

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Terdahulu

Studi kasus dari Thailand memberikan wawasan penting mengenai kelayakan ekonomi proyek WtE. Penelitian yang dilakukan oleh [4] menganalisis kelayakan untuk pembangkit berbasis *Refuse-Derived Fuel* (RDF) di Lampang, Thailand. Studi ini menunjukkan bahwa pada berbagai skala kapasitas, mulai dari 5,1 MW hingga 12,8 MW, proyek tersebut menunjukkan kelayakan ekonomi yang menarik dengan hasil *Net Present Value* (NPV) positif, serta *Benefit-Cost Ratio* (BCR) dan *Internal Rate of Return* (IRR) yang tinggi dalam periode proyek 10 tahun. Temuan ini menggarisbawahi bahwa dengan adanya pra-pengolahan sampah menjadi RDF, sebuah proses yang secara efektif meningkatkan nilai kalor dan homogenitas bahan bakar, di mana proyek WtE dapat mencapai tingkat profitabilitas yang menjanjikan.

Studi yang lebih baru oleh [5] di Thailand mengkaji berbagai teknologi WtE dan menemukan bahwa digesti anaerobik memiliki kelayakan ekonomi tertinggi dengan NPV sebesar THB 20.805, BCR 2,51, dan IRR 20%. Sebaliknya, insinerasi, meskipun terbukti bermanfaat bagi lingkungan, dinilai kurang menguntungkan secara ekonomi karena biaya modal dan operasional yang lebih tinggi.

Di Malaysia, studi tekno-ekonomi juga menunjukkan hasil yang positif. Elwan & Habibudin [6] mengevaluasi proyek WtE berbasis gasifikasi yang terhubung ke jaringan listrik dan menemukan kelayakan finansial yang kuat. Hasil analisis mereka menunjukkan NPV sebesar USD 11,1 juta dan *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) sebesar 0,43 USD/kWh, yang secara kompetitif lebih rendah dari harga listrik jaringan setempat (0,7 USD/kWh). Studi ini tidak hanya membuktikan viabilitas ekonomi tetapi juga menyoroti manfaat lingkungan yang signifikan, seperti potensi pengurangan emisi karbon dioksida dan volume sampah yang dikirim ke TPA.

PLTSA Benowo di Surabaya sering disebut sebagai proyek percontohan paling sukses di Indonesia. Penelitian oleh Mudofir et al [7] menyoroti kinerja finansial proyek yang sangat baik, dengan proyeksi IRR sebesar 25,32% dan periode pengembalian investasi (*Payback Period*/PBP) kurang dari 4 tahun. Keberhasilan ini tidak terlepas dari

komitmen kuat pemerintah daerah yang didukung oleh kerangka regulasi dan finansial dari pemerintah pusat. PLTSa Benowo menjadi bukti bahwa dengan dukungan kelembagaan yang solid, proyek WtE dapat menjadi solusi yang layak secara teknis dan menguntungkan secara finansial di Indonesia [8]

Di sisi lain, PLTSa Merah Putih di Bantargebang, Bekasi, yang merupakan fasilitas percontohan nasional pertama dengan teknologi *Moving Grate Incinerator* (MGI), memberikan pelajaran teknis yang berharga. Sebuah studi tahun 2025 yang menganalisis operasional plant berkapasitas 100 ton/hari ini secara eksplisit mengidentifikasi "kadar air sampah yang tinggi dan sampah yang tidak disortir" sebagai tantangan utama implementasi WtE di Indonesia. Studi ini menegaskan bahwa fasilitas pra-perlakuan melalui pengeringan dan penyortiran menjadi sebuah keharusan mutlak, bukan sekadar pilihan, untuk mencapai operasi yang efisien [9].

Studi kelayakan untuk Pekanbaru oleh Novendra [10] untuk TPA Muara Fajar, Pekanbaru, menghasilkan analisis finansial yang sangat positif, dengan total investasi sekitar Rp 9 Miliar, NPV positif sebesar Rp 10,2 Miliar, PBP 10,5 tahun, dan IRR yang sangat tinggi sebesar 28,5%. Hasil ini menunjukkan bahwa dengan asumsi teknis dan ekonomi tertentu, proyek PLTSa dapat terlihat sangat layak.

## **2.2 Landasan Teori**

### **2.2.1 Krisis Pengelolaan Sampah Perkotaan di Indonesia**

Permasalahan sampah perkotaan di Indonesia telah mencapai tingkat krisis yang memerlukan perhatian multidimensional, mencakup aspek teknis, lingkungan, sosial, dan ekonomi. Pertumbuhan populasi urban yang pesat, diiringi dengan perubahan gaya hidup dan peningkatan pola konsumsi, telah menjadi pemicu utama lonjakan volume timbulan sampah yang melampaui kapasitas sistem pengelolaan yang ada [11]. Fenomena ini bukan hanya terjadi di kota-kota metropolitan di Pulau Jawa, tetapi juga di kota-kota besar lainnya seperti Medan, yang data tonase sampahnya menunjukkan volume yang signifikan dan terus menerus masuk ke Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). Kegagalan dalam mengelola aliran sampah yang masif ini telah menimbulkan serangkaian masalah turunan, mulai dari degradasi lingkungan yang parah, ancaman terhadap kesehatan masyarakat, hingga inefisiensi ekonomi yang membebani anggaran pemerintah daerah.

### **2.2.1.1 Laju Timbulan Sampah dalam Korelasi dengan Pertumbuhan Populasi dan Pola Konsumsi**

Permasalahan Akar fundamental dari krisis sampah perkotaan adalah laju timbulan sampah yang terus meningkat secara eksponensial. Peningkatan ini secara langsung berkorelasi dengan dua faktor sosio-ekonomi utama, yaitu pertumbuhan populasi dan eskalasi pola konsumsi masyarakat urban. Urbanisasi yang masif di Indonesia telah memusatkan populasi di kota-kota besar, yang secara inheren meningkatkan kepadatan aktivitas ekonomi dan domestik [12]. Setiap aktivitas manusia, baik dalam skala rumah tangga maupun industri, secara tak terhindarkan menghasilkan material sisa atau sampah. Dengan demikian, peningkatan jumlah penduduk secara langsung berarti peningkatan jumlah generator sampah, yang secara agregat menghasilkan volume timbulan yang lebih besar.

Lebih jauh lagi, pertumbuhan ekonomi yang menyertai urbanisasi turut mengubah pola konsumsi masyarakat. Peningkatan pendapatan per kapita dan perubahan gaya hidup mengarah pada tingkat konsumsi yang lebih tinggi dan lebih beragam [13]. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Ong [14], pola konsumsi modern ditandai dengan meningkatnya penggunaan produk sekali pakai, kemasan yang kompleks, dan perputaran barang yang lebih cepat, terutama barang elektronik. Hal ini tercermin dalam diversifikasi komposisi sampah perkotaan, yang tidak lagi hanya didominasi oleh sampah organik sisa makanan, tetapi juga oleh sampah anorganik seperti plastik, kertas, produk kemasan yang mengandung Bahan Berbahaya dan Beracun (B3), serta sampah elektronik (*e-waste*) yang semakin signifikan.

