



Kajian Teknologi Alternatif Pengolahan Sampah Padat Perkotaan menjadi Energi Terbarukan Ramah Lingkungan

Review on Alternative Technology for Municipal Solid Waste Treatment to Produce Environmentally Friendly Renewable Energy

Mochamad Syamsiro^{1,2,a)}, Prabang Setyono³, Kristiana Hariyanti⁴, Gatot Sutanto⁵

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Janabadra, Yogyakarta

²Center for Waste Management and Bioenergy, Universitas Janabadra, Yogyakarta

³Program Studi Ilmu Lingkungan, Universitas Negeri Sebelas Maret, Surakarta

⁴Dinas Lingkungan Hidup (DLH), Kota Surakarta

⁵Badan Perencanaan Pembangunan Daerah (BAPPEDA), Kota Surakarta

^{a)}Corresponding author: syamsiro@janabadra.ac.id

Abstrak

Seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk dan pertumbuhan ekonomi, maka terjadi peningkatan timbunan sampah di hampir semua kota di Indonesia. Sementara kondisi tempat pembuangan akhir (TPA) sampah saat ini sudah atau hampir penuh, sehingga tidak bisa menampung sampah lebih banyak lagi. Oleh karena itu, perlu ada solusi jangka pendek untuk menjawab permasalahan kedaruratan sampah ini. Kajian ini menganalisis beberapa teknologi alternatif yang dapat digunakan untuk mengolah sampah padat perkotaan menjadi sumber energi. Dari hasil *review*, teknologi termal merupakan proses yang paling cepat dan meninggalkan residu yang paling sedikit. Teknologi termal yang dapat diterapkan yaitu pembakaran/insinerasi, gasifikasi, dan pirolisis. Teknologi insinerasi dapat digunakan pada skala besar karena melibatkan proses yang menggunakan ketel uap (*boiler*) dan turbin. Sementara gasifikasi lebih cocok diterapkan pada skala yang lebih kecil dengan menggunakan mesin gas atau mesin diesel sebagai pembangkit listriknya. Sedangkan pirolisis lebih sesuai untuk jenis sampah homogen dan tertentu seperti plastik dan ban bekas.

Kata Kunci: sampah kota; energi dari sampah; insinerasi; pirolisis; gasifikasi

Abstract

Along with the increase in population and economic growth, there has been an increase in waste generation in Indonesia. Meanwhile, the current condition of the final waste disposal site (TPA) is currently full, so it cannot accommodate any more waste. Therefore, there needs to be a short-term solution to address this problem. This study examines several alternative technologies that can be used to process municipal solid waste into energy sources. Based on literature review, thermal technology is the most rapid and produces the least amount of residue. The thermal technologies that can be applied are combustion/incineration, gasification, and pyrolysis. Incineration technology can be used on a large scale because it involves processes that use boilers and turbines. Meanwhile, gasification can be applied on a smaller scale by using a gas engine or diesel engine. Finally, pyrolysis is more suitable for homogeneous and certain types of waste such as plastic and waste tires.

Keywords: municipal solid waste; waste to energy; incineration; pyrolysis; gasification

PENDAHULUAN

Membicarakan keberadaan sampah dengan segudang permasalahannya memang tidak akan pernah habis karena sudah sangat mengganggu lingkungan sekitar kita. Masyarakat ingin pemerintah segera mengambil tindakan

terhadap permasalahan sampah yang sudah sangat darurat ini, namun demikian masyarakat juga tidak ingin terkena dampak langsung dari proses penanganan sampah tersebut. Hal ini cukup menyulitkan pemerintah karena secara umum TPA yang ada di kota-kota besar kondisinya sudah penuh, sementara untuk mencari lokasi TPA baru yang jauh

dari pemukiman warga sudah sangat sulit. Sehingga kalau tidak ada solusi keadaan darurat ini, maka dalam waktu dekat akan sangat mungkin terjadi ledakan bom waktu sampah [1].

Di sisi lain, seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk dan pertumbuhan ekonomi Indonesia yang kembali positif setelah sempat mengalami kontraksi semasa pandemi covid-19 serta diikuti dengan peningkatan kesejahteraan masyarakat, maka terjadi peningkatan timbunan sampah di hampir semua kota di Indonesia. Hal ini diperparah dengan perilaku membuang sampah dari masyarakat yang masih buruk sehingga semakin menyulitkan pemerintah daerah untuk mengelola sampahnya dengan baik [2].

