbonisasi. Evaluasi menyeluruh terhadap faktor pendorong dan hambatan pengembangan energi terbarukan di berbagai negara semakin menegaskan relevansi SWOT dalam merumuskan kebijakan energi yang efektif (Madurai Elavarasan dkk., 2020). Pendekatan multi-kriteria juga telah diterapkan untuk menentukan jalur dekarbonisasi, seperti yang terlihat dalam studi di Kolombia (Diaz & Cilinskis, 2019).

Sebagai alat analisis strategis, SWOT banyak digunakan dalam penelitian lingkungan untuk mengidentifikasi faktor internal dan eksternal yang memengaruhi efektivitas kebijakan dan sistem pengelolaan sumber daya. Pendekatan ini memungkinkan perumusan strategi yang adaptif dan kontekstual dalam menghadapi dinamika sosial, ekonomi, serta teknologi yang memengaruhi sistem

pengelolaan sampah. Studi di berbagai negara menunjukkan bahwa SWOT telah diterapkan dalam strategi pengelolaan sampah, kebijakan energi, dan transisi menuju rendah karbon, termasuk di Indonesia. Melalui integrasi teknologi dan strategi berbasis SWOT, sektor persampahan berpotensi menjadi elemen kunci dalam pencapaian target rendah karbon 2050 dan NZE 2060.



SEKOLAH PASCASARJANA