Korelasi antara pembangunan ekonomi, pertumbuhan populasi, dan peningkatan timbulan sampah menciptakan sebuah konsekuensi yang tak terhindarkan. Peningkatan volume sampah bukanlah sebuah anomali, melainkan hasil yang dapat diprediksi dari jalur pembangunan nasional saat ini. Selama pertumbuhan ekonomi dan urbanisasi menjadi tujuan kebijakan, maka laju timbulan sampah akan terus meningkat. Fakta ini seperti yang dinyatakan Gupta et al [15] mengimplikasikan bahwa setiap strategi pengelolaan sampah yang hanya berfokus pada penanganan di hilir (*end-of-pipe*), seperti pengumpulan dan pembuangan, tanpa intervensi pada aspek hulu (pengendalian konsumsi dan produksi), pada dasarnya tidak akan berkelanjutan. Sistem tersebut akan

selalu berada dalam posisi reaktif, berjuang untuk mengejar laju timbulan sampah yang terus mengakselerasi, dan pada akhirnya ditakdirkan untuk gagal seiring dengan bertumbuhnya kota. Krisis ini, oleh karena itu, bersifat sistemik dan melekat pada model pembangunan yang ada, bukan sekadar masalah operasional teknis.

#### **2.2.1.2 Keterbatasan Sistem Pengelolaan Konvensional**

Sistem pengelolaan sampah yang dominan diimplementasikan di sebagian besar kota di Indonesia masih menganut paradigma konvensional yang bersifat linear, dikenal dengan istilah "kumpul-angkut-buang" [16]. Paradigma ini memperlakukan sampah sebagai material sisa yang tidak memiliki nilai dan harus disingkirkan dari lingkungan masyarakat secepat mungkin. Prosesnya dimulai dari pengumpulan sampah di sumber seperti rumah tangga, komersial, diangkut menggunakan armada truk, dan berakhir dengan pembuangan di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). Model ini pada dasarnya adalah sebuah sistem pemindahan masalah dari pusat kota ke lokasi pinggiran yang telah ditentukan.

Keterbatasan utama dari paradigma ini terletak pada ketidakmampuannya untuk beradaptasi dengan peningkatan volume sampah yang eksponensial. Kapasitas pemerintah daerah, baik dari segi finansial, sumber daya manusia, maupun infrastruktur, seringkali sangat terbatas dalam menghadapi laju timbulan sampah yang terus meningkat. Akibatnya, efisiensi operasional sistem ini sangat rendah [17]. Data dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Astuti [18] menunjukkan bahwa pada umumnya hanya sebagian kecil sampah yang berhasil dikumpulkan dan diangkut ke TPA dengan cara yang benar, sementara sebagian besar lainnya tidak terkelola dan tercecer di lingkungan. Masalah operasional yang sering dihadapi meliputi kapasitas peralatan yang tidak memadai, pemeliharaan armada angkut yang kurang, dan keterbatasan jumlah pekerja lapangan.

Secara fundamental, paradigma "kumpul-angkut-buang" tidak hanya gagal dari segi lingkungan, tetapi juga tidak rasional secara ekonomi [19]. Model ini secara inheren memperlakukan sampah sebagai liabilitas murni yang memerlukan biaya untuk dikelola, tanpa mengakui potensi nilai yang terkandung di dalamnya. Setiap ton sampah yang diangkut dan dibuang ke TPA merepresentasikan biaya operasional yang signifikan bagi pemerintah daerah, mencakup biaya bahan bakar, gaji pekerja, dan pemeliharaan TPA. Ini menciptakan aliran pengeluaran yang terus-menerus dan menjadi beban fiskal yang

berat bagi Anggaran Pendapatan dan Belanja Daerah (APBD) [20]. Pada saat yang sama, model ini secara aktif membuang sumber daya berharga yang terkandung dalam sampah, seperti material yang dapat didaur ulang (plastik, kertas, logam) dan potensi energi yang dapat dipulihkan. Dengan demikian, paradigma konvensional menciptakan kerugian ganda: mengeluarkan biaya tinggi untuk membuang sesuatu yang sebenarnya memiliki nilai ekonomi [21]. Kegagalan untuk menutup siklus material dan energi ini menjadikan sistem "kumpul-angkut-buang" sebagai model yang tidak efisien secara ekonomi dan tidak berkelanjutan dalam jangka panjang, yang pada akhirnya hanya akan memperparah beban keuangan kota seiring dengan pertumbuhannya.

#### **2.2.1.3 Permasalahan Tempat Pemrosesan Akhir (TPA)**

TPA merupakan titik kritis dan manifestasi paling nyata dari kegagalan sistem pengelolaan sampah konvensional di Indonesia. Sebagai ujung dari alur "kumpul-angkut-buang", TPA dihadapkan pada tekanan yang luar biasa akibat volume sampah yang terus meningkat. Mayoritas TPA di kota-kota besar Indonesia dioperasikan dengan metode open dumping, yaitu praktik menghamparkan sampah secara terbuka tanpa perlakuan teknis yang memadai [22]. Praktik ini, meskipun secara eksplisit dilarang oleh Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah, tetap menjadi pilihan utama bagi banyak pemerintah daerah. Alasan utamanya adalah pertimbangan biaya, seperti *open dumping* dianggap sebagai metode yang paling murah dan paling mudah dioperasikan dibandingkan dengan alternatif yang lebih ramah lingkungan seperti *sanitary landfill* [23].

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Win & Win [24] didapat bahwa konsekuensi dari penerapan metode open dumping secara masif sangat merusak. Praktik ini secara drastis memperpendek usia pakai TPA, karena sampah menumpuk dengan cepat tanpa adanya proses pemadatan dan penutupan yang efektif. Akibatnya, banyak TPA di Indonesia mengalami kondisi kelebihan kapasitas (*overload*) jauh sebelum masa pakainya berakhir. Contoh nyata dari krisis ini adalah penutupan TPA Piyungan di Yogyakarta dan kondisi darurat di TPA Sarimukti yang melayani wilayah Bandung Raya [25]. Penumpukan sampah yang tidak terkendali ini menciptakan gunung sampah yang tidak stabil, yang berisiko tinggi mengalami longsor. Tragedi longsor di TPA Leuwigajah pada tahun 2005 menjadi pengingat tragis akan bahaya ini, di mana ratusan korban jiwa

melayang akibat longsor sampah [26]. Selain itu, dekomposisi sampah organik secara anaerobik di tumpukan open dumping menghasilkan gas metana ( $\text{CH}_4$ ), gas rumah kaca yang potensinya puluhan kali lebih kuat daripada karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), serta lindi (*leachate*), yaitu cairan toksik yang dapat meresap ke dalam tanah dan mencemari sumber air tanah [27].

Krisis TPA yang disebabkan oleh keterbatasan lahan dan praktik open dumping ini, meskipun merupakan sebuah kegagalan, secara tidak langsung berfungsi sebagai katalisator untuk transisi teknologi [28]. Lahan adalah sumber daya yang terbatas dan semakin mahal di kawasan perkotaan. Ketika sebuah kota tidak lagi mampu menemukan atau membebaskan lahan baru untuk TPA, pemerintah daerah dipaksa untuk mencari alternatif pengelolaan sampah yang dapat mengurangi volume sampah secara drastis [29]. Kondisi darurat TPA ini menciptakan urgensi politik dan teknis yang mendorong para pembuat kebijakan untuk mempertimbangkan teknologi pengolahan sampah tingkat lanjut yang dapat mereduksi volume secara signifikan, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA) berbasis insinerasi. Dengan demikian, kegagalan TPA sebagai titik akhir dari sistem linear menjadi pendorong utama yang memaksa pergeseran paradigma dari sekadar "membuang" menjadi "mengolah" dan "memulihkan sumber daya".