Permasalahan yang sama juga sebenarnya tidak hanya terjadi di Indonesia saja, tetapi juga di negara lainnya seperti Tiongkok [3], Thailand [4], Nigeria [5], India [6] dan beberapa negara berkembang lainnya. Hingga tahun 2015, terdapat 33 kota metropolitan di dunia dengan 27 diantara-Nya berada di negara berkembang khususnya di Asia Tenggara. Menurut perhitungan, timbunan sampah di Asia akan mencapai 1,8 juta ton/hari di tahun 2025 [4] dengan di negara berkembang sistem *open dumping* masih mendominasi dalam pengelolaan sampahnya.

Data dari KLHK menunjukkan bahwa sampah rumah tangga mendominasi timbunan sampah di Indonesia hingga mencapai 38% seperti ditunjukkan pada Gambar 1. dan tentunya akan meningkat seiring dengan perubahan pola hidup masyarakat [7]. Hal tersebut tentunya berdampak pada peningkatan jumlah sampah kota yang harus dibuang ke TPA. Sementara kondisi TPA di banyak kota saat ini sudah atau hampir penuh, sehingga tidak bisa menampung sampah lebih banyak lagi.

Pada sisi hulu, upaya edukasi pemilahan sampah, penerapan prinsip 3R (*reduce, reuse, recycle*) terus dilakukan untuk mengubah perilaku dan pola hidup masyarakat agar semakin sadar lingkungan dan peduli terhadap persoalan sampah. Namun demikian, upaya edukasi di sisi hulu ini membutuhkan waktu lama dan ini merupakan bagian dari solusi jangka panjang.

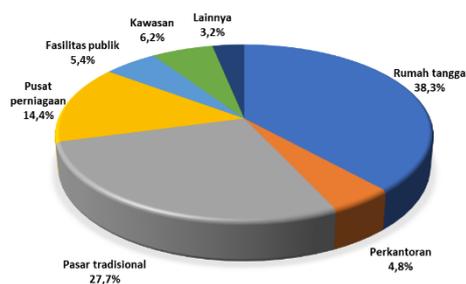
Oleh karena itu, perlu ada solusi jangka pendek untuk menjawab permasalahan kedaruratan sampah ini yang utamanya adalah penanganan di sisi hilir dengan di lokasi tersebut sampah akan dibuang, baik di TPA maupun tempat pengolahan sampah terpadu (TPST). Solusi ini relatif lebih mudah karena tidak banyak melibatkan partisipasi masyarakat secara luas.

Salah satu upaya untuk mengurangi timbunan sampah di TPA atau TPST adalah dengan melakukan pemusnahan atau pengolahan sampah dengan berbagai macam teknologi baik yang hanya sekedar mereduksi volume sampah maupun yang menghasilkan produk turunan seperti menghasilkan energi dan listrik. Artikel ini akan mengkaji

beberapa alternatif teknologi pengolahan sampah yang ada khususnya untuk menghasilkan energi terbarukan yang ramah lingkungan. Kelebihan dan kekurangan masing-masing teknologi akan dibahas dan pilihan terbaik teknologi akan ditentukan berdasarkan kebutuhan yang ada di Indonesia.

KARAKTERISTIK DAN TIMBUNAN SAMPAH

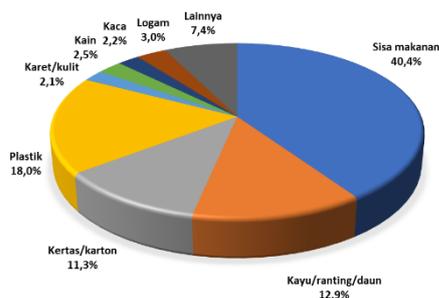
Timbunan sampah dan karakteristiknya sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor dan telah dijelaskan sebelumnya seperti jumlah penduduk, pertumbuhan ekonomi, tingkat kesejahteraan masyarakat, dan pola konsumsiarganya. Komposisi sampah padat berdasarkan sumber sampahnya dapat dilihat pada Gambar 1. Sampah rumah tangga mendominasi timbunan sampah di Indonesia dengan komposisi mencapai 38,3% disusul dengan sampah dari pasar tradisional yang mencapai 27,7% dan sampah dari pusat perdagangan perniagaan sebesar 14,4%. Sampah yang dihasilkan dari perkantoran, fasilitas publik, kawasan dan lainnya relatif kecil di bawah 10%. Komposisi ini akan terus berubah mengikuti perubahan faktor-faktor di atas dan adanya penetrasi kebijakan dari pemerintah daerah. Beberapa kota besar seperti DKI Jakarta dan Surabaya, kontribusi sampah rumah tangga relatif lebih kecil. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan karakteristik aktivitas penduduknya pada dua kota metropolitan tersebut dengan berbagai fasilitas yang tentunya berbeda dengan kota-kota yang lebih kecil [8].



Gambar 1. Komposisi sampah berdasarkan sumber sampah tahun 2022 [9]

Dari sumber sampah yang berbeda tersebut, maka akan mempengaruhi jenis sampah yang dihasilkan seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Sampah makanan menjadi penyumbang terbesar dengan porsi mencapai 40,4%, hal ini sejalan dengan dominasi sumber sampah dari rumah tangga yang umumnya berupa sisa makanan. Jenis sampah berikutnya dengan komposisi agak besar yaitu plastik (18%), kayu/ranting/daun (12,9%), dan kertas/karton yang mencapai 11,3%. Sisanya dengan porsi kurang dari 5% diantara-Nya karet/kulit, kain, kaca, logam, dan lainnya. Dengan komposisi jenis sampah yang demikian tentunya

akan mempengaruhi seberapa besar kandungan energi yang dimiliki sampah untuk nantinya dijadikan sumber energi terbarukan.



Gambar 2. Komposisi sampah berdasarkan jenis sampah tahun 2022 [9]

Timbunan sampah di beberapa kota besar di Pulau Jawa berikut komposisi sumber sampahnya ditunjukkan oleh [Tabel 1](#). Secara umum, ibukota provinsi menghasilkan sampah lebih dari 1000 ton/hari seperti di Kota Semarang. Sedangkan kota besar yang bukan ibukota provinsi menghasilkan sampah yang relatif lebih rendah dari 1000 ton/hari. Namun demikian, faktor-faktor lain akan mempengaruhi timbunan sampah tersebut, seperti banyaknya kawasan industri, banyaknya pemukiman dan perkantoran seperti halnya di kota-kota penyangga ibukota negara yang ada di sekitar Jakarta. Kemudian untuk komposisi sumber sampahnya juga berbeda-beda mengikuti karakteristik masing-masing kota. Namun secara umum sampah rumah tangga tetap mendominasi komposisi timbunan sampah di tiga kota tersebut.

Perubahan karakteristik sampah juga terjadi ketika pandemi covid-19 melanda Indonesia dan dunia beberapa tahun terakhir ini. Hasil penelitian Hardi dan Akbar [10] menunjukkan bahwa terjadi penurunan sampah yang dihasilkan di kawasan komersial sebagai dampak kebijakan bekerja dan belajar dari rumah. Begitu juga sampah khusus yang dihasilkan selama pandemi covid-19 seperti masker dan alat pelindung diri (APD) terjadi peningkatan yang sangat drastis. Hasil penelitian Ruslinda dkk. [11] menunjukkan bahwa sampah rumah tangga mengalami kenaikan dua kali lipat dibandingkan dengan sebelum pandemi covid-19. Namun demikian, secara komposisi jenis sampah tidak mengalami perubahan signifikan yang didominasi oleh sampah makanan dan plastik.

Tabel 1. Timbunan dan komposisi sumber sampah di beberapa kota besar di Pulau Jawa [9]

	Malang	Semarang	Surakarta
Timbunan sampah (ton/hari)	764,79	1181,06	376,29
Sumber Sampah (%) :			
Rumah tangga	47,69	71,99	41,51

	Malang	Semarang	Surakarta
Timbunan sampah (ton/hari)	764,79	1181,06	376,29
Perkantoran	0,31	0,48	20,75
Pasar tradisional	3,01	2,58	0,77
Pusat perniagaan	14,44	8,02	20,75
Fasilitas publik	6,34	9,04	0,96
Kawasan	24,01	6,63	0,04
Lainnya	4,20	1,25	15,22

Salah satu parameter penting di dalam pengolahan sampah khususnya menjadi energi adalah kandungan energi yang ada di dalam sampah. [Tabel 2](#). menunjukkan kandungan energi sampah kota yang ada di beberapa negara maju dan berkembang. Nilai kalor sampah di negara berkembang relatif lebih rendah dibandingkan dengan negara maju. Hal ini tentunya dipengaruhi oleh karakteristik sampahnya dengan biasanya di negara berkembang komponen sampah organiknya lebih tinggi, sementara kontribusinya terhadap nilai kalor tidak terlalu besar [10]. Sedangkan di negara maju, komponen seperti sampah plastik lebih dominan dengan nilai kalor plastik sangat tinggi.