#### **2.2.1.4 Implikasi Sosial dan Kesehatan Masyarakat**

Dampak dari sistem pengelolaan sampah yang tidak memadai melampaui isu lingkungan dan teknis, merambah secara langsung ke ranah sosial dan kesehatan masyarakat. Tumpukan sampah yang tidak terkelola, baik di TPA maupun di TPS liar, menjadi sarang bagi vektor penyakit seperti lalat, tikus, dan nyamuk, yang dapat menularkan berbagai penyakit kepada masyarakat sekitar, termasuk diare, tifus, dan penyakit kulit [30]. Selain itu, TPA seringkali menjadi sumber konflik sosial yang berkepanjangan antara pemerintah dan komunitas lokal yang terdampak oleh pencemaran bau, air, dan tanah. Isu ini menyoroti aspek keadilan lingkungan (*environmental justice*), di mana beban ekologis dari konsumsi seluruh kota seringkali ditimpakan pada komunitas yang lebih rentan secara ekonomi yang tinggal di sekitar lokasi TPA [31].

Faktor sosial yang krusial dalam lingkaran setan permasalahan sampah adalah rendahnya kesadaran dan partisipasi publik. Banyak penelitian menunjukkan bahwa perilaku masyarakat, seperti membuang sampah sembarangan ke sungai atau lahan

kosong serta minimnya praktik pemilahan sampah di tingkat rumah tangga, secara signifikan memperburuk kondisi yang ada, seperti salah satunya penelitian oleh Nurlela & Suryatna [32] yang berlokasi di Desa Tajur Halang, Kabupaten Bogor. Perilaku ini tidak dapat dilihat secara terpisah dari kinerja sistem yang disediakan oleh pemerintah.

Kegagalan sistemik yang terjadi menciptakan sebuah siklus negatif yang saling memperkuat antara ketidakpercayaan publik dan inefisiensi pemerintah. Ketika pemerintah daerah gagal menyediakan infrastruktur dasar yang memadai, seperti jumlah TPS yang cukup, jadwal pengangkutan yang teratur, dan armada yang layak, masyarakat kehilangan kepercayaan terhadap sistem pengelolaan sampah formal [33]. Kehilangan kepercayaan ini bermanifestasi dalam bentuk rendahnya partisipasi. Sebagai contoh, masyarakat menjadi enggan untuk memilah sampah karena mereka meyakini bahwa sampah yang sudah dipilah pada akhirnya akan dicampur kembali di truk pengangkut atau di TPA, menjadikan usaha mereka sia-sia. Mereka juga cenderung membuang sampah sembarangan karena TPS terdekat seringkali penuh atau lokasinya terlalu jauh. Perilaku ini, yang lahir dari frustrasi terhadap sistem yang tidak berfungsi, kemudian semakin membebani infrastruktur yang sudah rapuh dan memberikan justifikasi bagi pihak berwenang untuk menyalahkan masyarakat [34]. Siklus ini menciptakan hambatan sosial yang kuat terhadap implementasi program pengelolaan sampah yang lebih baik, karena setiap inisiatif baru akan dihadapkan pada skeptisisme dan apatisme publik yang telah terbangun dari pengalaman kegagalan sistemik di masa lalu.

### **2.2.2 Karakteristik dan Potensi Energi Sampah Perkotaan (*Municipal Solid Waste/MSW*)**

Kelayakan teknis dan efisiensi dari setiap teknologi pengolahan sampah, terutama teknologi termal seperti insinerasi, sangat bergantung pada karakteristik bahan baku yang akan diolah. Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai komposisi, sifat fisik, dan karakteristik kimia dari sampah perkotaan atau *Municipal Solid Waste (MSW)* di Indonesia menjadi prasyarat fundamental dalam setiap studi kelayakan [35]. Karakteristik MSW di Indonesia memiliki ciri khas yang membedakannya dari sampah di negara-negara maju, terutama karena dominasi komponen organik yang tinggi, yang secara langsung berdampak pada potensinya.

#### **2.2.2.1 Komposisi Sampah Tipikal di Kota-kota Besar Indonesia**

Komposisi MSW di kota-kota besar Indonesia secara konsisten menunjukkan dominasi sampah organik. Berbagai studi dan data inventarisasi nasional mengkonfirmasi bahwa fraksi terbesar dari aliran sampah perkotaan adalah sisa makanan dan sampah halaman seperti daun dan ranting. Persentase sampah organik ini dapat bervariasi, namun umumnya berada dalam rentang 44% hingga 68% dari total berat sampah. Komponen signifikan berikutnya adalah material yang dapat didaur ulang, terutama plastik dengan persentase sekitar 14% hingga 18%, dan kertas yang berkontribusi antara 15% hingga 16%. Komponen lain seperti kain, karet, kayu, kaca, dan logam biasanya memiliki porsi yang lebih kecil [36].

Sumber utama timbulan sampah ini adalah sektor rumah tangga. Data hasil penelitian oleh Kromann et al [37] menunjukkan bahwa aktivitas domestik berkontribusi antara 44% hingga 75% dari total volume sampah yang dihasilkan di perkotaan. Sumber-sumber lain seperti pasar tradisional yang juga menghasilkan sampah organik dalam jumlah besar, kawasan komersial, dan perkantoran melengkapi sisa dari total timbulan sampah. Komposisi yang didominasi oleh sampah organik basah ini menjadi karakteristik utama yang harus dipertimbangkan dalam perancangan sistem pengelolaan sampah di Indonesia.

#### **2.2.2.2 Analisis Proksimat dan Karakteristik Kimia**

Analisis proksimat, yang mengukur kadar air (*moisture content*), kadar zat terbang (*volatile matter*), kadar abu (*ash content*), dan karbon tetap (*fixed carbon*), memberikan gambaran mengenai karakteristik kimia dasar dari MSW [38]. Sejalan dengan tingginya komposisi sampah organik, karakteristik kimia MSW di Indonesia Menurut Idris et al [39] adalah sebagai berikut:

1. Kadar Air Tinggi

Ini adalah parameter yang paling menonjol. Tingginya kandungan sisa makanan dan sampah hijau menyebabkan kadar air dalam sampah campuran perkotaan di Indonesia sangat tinggi, dengan nilai rata-rata dilaporkan sekitar 49.94%. Kadar air yang tinggi ini menjadi tantangan utama bagi teknologi pengolahan termal.

## 2. Kadar Zat Terbang Tinggi

Zat terbang adalah bagian dari sampah yang akan menguap ketika dipanaskan tanpa kehadiran oksigen. Komponen organik yang tinggi juga berarti kadar zat terbang yang tinggi, dengan rata-rata sekitar 53.34%. Kadar volatil yang tinggi mengindikasikan bahwa sebagian besar massa sampah dapat diubah menjadi gas selama proses termal, yang berpotensi melepaskan energi.

## 3. Kadar Abu Rendah

Abu adalah residu anorganik yang tersisa setelah pembakaran sempurna. Karena dominasi bahan organik, kadar abu dalam MSW Indonesia relatif rendah, dengan rata-rata sekitar 6.12%. Kadar abu yang rendah secara umum menguntungkan karena mengurangi jumlah residu akhir yang harus dikelola di TPA.

Kombinasi dari karakteristik ini, terutama kadar air yang sangat tinggi, secara langsung dan signifikan mempengaruhi efisiensi dan kelayakan proses konversi termal seperti insinerasi.