Tabel 2. Nilai kalor sampah kota di beberapa negara maju dan berkembang [10]

	Negara	Nilai kalor (kcal/kg)
Negara Berkembang	Bangladesh	717
	China	1200-1600
	India	800-1100
	Malaysia	1500-2600
	Sri Lanka	950-1250
	Thailand	500-1500
Negara Maju	Jepang	2000-2200
	Korea Selatan	2600-3000
	Inggris (UK)	2200-3000

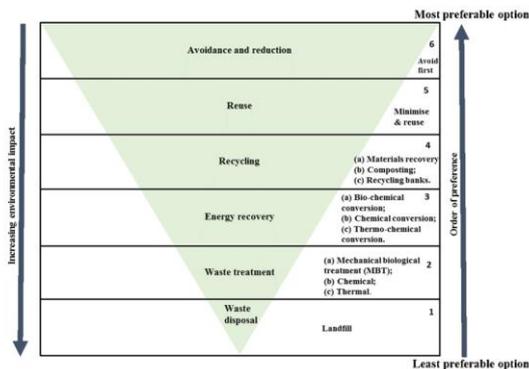
Besarnya nilai kalor untuk tiap jenis sampah dapat dilihat di [Tabel 3](#). Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa plastik memiliki kandungan energi paling tinggi dibanding dengan yang lainnya. Beberapa negara maju yang umumnya komposisi sampah plastiknya tinggi, pada akhirnya akan mempunyai nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan dengan negara berkembang seperti yang ditunjukkan oleh [Tabel 2](#). Sementara itu untuk sampah organik yang umumnya didominasi oleh sampah sisa makanan mempunyai nilai kalor yang paling rendah, dengan jenis sampah ini sangat mendominasi komposisi sampah di negara berkembang. Tingginya nilai kalor sampah plastik disebabkan karena bahan dasar untuk pembuatan plastik yang berasal dari minyak bumi.

Tabel 3. Nilai kalor beberapa jenis material sampah kota [11].

Material sampah	Nilai kalor (kcal/kg)
Kertas	3317
Plastik	5946
Kain tekstil	3002
Sampah makanan	2428
Sampah daun/ranting	4694
Karet	5545

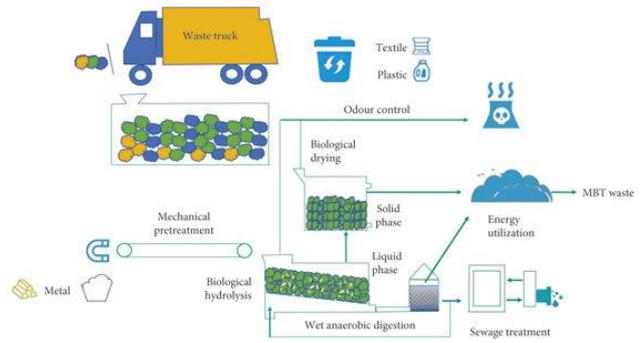
TEKNOLOGI PENGOLAHAN SAMPAH

Saat ini ada banyak teknologi yang bisa digunakan untuk mengolah sampah menjadi produk yang bermanfaat. Pemanfaatan teknologi pengolahan sampah dapat mengikuti hierarki pengelolaan sampah seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3. Secara umum teknologi ini dikelompokkan menjadi dua kategori utama yaitu : perlakuan mekanis dan biologi (*mechanical biological treatment-MBT*), dan perlakuan termal, dengan beberapa sub-kategori di dalamnya [6]. Pengelompokan ini sangat penting dalam pengelolaan sampah dari perspektif teknologi walaupun nantinya harus disesuaikan dengan kondisi lokal masing-masing wilayah.