### 2.2.2.3 Nilai Kalor Bawah (*Lower Heating Value - LHV*) dan Implikasinya

Nilai kalor (*heating value*) adalah parameter paling krusial yang menentukan kuantitas energi yang dapat diekstraksi dari sampah melalui proses pembakaran. Terdapat dua jenis nilai kalor: *Higher Heating Value* (HHV) dan *Lower Heating Value* (LHV). HHV mengukur total energi panas yang dilepaskan, dengan asumsi uap air yang terbentuk selama pembakaran terkondensasi menjadi cair. Namun, dalam aplikasi praktis seperti insinerator, gas buang dilepaskan pada suhu tinggi sehingga uap air tetap dalam fasa gas. Energi yang dibutuhkan untuk menguapkan air yang terkandung dalam sampah (laten panas penguapan) tidak dapat dipulihkan. Oleh karena itu, LHV, yang memperhitungkan kehilangan energi ini, adalah metrik yang jauh lebih akurat dan relevan untuk mengevaluasi kelayakan teknologi termal [40].

Tantangan utama bagi implementasi PLTSa di Indonesia adalah nilai LHV dari MSW campurannya yang relatif rendah [41]. Untuk dapat menjalankan proses insinerasi secara autogenus (yaitu, dapat mempertahankan proses pembakaran tanpa memerlukan bahan bakar pendukung dari luar), diperlukan nilai kalor minimal sekitar 1500 kcal/kg atau setara dengan 6.28 MJ/kg. Namun, berbagai studi menunjukkan bahwa nilai kalor

rata-rata sampah campuran di Indonesia seringkali berada di bawah ambang batas ini, dilaporkan berada di kisaran 1000 kcal/kg (sekitar 4.18 MJ/kg) hingga 9.5 MJ/kg [42]. Nilai ini juga berada di bawah standar yang umum diterima untuk bahan bakar turunan sampah atau *Refuse-Derived Fuel* (RDF), yaitu 12.56 MJ/kg [43].

Rendahnya nilai LHV ini merupakan konsekuensi langsung dari tingginya kadar air. Sebagian besar energi yang dilepaskan selama pembakaran awal harus digunakan terlebih dahulu untuk menguapkan massa air yang besar di dalam sampah, sebelum temperatur dapat naik cukup tinggi untuk mempertahankan pembakaran yang efisien [44]. Hal ini membawa pada sebuah kesimpulan teknis yang fundamental: untuk mencapai viabilitas teknologi WtE termal di Indonesia, penerapan proses pra-pengolahan (*pre-treatment*) bukanlah sebuah pilihan, melainkan sebuah keharusan. Karakteristik inheren MSW Indonesia yang basah membuat pembakaran langsung (*mass-burn*) menjadi tidak efisien, tidak ekonomis, dan berisiko tinggi memerlukan bahan bakar fosil tambahan untuk menstabilkan prosesnya, yaitu suatu hal yang akan meniadakan manfaat lingkungan dan ekonomi dari proyek tersebut [45]. Oleh karena itu, setiap studi kelayakan PLTSa yang kredibel di Indonesia harus secara integral memasukkan unit pra-pengolahan, seperti pemilahan untuk memisahkan fraksi basah, pengeringan, atau produksi RDF, ke dalam desain teknis dan analisis biayanya. Pendekatan ini, meskipun meningkatkan kompleksitas dan biaya investasi awal (CAPEX), adalah prasyarat mutlak untuk memastikan operasi PLTSa yang stabil, efisien, dan berkelanjutan dalam konteks karakteristik sampah lokal. Komposisi rata-rata dan karakteristik sampah perkotaan di Indonesia berdasarkan Qonitan et al (2021) dapat dilihat pada tabel 2.1

Tabel 2. 1 Komposisi Rata-Rata dan Karakteristik Sampah Perkotaan di Indonesia

| <b>Komponen Sampah</b> | <b>Persentase Rata-Rata (% Berat)</b> | <b>Karakteristik Khas</b>               | <b>Nilai Kalor Bawah (LHV) (MJ/kg)*</b> |
|------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>Organik</b>         |                                       |                                         |                                         |
| Sisa Makanan           | 44 - 68                               | Kadar air sangat tinggi, volatil tinggi | Rendah (karena air)                     |
| Sampah Halaman         |                                       | Kadar air tinggi                        | Rendah (karena air)                     |
| <b>Anorganik</b>       |                                       |                                         |                                         |

| <b>Komponen Sampah</b>                     | <b>Persentase Rata-Rata (% Berat)</b> | <b>Karakteristik Khas</b>                                | <b>Nilai Kalor Bawah (LHV) (MJ/kg)*</b> |
|--------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Plastik                                    | 14 - 18                               | Kadar air rendah, volatil tinggi                         | Sangat Tinggi                           |
| Kertas & Karton                            | 15 - 16                               | Kadar air sedang, volatil tinggi                         | Tinggi                                  |
| Lain-lain (Kain, Karet, Kayu, Logam, Kaca) | Bervariasi                            | Bervariasi                                               | Bervariasi                              |
| Sampah Campuran (MSW)                      | 100                                   | Kadar Air: ~50%<br>Kadar Volatil: ~53%<br>Kadar Abu: ~6% | ~4.2 - 9.5                              |

### 2.2.3 Konsep dan Teknologi *Waste-to Energy* (WtE) dalam Hirarki Pengelolaan Sampah

*Waste-to Energy* (WtE) merujuk pada serangkaian proses yang mengubah sampah yang tidak dapat didaur ulang menjadi energi yang dapat digunakan, seperti listrik, panas, atau bahan bakar [47]. Dalam konteks pengelolaan sampah modern, WtE tidak dipandang sebagai solusi tunggal, melainkan sebagai salah satu komponen penting dalam sebuah sistem pengelolaan sampah terpadu yang lebih luas. Posisi dan perannya harus dipahami dalam kerangka hirarki pengelolaan sampah untuk memastikan implementasinya mendukung tujuan keberlanjutan secara keseluruhan, bukan justru menghambatnya.

#### 2.2.3.1 Posisi WtE dalam Kerangka Penelolan Sampah Terpadu

Hirarki pengelolaan sampah adalah sebuah konsep yang memprioritaskan pendekatan pengelolaan sampah berdasarkan tingkat keberlanjutannya. Urutan prioritas tertinggi hingga terendah secara umum yaitu Pencegahan (*Prevention/Reduce*), Penggunaan Kembali (*Reuse*), Daur Ulang (*Recycle*), Pemulihan Energi (*Energy Recovery*), dan Pembuangan Akhir (*Disposal*). Prinsip 3R (*Reduce, Reuse, Recycle*) menempati tiga tingkat teratas dan merupakan strategi yang paling diutamakan karena

bertujuan untuk meminimalkan timbulan sampah dan memaksimalkan konservasi sumber daya material [48].

Lamtai et al [49] menyatakan bahwa teknologi WtE berada pada tingkat keempat, yaitu Pemulihan Energi. Perannya adalah untuk mengelola aliran sampah residu, yaitu sampah yang tersisa setelah upaya maksimal 3R telah dilakukan. Sampah residu ini adalah material yang secara teknis sulit, secara ekonomi tidak layak, atau terkontaminasi sehingga tidak dapat didaur ulang. Dengan mengubah sampah residu ini menjadi energi, WtE menawarkan alternatif yang lebih baik daripada membuangnya langsung ke TPA (tingkat terendah dalam hirarki), karena berhasil memulihkan sebagian nilai yang terkandung dalam sampah tersebut [50].