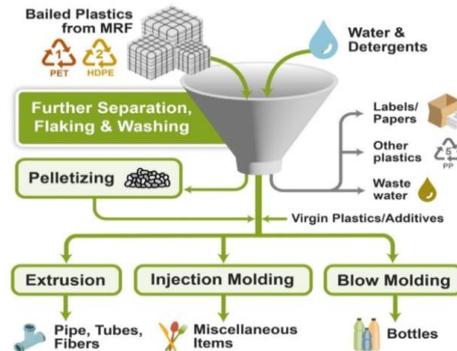
Gambar 3. Hierarki pengelolaan sampah dan opsi pengolahannya [6]

Skema proses MBT secara umum ditunjukkan oleh Gambar 4. Teknologi MBT dapat digunakan secara mandiri atau bisa juga dikombinasikan dengan metode lain seperti insinerasi dan *landfilling*. Sistem MBT terdiri dari pemrosesan secara mekanis (*mechanical pretreatment*), hidrolisis secara biologi (*biological hydrolysis*), digestasi anaerobik basah (*wet anaerobic digestion*), pengeringan secara biologi (*biological drying*), pemanfaatan energi, kontrol *odor* dan *sewage treatment* [12]. Sistem ini dapat memisahkan beberapa material seperti plastik, karton, kain tekstil dan logam untuk kemudian didaur-ulang menjadi produk turunan berikutnya.



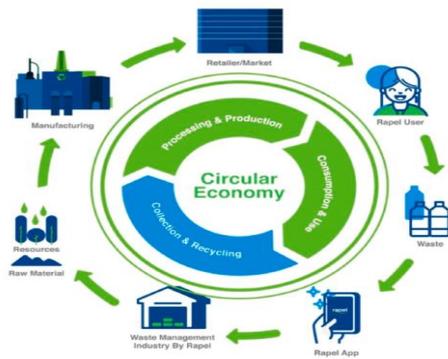
Gambar 4. Proses mekanis dan biologi pengolahan sampah [12]

Pada tingkatan hierarki pengelolaan sampah, opsi daur-ulang (*recycling*) menjadi bagian penting dalam tata kelola sampah di Indonesia. Beberapa jenis sampah yang mempunyai nilai keekonomian tinggi seperti plastik, dapat didaur-ulang menjadi produk plastik kembali (*materials recovery*) dengan kualitas yang lebih rendah. Daur-ulang ini melibatkan proses pemisahan, pencacahan, pencucian, dan kemudian dilelehkan dan dicetak dengan alat ekstruder untuk dibentuk menjadi produk yang diinginkan [13]. Skema proses daur-ulang sampah plastik telah ditunjukkan oleh Gambar 5. Produk baru dapat dihasilkan dengan proses dicetak menggunakan metode ekstrusi, injeksi maupun *blowing*.



Gambar 5. Skema proses daur-ulang sampah plastik menjadi produk baru [13].

Di era industri 4.0 seperti saat ini, penggunaan teknologi digitalisasi pengelolaan sampah menjadi sangat penting untuk mengefisienkan proses mulai dari pengumpulan sampah hingga pengolahannya menjadi produk turunan sampah. Beberapa aplikasi telah dikembangkan untuk pengelolaan sampah seperti RAPEL yang telah dijalankan di kota Yogyakarta [14]. Aplikasi ini diharapkan menjadi bagian penggerak ekonomi sirkuler dalam pengelolaan sampah seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Aplikasi ini mempertemukan antara pelanggan sebagai pembuang sampahnya dan pengepul sampah yang akan mengambil dan mengolahnya.



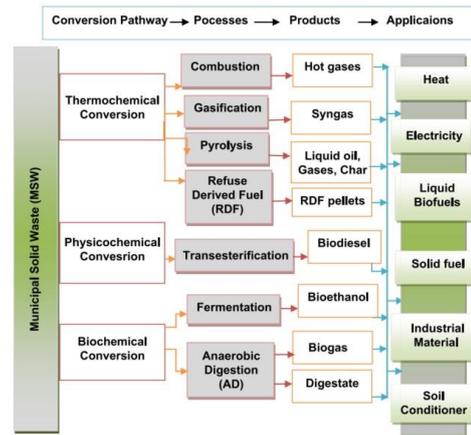
Gambar 6. Mekanisme kerja aplikasi RAPEL di industri daur-ulang sampah [14].

SAMPAH MENJADI SUMBER ENERGI

Ada beberapa teknologi yang umum digunakan untuk memusnahkan sampah dengan mengonversinya menjadi energi ataupun produk yang mempunyai nilai tambah ekonomi seperti ditunjukkan pada **Gambar 7**. [15]. Pemusnahan sampah tanpa menghasilkan produk turunan tentunya sangat disayangkan, oleh karena itu upaya produksi energi dan produk lainnya dari proses teknologi tersebut menjadi strategi yang menjanjikan di masa depan. Penggunaan teknologi tersebut memberikan dua keuntungan sekaligus yaitu produksi energi dan pemusnahan sampah secara bersamaan.