Posisi WtE dalam hirarki ini juga menyoroti adanya potensi hubungan yang kompleks, bahkan antagonistik, dengan daur ulang. Di satu sisi, keduanya bisa bersinergi: daur ulang menangani material bersih dan bernilai, sementara WtE menangani residunya. Di sisi lain, potensi konflik dapat muncul. Teknologi WtE, terutama insinerasi, beroperasi paling efisien dengan bahan bakar yang memiliki nilai kalor tinggi [51]. Ironisnya, material dengan nilai kalor tertinggi, seperti plastik dan kertas kering, juga merupakan material yang paling bernilai dalam skema daur ulang. Hal ini menciptakan persaingan untuk "bahan baku" yang sama. Jika program daur ulang sangat sukses dan berhasil menarik sebagian besar plastik dan kertas dari aliran sampah, nilai kalor dari sampah residu yang tersisa untuk PLTSa akan menurun, yang berpotensi mengganggu stabilitas dan efisiensi operasinya. Sebaliknya, jika sebuah kota terikat kontrak jangka panjang dengan operator PLTSa yang mensyaratkan pasokan sampah dalam jumlah minimum (minimum tonnage guarantee), hal ini dapat menciptakan disinsentif bagi pemerintah kota untuk berinvestasi secara agresif dalam program daur ulang, karena khawatir akan mengurangi pasokan "bahan bakar" untuk PLTSa [52]. Oleh karena itu, perencanaan sistem pengelolaan sampah terpadu harus secara cermat menyeimbangkan target daur ulang dengan kebutuhan bahan bakar WtE untuk memastikan kedua strategi tersebut dapat hidup berdampingan dan saling melengkapi, bukan saling meniadakan.

### 2.2.3.2 Tinjauan Umum Jalur Konversi Energi

Menurut Nazari et al [53], teknologi untuk mengubah sampah menjadi energi dapat diklasifikasikan ke dalam tiga jalur konversi utama, yang masing-masing cocok untuk jenis sampah dan tujuan yang berbeda:

#### 1. Jalur Termokimia (*Thermochemical Conversion*)

Jalur termokimia ini memecah struktur kimia sampah dan melepaskan energi yang terkandung di dalamnya. Ini adalah jalur yang paling umum untuk sampah campuran dan dapat menangani volume besar. Teknologi utama dalam kategori ini meliputi:

##### a. Insenerasi (*Incineration*)

Pembakaran sampah secara langsung dengan kehadiran oksigen berlebih untuk menghasilkan gas panas, yang kemudian digunakan untuk menghasilkan uap dan listrik. Ini adalah teknologi WtE yang paling matang dan banyak diterapkan secara komersial di seluruh dunia.

##### b. Gasifikasi (*Gasification*)

Pemanasan sampah pada suhu tinggi dengan pasokan oksigen yang terbatas (tidak cukup untuk pembakaran sempurna). Proses ini mengubah sampah padat menjadi gas sintetis (*syngas*), yang terdiri dari hidrogen ( $H_2$ ), karbon monoksida ( $CO$ ), dan metana ( $CH_4$ ). *Syngas* ini kemudian dapat dibakar untuk menghasilkan listrik atau digunakan sebagai bahan baku kimia.

##### c. Pirolisis (*Pyrolysis*)

Pemanasan sampah pada suhu tinggi tanpa kehadiran oksigen sama sekali (*thermal decomposition*). Proses ini menghasilkan tiga produk utama: minyak pirolisis (*bio-oil*), gas (*syngas*), dan arang (*bio-char*).

#### 2. Jalur Biokimia (*Biochemical Conversion*)

Jalur ini memanfaatkan aktivitas mikroorganisme untuk mengurai komponen organik dalam sampah dan menghasilkan bahan bakar biologis. Teknologi ini sangat spesifik untuk sampah organik yang terpilah dan memiliki kadar air tinggi. Teknologi utamanya adalah digesti anaerobik (*anaerobic digestion*) yaitu penguraian sampah organik oleh bakteri dalam kondisi tanpa oksigen. Proses ini menghasilkan biogas, yang kaya akan metana ( $CH_4$ ) dan dapat

digunakan untuk menghasilkan listrik dan panas, serta digestat, yaitu residu padat yang kaya nutrisi dan dapat digunakan sebagai pupuk.

### 3. Jalur Fisiokimia (*Physicochemical Conversion*)

Jalur ini melibatkan proses ekstraksi untuk menghasilkan bahan bakar cair dari sampah. Salah satu produknya adalah *Refuse-Derived Fuel* (RDF), di mana sampah diproses (dicacah, dikeringkan, dipadatkan) untuk menghasilkan bahan bakar padat dengan nilai kalor yang lebih tinggi dan homogen.

Pemilihan jalur teknologi yang tepat sangat bergantung pada komposisi dan karakteristik sampah lokal, skala operasi, tujuan kebijakan, dan pertimbangan ekonomi. Untuk sampah campuran perkotaan di Indonesia yang heterogen dan memiliki volume besar, jalur termokimia, khususnya insinerasi, seringkali menjadi pilihan yang dipertimbangkan karena kemampuannya untuk menangani sampah dalam jumlah besar dengan reduksi volume yang signifikan.

#### **2.2.4 Teknologi Insinerasi untuk Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa)**

Teknologi insinerasi modern telah berevolusi jauh dari sekadar pembakaran sampah sederhana. Fasilitas PLTSa modern adalah pembangkit listrik yang kompleks dan terintegrasi, dirancang untuk memaksimalkan pemulihan energi sambil meminimalkan dampak lingkungan melalui sistem pengendalian polusi yang canggih [54]. Memahami prinsip kerja dan komponen-komponen utamanya adalah kunci untuk mengevaluasi kelayakan teknisnya.

##### **2.2.4.1 Prinsip Kerja Insinerator Modern**

Proses konversi sampah menjadi listrik melalui insinerasi melibatkan serangkaian tahapan yang terkoordinasi dengan baik, mulai dari penerimaan sampah hingga pembangkitan listrik seperti berikut:

#### 1. Penerimaan dan Penanganan Sampah (*Waste Reception and Handling*)

Truk-truk sampah yang tiba di fasilitas akan menimbang muatannya terlebih dahulu sebelum membongkar isinya ke dalam sebuah bunker atau lubang penampungan sampah (*waste pit*) yang sangat besar. Bunker ini berfungsi sebagai area penyimpanan sementara yang dapat menampung pasokan sampah untuk beberapa hari operasi. Di dalam bunker, sebuah derek cakar (*crane*) raksasa dioperasikan untuk mencampur dan menghomogenkan sampah. Proses

ini penting untuk menciptakan bahan bakar dengan karakteristik yang lebih seragam sebelum dimasukkan ke dalam tungku [55].

## 2. Pembakaran di Tungku (*Combustion in Furnace*)

Dari bunker, operator derek akan memindahkan sampah ke dalam corong pengumpan (*hopper*) yang mengarah ke ruang bakar atau tungku (*furnace*). Di dalam tungku, sampah dibakar di atas sebuah kisi-kisi bergerak (*moving grate*). Gerakan kisi-kisi ini secara perlahan mengaduk dan memajukan sampah melalui ruang bakar, memastikan terjadinya pembakaran yang merata dan sempurna. Udara pembakaran disuplai dari bawah dan atas kisi-kisi untuk mengontrol proses. Pembakaran dijaga pada temperatur yang sangat tinggi, biasanya di atas 950°C hingga 1300°C. Suhu yang tinggi ini krusial untuk memastikan penghancuran senyawa organik berbahaya seperti dioksin dan furan secara efektif [56].

## 3. Pemulihan Energi di Boiler (*Energy Recovery in Boiler*)

Gas buang yang sangat panas dari proses pembakaran (mencapai lebih dari 1000°C) kemudian diarahkan untuk melewati sebuah boiler. Boiler adalah sistem penukar panas yang terdiri dari ribuan pipa berisi air. Panas dari gas buang diserap oleh air di dalam pipa, mengubahnya menjadi uap air bertekanan dan bertemperatur sangat tinggi (*superheated steam*). Residu padat yang tersisa dari proses pembakaran, yang disebut abu dasar (*bottom ash*), jatuh dari ujung kisi-kisi dan dikumpulkan untuk diproses lebih lanjut [57].

## 4. Pembangkitan Listrik (*Power Generation*)

Uap bertekanan tinggi yang dihasilkan oleh boiler kemudian disalurkan untuk memutar bilah-bilah turbin uap. Turbin ini terhubung secara mekanis dengan sebuah generator. Perputaran turbin oleh uap akan memutar generator, yang kemudian mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik. Listrik yang dihasilkan kemudian dinaikkan tegangannya melalui transformator dan disalurkan ke jaringan listrik publik. Uap yang telah melewati turbin akan didinginkan di kondensor untuk kembali menjadi air, yang kemudian dipompa kembali ke boiler untuk memulai siklus dari awal [58].

### 2.2.5 Kerangka Regulasi dan Kebijakan PLTSa di Indonesia

Analisis Implementasi proyek infrastruktur berskala besar dan berteknologi kompleks seperti PLTSa tidak dapat berjalan tanpa adanya kerangka regulasi dan kebijakan yang kuat dari pemerintah. Di Indonesia, pengembangan WtE didukung oleh serangkaian peraturan perundang-undangan yang bertujuan untuk mengatasi masalah sampah sekaligus mendorong pemanfaatan energi terbarukan. Memahami lanskap kebijakan ini sangat krusial karena regulasi tersebut tidak hanya memberikan landasan hukum, tetapi juga membentuk model bisnis dan kelayakan finansial proyek PLTSa.

#### 2.2.5.1 Landasan Hukum Pengelolaan Sampah

Fondasi hukum untuk reformasi pengelolaan sampah di Indonesia diletakkan oleh Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah. Regulasi ini menandai pergeseran paradigma fundamental dari pendekatan "kumpul-angkut-buang" menuju pengelolaan sampah yang komprehensif dan berkelanjutan. Beberapa poin kunci dari UU ini yang relevan dengan pengembangan PLTSa adalah:

1. Larangan *Open Dumping*

UU ini secara tegas melarang praktik pembuangan sampah terbuka di TPA, dan mengamankan transisi ke metode yang lebih aman secara lingkungan seperti *sanitary landfill* atau *controlled landfill*. Larangan ini secara implisit mendorong pemerintah daerah untuk mencari alternatif selain penimbunan, termasuk teknologi reduksi volume seperti insinerasi.

2. Sampah sebagai Sumber Daya

UU ini memperkenalkan konsep bahwa sampah memiliki nilai dan dapat dimanfaatkan sebagai sumber daya. Hal ini membuka jalan bagi kegiatan pemulihan material (daur ulang) dan pemulihan energi (*waste-to-energy*).

3. Tanggung Jawab Pemerintah Daerah

UU ini memberikan mandat yang jelas kepada pemerintah daerah untuk menyelenggarakan pengelolaan sampah di wilayahnya, mulai dari pengurangan di sumber hingga pemrosesan akhir.

Dengan demikian, UU No. 18/2008 menciptakan landasan hukum yang mendesak bagi pemerintah daerah untuk meninggalkan praktik lama yang tidak berkelanjutan dan mulai mengadopsi solusi-solusi inovatif, termasuk PLTSa.

#### **2.2.5.2 Peraturan Presiden No. 35 Tahun 2018 sebagai Akselerator**

Menyadari bahwa transisi ke teknologi WtE yang padat modal berjalan lambat, pemerintah pusat mengeluarkan Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 35 Tahun 2018 tentang Percepatan Pembangunan Instalasi Pengolah Sampah Menjadi Energi Listrik Berbasis Teknologi Ramah Lingkungan. Perpres ini berfungsi sebagai instrumen akselerasi yang dirancang khusus untuk mengatasi hambatan-hambatan dalam implementasi PLTSa. Perpres ini mencabut regulasi sebelumnya (Perpres No. 18 Tahun 2016) dan memperluas cakupan serta mekanisme dukungannya.

Perpres 35/2018 menunjuk 12 kota/provinsi sebagai lokasi prioritas untuk pembangunan PLTSa, yaitu DKI Jakarta, Tangerang, Tangerang Selatan, Bekasi, Bandung, Semarang, Surakarta, Surabaya, Makassar, Denpasar, Palembang, dan Manado. Tujuannya adalah untuk menciptakan proyek percontohan yang dapat direplikasi di kota-kota lain. Perpres ini memberikan kerangka kerja yang lebih jelas bagi pemerintah daerah untuk memulai proyek, baik melalui penugasan langsung kepada Badan Usaha Milik Daerah (BUMD) atau melalui proses lelang/kompetisi yang melibatkan badan usaha swasta.

#### **2.2.6 Studi Kelayakan Proyek**

Studi kelayakan merupakan suatu evaluasi dan analisis komprehensif terhadap potensi sebuah proyek yang diusulkan untuk mendukung proses pengambilan keputusan. Tujuannya adalah untuk secara objektif dan rasional mengungkap kekuatan dan kelemahan dari sebuah usulan proyek, peluang dan ancaman yang ada di lingkungan sekitar, sumber daya yang dibutuhkan, serta prospek keberhasilannya [59]. Secara tujuannya, studi kelayakan bertujuan untuk menjawab satu pertanyaan krusial, "Apakah proyek ini layak untuk dilanjutkan?" [60]. Jawaban atas pertanyaan ini didasarkan pada analisis mendalam terhadap berbagai aspek yang saling terkait [61].

Secara proyek infrastruktur padat modal dan teknologi seperti Pembangkit PLTSa, studi kelayakan menjadi tahap yang tidak dapat dilewati. Proyek semacam ini melibatkan investasi finansial yang sangat besar, dampak lingkungan jangka panjang, serta implikasi sosial dan operasional yang kompleks [62]. Oleh karena itu, studi kelayakan tidak hanya berfungsi sebagai alat justifikasi, tetapi juga sebagai panduan manajemen risiko untuk mengidentifikasi potensi masalah sebelum sumber daya dialokasikan secara penuh [63].

Secara umum, studi kelayakan mencakup beberapa dimensi analisis, yang dalam penelitian ini difokuskan pada aspek teknis dan finansial, namun juga menyentuh aspek lainnya secara implisit. Dimensi-dimensi utama tersebut antara lain:

1. Kelayakan Teknis

Menilai apakah teknologi yang diusulkan praktis untuk diimplementasikan dan apakah sumber daya teknis yang ada (termasuk keahlian) memadai. Untuk PLTSa, ini mencakup analisis kuantitas dan kualitas sampah, pemilihan teknologi insinerasi atau gasifikasi yang tepat, efisiensi konversi energi, serta kebutuhan infrastruktur pendukung [64].

2. Kelayakan Ekonomi/Finansial

Kelayakan ekonomi/finansial merupakan analisis biaya-manfaat dari proyek untuk menentukan viabilitas dan profitabilitasnya. Analisis ini memproyeksikan biaya modal (*Capital Expenditure* - CAPEX), biaya operasional (*Operational Expenditure* - OPEX), dan membandingkannya dengan proyeksi pendapatan dari penjualan listrik dan *tipping fees*. Indikator seperti NPV, IRR, dan Payback Period menjadi alat ukur utamanya [65].