Konsep pemanfaatan sampah atau yang lebih dikenal dengan istilah *waste biorefinery* secara umum ada tiga cara utama yaitu proses termal (*thermochemical conversion*), proses biologi (*biochemical conversion*), dan proses fisika-kimia (*physicochemical conversion*). Proses konversi secara termal menggunakan suhu tinggi hingga ratusan derajat celcius untuk mengubah sampah menjadi energi dalam bentuk listrik maupun panas. Pada penggunaan teknologi termal, ada tiga teknologi utama yang digunakan yaitu insinerasi (*incineration*), gasifikasi (*gasification*) dan pirolisis (*pyrolysis*).

Pada proses biologi, sampah organik diubah menjadi bahan bakar cair atau gas menggunakan bakteri atau bioaktivator yang bertugas menguraikan sampah hingga terdekomposisi menjadi produk turunan seperti bioetanol dan biogas. Sementara itu proses fisika-kimia menggunakan campuran kimia tertentu untuk mengubah sampah menjadi bahan bakar cair seperti proses transesterifikasi (*transesterification*) dengan produk akhirnya berupa biodiesel.



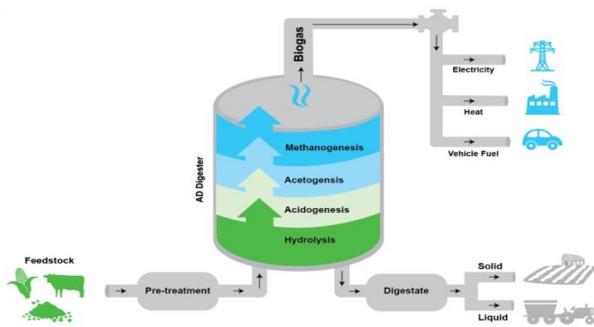
Gambar 7. Beberapa macam sistem konversi sampah menjadi sumber energi [15].

Pada proses biologi, sampah organik diubah menjadi bahan bakar cair atau gas menggunakan bakteri atau bioaktivator yang bertugas menguraikan sampah hingga terdekomposisi menjadi produk turunan seperti bioetanol dan biogas. Sementara itu proses fisika-kimia menggunakan campuran kimia tertentu untuk mengubah sampah menjadi bahan bakar cair seperti proses transesterifikasi (*transesterification*) dengan produk akhirnya berupa biodiesel.

Ada dua skema utama pada proses biologi yaitu fermentasi dan pencernaan anaerob/*anaerobic digestion* (AD). Kedua skema tersebut diperuntukkan khusus untuk sampah organik yang mengandung biomassa. Proses fermentasi akan menghasilkan bioetanol yang nantinya dapat digunakan untuk campuran bensin. Teknologi fermentasi untuk produksi bioetanol awalnya menggunakan bahan baku biomassa seperti tebu, gandum, singkong, dan lain-lain. Beberapa negara sudah memproduksi massal seperti di negara Brasil dengan bioetanol tebu. Proses fermentasi pada sampah organik juga telah dilakukan seperti sampah dari pasar buah. Namun demikian, untuk sampah kota yang sangat heterogen, teknologi ini menjadi sangat sulit untuk diterapkan karena harus dilakukan proses pemisahan. Lamanya waktu proses fermentasi juga menjadi kendala tersendiri ketika timbunan sampah semakin meningkat.

Proses pencernaan anaerob (AD), yang merupakan dasar dari reaktor biogas yaitu proses pemecahan bahan organik oleh aktivitas bakteri metanogenik dan bakteri asidogenik pada kondisi tanpa udara. Bakteri ini secara alami terdapat dalam limbah yang mengandung bahan organik, seperti kotoran binatang, manusia, dan sampah organik rumah tangga. Proses anaerob dapat berlangsung di bawah kondisi lingkungan yang luas meskipun proses yang optimal hanya terjadi pada kondisi yang terbatas. Pembentukan biogas meliputi tiga tahapan proses yaitu

hidrolisis, pengasaman, dan metanogenik seperti ditunjukkan oleh Gambar 8.



Gambar 8. Skema proses anaerobic digestion (AD) sebagai penghasil biogas untuk sumber energi [16].