3. Kelayakan Hukum

Menyelidiki apakah proyek yang diusulkan bertentangan dengan peraturan hukum yang ada, seperti undang-undang lingkungan hidup, peraturan tata ruang wilayah, perizinan, dan standar emisi yang ditetapkan oleh pemerintah [66].

4. Kelayakan Operasional

Menilai sejauh mana proyek dapat dioperasikan dan dikelola setelah diimplementasikan. Ini mencakup ketersediaan tenaga kerja terampil, prosedur operasional standar (SOP) untuk pemeliharaan fasilitas, serta rantai pasok untuk pengumpulan dan pengangkutan sampah secara konsisten [66].

5. Kelayakan Jadwal

Menganalisis apakah kerangka waktu penyelesaian proyek realistis. Untuk proyek PLTSa, ini melibatkan estimasi waktu untuk pengadaan lahan, perizinan, konstruksi, komisioning, hingga operasi komersial. Keterlambatan dalam jadwal dapat berdampak signifikan terhadap kelayakan finansial proyek [65].

### 2.2.7 Analisis Kelayakan Teknis

Analisis kelayakan teknis merupakan tulang punggung dari sebuah studi kelayakan proyek PLTSa. Analisis ini bertujuan untuk menilai apakah sebuah proyek dapat diimplementasikan dan dioperasikan secara efektif dari sudut pandang teknologi dan rekayasa [67]. Kegagalan dalam analisis teknis dapat menyebabkan proyek tidak dapat beroperasi sesuai harapan, menghasilkan output yang lebih rendah, atau bahkan mengalami kegagalan total. Untuk proyek PLTSa, kelayakan teknis secara khusus mengevaluasi tiga pilar utama:

#### 1. Ketersediaan dan Karakteristik Bahan Baku

Bahan baku utama PLTSa adalah sampah kota (*Municipal Solid Waste - MSW*). Keberhasilan operasional fasilitas sangat bergantung pada pasokan sampah yang stabil, baik dari segi kuantitas maupun kualitas.

##### a. Kuantitas (Timbulan Sampah)

Analisis ini melibatkan proyeksi jumlah sampah yang akan dihasilkan di wilayah studi selama umur proyek (biasanya 20-25 tahun). Proyeksi ini penting untuk menentukan skala atau kapasitas pabrik yang akan dibangun. Kapasitas yang terlalu besar (*oversized*) akan menyebabkan pabrik tidak efisien karena kekurangan bahan baku, sementara kapasitas yang terlalu kecil (*undersized*) tidak akan mampu mengatasi masalah sampah secara signifikan [68]. Proyeksi biasanya didasarkan pada data historis, laju pertumbuhan penduduk, dan perkembangan ekonomi wilayah.

##### b. Kualitas (Karakteristik Sampah)

Kualitas sampah menentukan potensi energi yang dapat diekstraksi dan teknologi apa yang paling cocok. Tiga parameter utama yang dianalisis berdasarkan Xu et al [69] adalah:

##### 1) Komposisi Sampah

Persentase komponen organik (sisa makanan, daun) dan anorganik (plastik, kertas, kaca, logam). Komponen dengan nilai kalor tinggi seperti plastik dan kertas sangat diinginkan.

## 2) Kadar Air (*Moisture Content*)

Kadar air yang tinggi akan menurunkan efisiensi pembakaran karena sebagian energi akan digunakan untuk menguapkan air terlebih dahulu. Sampah di Indonesia umumnya memiliki kadar air yang tinggi, yang menjadi tantangan teknis tersendiri.

## 3) Nilai Kalor (*Heating Value*)

Merupakan ukuran jumlah energi yang terkandung dalam sampah, biasanya dinyatakan dalam kWh/ton atau MJ/kg. *Lower Heating Value* (LHV) adalah parameter yang paling umum digunakan karena memperhitungkan energi yang hilang akibat penguapan air. Nilai kalor yang memadai (umumnya di atas 1.500 kkal/kg) adalah syarat mutlak agar proses termal dapat berjalan secara autogen (berkelanjutan tanpa bahan bakar tambahan).

## 2. Pemilihan Teknologi

Setelah karakteristik sampah diketahui, langkah selanjutnya adalah memilih teknologi konversi *waste-to-energy* yang paling sesuai. Setiap teknologi memiliki kelebihan, kekurangan, dan persyaratan bahan baku yang berbeda [70].

### a. Insinerasi (*Incineration*)

Teknologi paling matang dan banyak digunakan di dunia. Prosesnya melibatkan pembakaran sampah secara langsung pada suhu tinggi (850-1100 °C) untuk menghasilkan panas. Panas ini digunakan untuk mendidihkan air dan menghasilkan uap yang akan memutar turbin untuk membangkitkan listrik. Keunggulannya adalah mampu mereduksi volume sampah hingga 90% dan cocok untuk sampah campuran.

### b. Gasifikasi (*Gasification*)

Proses ini mengubah sampah padat menjadi gas yang mudah terbakar (*syngas*) melalui pemanasan dengan jumlah oksigen yang terbatas. *Syngas* kemudian dapat dibakar di dalam *boiler* atau mesin gas untuk menghasilkan listrik. Teknologi ini dianggap lebih bersih dari insinerasi tetapi lebih sensitif terhadap komposisi dan homogenitas sampah.

c. *Pirolisis (Pyrolysis)*

Merupakan dekomposisi termal sampah tanpa kehadiran oksigen. Proses ini menghasilkan minyak pirolisis (*bio-oil*), *syngas*, dan arang (*char*). Minyak dan gas dapat digunakan sebagai bahan bakar. Pirolisis memerlukan bahan baku yang lebih homogen dan seringkali membutuhkan pra-pengolahan sampah yang lebih intensif.

Pemilihan teknologi harus mempertimbangkan kesesuaian dengan karakteristik sampah lokal, tingkat kematangan teknologi, rekam jejak operasional, serta standar emisi yang berlaku di Indonesia.

3. Efisiensi dan Kapasitas Pembangkitan

Analisis ini bertujuan untuk menghitung seberapa besar energi listrik bersih yang dapat dihasilkan dan dijual ke jaringan.

a. Efisiensi Konversi Energi

Merupakan rasio antara energi listrik yang dihasilkan dengan total energi yang terkandung dalam sampah yang dibakar. Efisiensi PLTSa termal modern biasanya berkisar antara 20-30% [71]. Efisiensi ini dipengaruhi oleh teknologi yang digunakan, nilai kalor sampah, dan desain siklus uap (temperatur dan tekanan).

b. Kapasitas Terpasang (*Installed Capacity*)

Dihitung berdasarkan jumlah sampah harian yang akan diolah, nilai kalornya, dan efisiensi pabrik. Kapasitas ini menentukan ukuran generator dan infrastruktur listrik lainnya yang dibutuhkan.

c. Faktor Ketersediaan (*Availability Factor*)

PLTSa tidak dapat beroperasi 24/7 sepanjang tahun karena memerlukan waktu untuk pemeliharaan rutin (*scheduled maintenance*) dan mungkin mengalami perhentian tak terduga (*unplanned outage*). Faktor ketersediaan (biasanya 85-90%) harus diperhitungkan untuk mendapatkan estimasi produksi energi tahunan yang realistis [71].

### 2.2.8 Analisis Kelayakan Finansial

Analisis kelayakan finansial adalah proses evaluasi untuk menentukan apakah sebuah proyek investasi layak secara ekonomi dan mampu memberikan tingkat

pengembalian yang diharapkan [64]. Dengan menggunakan proyeksi arus kas, analisis ini menilai profitabilitas proyek dari waktu ke waktu, dengan mempertimbangkan nilai waktu dari uang (*time value of money*) [72]. Untuk proyek-proyek besar seperti PLTSa, analisis ini sangat krusial karena melibatkan biaya investasi awal yang tinggi dan memiliki horison operasi jangka panjang. Beberapa kriteria investasi utama yang digunakan secara luas adalah sebagai berikut:

1. *Net Present Value (NPV)*

NPV merupakan konsep dasar dalam analisis keuangan dan investasi yang digunakan untuk menentukan keuntungan suatu proyek atau investasi [73]. Nilai ini mengevaluasi nilai sekarang dari arus kas masa depan, dengan memperhitungkan nilai waktu uang. NPV tentunya membantu investor dalam menentukan apakah suatu investasi akan menghasilkan keuntungan positif ketika arus kas masa depan didiskontokan ke nilai sekarangnya [74].

Prinsip inti di balik NPV adalah *time value of money* (TVM), yang menyatakan bahwa satu dolar yang diterima saat ini lebih berharga daripada satu dolar yang diterima di masa mendatang karena inflasi, risiko, dan biaya peluang. Dengan mendiskontokan arus kas masa depan, NPV menyesuaikan kenyataan ini, menjadikannya ukuran yang lebih akurat dari nilai sebenarnya suatu investasi. *Cash flow* mewakili arus kas masuk atau arus kas keluar bersih yang diharapkan pada setiap periode waktu  $t$  [74]. Dalam proyek investasi, arus kas masuk dapat berasal dari pendapatan atau penghematan biaya, sedangkan arus kas keluar mewakili investasi awal, biaya pemeliharaan, atau biaya operasional.

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} - C_0 \quad (\text{Pers.1})$$

Di mana  $CF_t$  adalah arus kas bersih pada tahun ke- $t$ ,  $r$  adalah tingkat diskonto,  $T$  adalah umur proyek, dan  $C_0$  adalah biaya investasi awal. Tingkat diskonto merupakan tingkat pengembalian yang disyaratkan atau biaya modal. Tingkat diskonto memperhitungkan risiko, inflasi, dan biaya peluang modal [75]. Tingkat diskonto yang lebih tinggi mengurangi nilai sekarang dari arus kas masa depan, sehingga proyek jangka panjang menjadi kurang menarik. Memilih tingkat diskonto yang tepat sangat penting, karena secara langsung memengaruhi keputusan investasi. NPV mengikuti aturan pengambilan

keputusan yang sederhana: jika NPV positif, investasi dianggap menguntungkan dan harus dilanjutkan. Jika NPV negatif, investasi diharapkan menghasilkan kerugian bersih dan harus dihindari. Jika NPV nol, proyek diharapkan mencapai titik impas, tidak memperoleh atau kehilangan nilai [75]. Salah satu keuntungan utama NPV adalah ia menyediakan ukuran absolut profitabilitas, bukan hanya persentase pengembalian. Meskipun memiliki kelebihan, NPV memiliki keterbatasan [76]. NPV memerlukan proyeksi arus kas yang akurat, yang mungkin sulit diperoleh, terutama untuk proyek jangka panjang. Selain itu, memilih tingkat diskonto yang tepat dapat menjadi tantangan, karena pemangku kepentingan yang berbeda mungkin memiliki ekspektasi risiko yang berbeda [77].

NPV banyak digunakan dalam penganggaran modal, membantu bisnis dan investor menentukan proyek yang paling menguntungkan. NPV sangat berguna untuk membandingkan berbagai peluang investasi, karena memungkinkan perbandingan langsung penciptaan nilai bersihnya [77].

## 2. *Internal Rate of Return (IRR)*

Internal Rate of Return (IRR) adalah metrik kelayakan investasi yang sangat populer karena hasilnya disajikan dalam bentuk persentase, sehingga mudah dibandingkan dengan tingkat pengembalian alternatif [78]. Secara definisi, IRR adalah tingkat diskonto (*discount rate*) yang membuat nilai NPV dari sebuah proyek sama dengan nol. Dengan kata lain, IRR adalah tingkat pengembalian intrinsik atau imbal hasil yang sebenarnya dari proyek tersebut.

Aturan Keputusan: Proyek dianggap layak jika nilai IRR yang dihasilkan lebih besar dari biaya modal (*cost of capital*) atau tingkat pengembalian minimum yang disyaratkan (*Minimum Acceptable Rate of Return* - MARR atau *hurdle rate*). Jika  $IRR > MARR$ , proyek diterima [79]. Meskipun populer, IRR memiliki beberapa kelemahan. Untuk proyek dengan pola arus kas non-konvensional (misalnya, ada arus kas keluar negatif di tengah umur proyek), mungkin akan muncul lebih dari satu nilai IRR, sehingga menyulitkan interpretasi. Selain itu, untuk membandingkan proyek-proyek yang saling

eksklusif (*mutually exclusive*), IRR terkadang dapat memberikan sinyal yang bertentangan dengan NPV [79].

### 3. *Payback Period* (PP)

PP adalah indikator yang mengukur waktu yang dibutuhkan oleh sebuah proyek untuk mengembalikan seluruh biaya investasi awalnya melalui akumulasi arus kas masuk yang dihasilkannya. PP merupakan metrik yang berfokus pada likuiditas dan risiko, di mana investor ingin mengetahui seberapa cepat modal mereka akan kembali [80].

Aturan Keputusan: Umumnya, proyek dengan *payback period* yang lebih pendek dianggap lebih menarik dan kurang berisiko. Perusahaan seringkali menetapkan periode pengembalian maksimum yang dapat diterima. Kelemahan utama dari PP tradisional adalah mengabaikan nilai waktu dari uang dan tidak memperhitungkan arus kas yang terjadi setelah periode pengembalian tercapai. Untuk mengatasi kelemahan pertama, seringkali digunakan *Discounted Payback Period* (DPP), yang menghitung waktu pengembalian berdasarkan arus kas yang telah didiskontokan [81]. Meskipun demikian, DPP tetap tidak memperhitungkan arus kas setelah periode pengembalian.

### 4. *Benefit-Cost Ratio* (B/C)

BCR atau terkadang disebut *Profitability Index* (PI) adalah rasio yang membandingkan nilai sekarang (*present value*) dari total manfaat atau pendapatan dengan nilai sekarang dari total biaya. Indikator ini memberikan gambaran tentang berapa besar nilai manfaat yang diperoleh untuk setiap unit biaya yang dikeluarkan.

$$BCR = \frac{PV \text{ Arus kas masuk}}{PV \text{ Arus kas keluar}} = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t}}{C_0} \quad (\text{Pers 2})$$

Aturan Keputusan: Proyek dianggap layak jika nilai  $BCR > 1.0$ . Nilai BCR sebesar 1.5, misalnya, mengindikasikan bahwa untuk setiap Rp1 biaya (dalam nilai sekarang), proyek akan menghasilkan manfaat sebesar Rp1.5 (juga dalam nilai sekarang) [82]. Sama seperti NPV, kriteria ini secara konsisten akan memberikan keputusan terima-tolak yang sama: jika  $NPV > 0$ , maka  $BCR > 1.0$ . BCR sangat berguna dalam situasi di mana terdapat keterbatasan modal,

karena dapat membantu memprioritaskan proyek-proyek yang memberikan "nilai per rupiah" tertinggi.