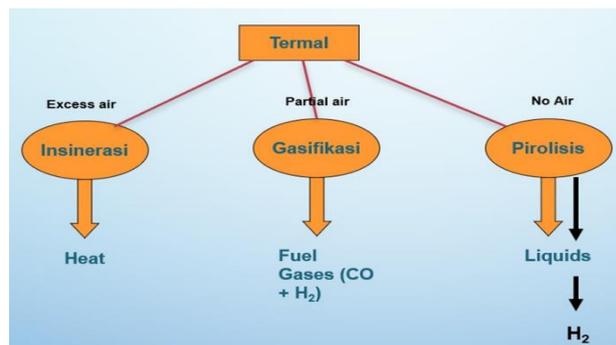
TEKNOLOGI TERMAL

Dengan pertimbangan waktu pemrosesan sampah, ada teknologi yang relatif cepat dibandingkan dengan yang lainnya, yaitu teknologi konversi sampah menjadi sumber energi. Dari sekian banyak sistem konversi sampah menjadi energi, teknologi termal merupakan proses yang paling cepat dan meninggalkan residu yang paling sedikit. Beberapa teknologi termal dapat diterapkan diantaranya pembakaran/insinerasi, gasifikasi dan pirolisis. Sehingga diibaratkan sampah datang langsung bisa dimusnahkan. Untuk proses yang lebih lengkap dengan adanya pre-treatment atau pengkondisian *feedstock*, diperlukan waktu sekitar 5 hari, jauh lebih cepat dibanding proses lain yang membutuhkan waktu mingguan.

Dari sisi jenis sampahnya, hampir semua sampah bisa dimusnahkan, kecuali hanya sampah inert seperti logam, kaca, batu dan tanah. Sementara kebanyakan proses lain hanya diperuntukan untuk satu jenis sampah, misalnya sampah organik. Kemudian dari sisi residu, proses termal hanya menyisakan sekitar 10% residu dalam bentuk abu atau *char* tergantung dari prosesnya. Dengan keunggulan inilah makanya proses termal telah digunakan di banyak negara, baik negara maju maupun berkembang.

Secara umum, ada tiga skema utama teknologi termal sampah menjadi energi atau listrik yang banyak digunakan yaitu insinerasi/pembakaran, gasifikasi dan pirolisis. Perbedaan utama dari ketiga teknologi ini terletak pada suplai udara atau oksigen ke dalam prosesnya seperti ditunjukkan pada Gambar 9. Proses insinerasi menggunakan udara berlebih di dalam proses pembakaran hingga semua komponen sampah terbakar semuanya. Sedangkan gasifikasi menggunakan udara terbatas/terkontrol sehingga dihasilkan bahan bakar gas (*producer gas/synthetic gas/syngas*) yang siap digunakan untuk bahan bakar pada *gas engine* maupun mesin diesel. Sementara pirolisis adalah proses termal suhu tinggi tanpa membutuhkan udara, sehingga dalam proses ini reaktor tertutup rapat. Pada proses ini terjadi reaksi perengkahan

dengan komponen sampah akan terpecah struktur kimianya pada suhu tinggi.



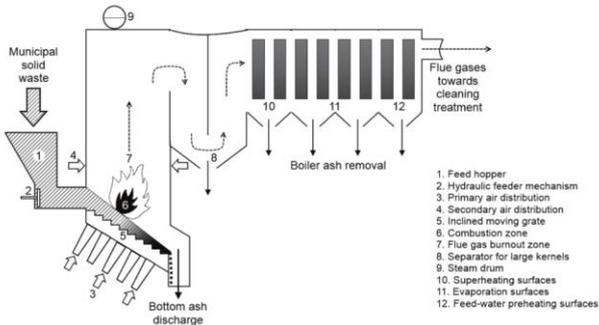
Gambar 9. Skema teknologi termal konversi sampah menjadi energi atau listrik.

Insinerasi/Pembakaran

Teknologi termal pertama yang telah dikembangkan sejak dahulu kala adalah teknologi pembakaran atau insinerasi, dengan sampah dibakar untuk menghasilkan energi panas yang digunakan untuk memanaskan air di dalam *boiler* untuk dijadikan uap sebagai penggerak turbin untuk memutar generator penghasil listrik. Pada prinsipnya ada 4 tahapan proses insinerasi yaitu proses *pre-treatment*, proses pembakaran, proses *energy recovery*, dan penanganan gas buang. Teknologi pembakaran saat ini sudah sangat *mature* dan telah digunakan di banyak negara. Dengan teknologi ini, sampah tereduksi hingga sembilan puluh persen dan hanya tersisa abu yang jumlahnya tinggal sepuluh persen. Bahkan tumpukan sampah lama yang sudah menggunung di lokasi TPA juga bisa dimusnahkan dalam waktu singkat. Dari pengalaman kunjungan dan riset yang dilakukan penulis, emisi hasil pembakaran dapat diminimalkan hingga di bawah ambang batas emisi yang diizinkan. Beberapa peralatan penyaring polutan dipasang pada sistem insinerator untuk meminimalkan emisi yang dihasilkannya.

Untuk skala besar, ada dua teknologi utama yang dikembangkan untuk sistem pembakaran sampahnya, yaitu tipe *moving grate stocker* dan *fluidized bed*. Tipe *grate stocker* merupakan tipe awal yang dikembangkan dengan menggunakan sistem pembakaran sampah pada bidang yang dimiringkan sehingga sampah akan bergerak perlahan-lahan ke arah bawah sambil dibakar. Ada celah-celah udara dari bawah yang akan dihembuskan ke atas untuk membantu proses pembakaran. Kemudian setelah dibakar, di bagian atas ada hembusan udara tambahan untuk membantu proses pembakaran menjadi lebih sempurna untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi polusi ke lingkungan. Sebagian besar pengolahan sampah menjadi sumber energi/listrik menggunakan tipe ini. Ada setidaknya 87% di Eropa dan 80% di dunia telah menggunakan tipe *moving grate stocker* ini seperti pada

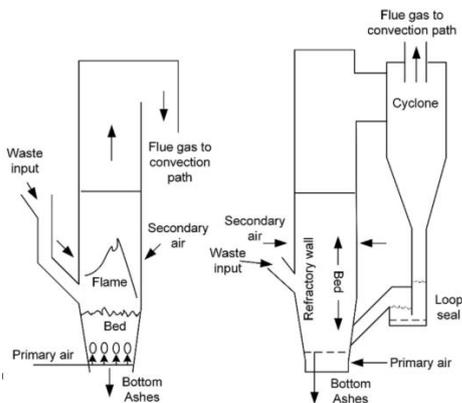
Gambar 10. [17]. Hasil studi Garcia dkk. [18] di kota Mexico menyebutkan bahwa dengan penduduk sekitar 3 juta jiwa, maka dapat menghasilkan listrik sekitar 58,9 MW yang bisa berkontribusi hingga mencatat 4,3% dari kebutuhan nasional negara mereka.



Gambar 10. Skema teknologi *moving grate stoker* [17].

Tipe yang kedua yaitu *fluidized bed* atau unggun terfluidisasi dengan sampah dicacah menjadi ukuran kecil kemudian dimasukkan ke dalam reaktor dan dihembus udara sehingga akan terbang atau terfluidisasi sekaligus terbakar. Teknologi ini sedikit lebih maju dari yang sebelumnya dan diklaim lebih efisien. Walaupun sebenarnya kedua teknologi tersebut terus bersaing dengan kelebihan masing-masing. Ada dua jenis untuk reaktor tipe ini, yaitu *bubbling fluidized bed* (BFB) dan *circulating fluidized bed* (CFB) seperti ditunjukkan oleh **Gambar 11**. Namun demikian, teknologi ini memiliki beberapa kekurangan diantaranya yaitu perlunya preparasi sampah dan konsumsi material *bed* [19].

Sebelum sampah dibakar di ruang bakar ini, sampah ditampung di dalam bunker yang letaknya di sebelahnya persis ruang bakar ini. Tujuannya adalah agar supaya ada proses pengeringan awal sampah akibat terkena efek panas ruang bakar sebelum akhirnya juga dibakar di ruang bakar. Di dalam bunker ini, sampah didiamkan selama kurang lebih 3-5 hari untuk memaksimalkan proses pengeringan.

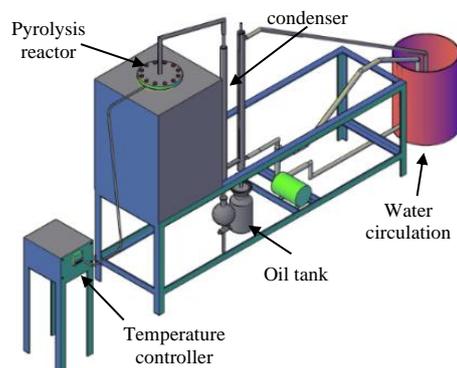


Gambar 11. Skema teknologi *Bubbling Fluidized Bed* (BFB-kiri) dan *Circulating Fluidized Bed* (CFB-kanan) [19].

Pirolisis

Pirolisis merupakan proses yang melibatkan degradasi termal bahan-bahan seperti plastik maupun biomassa dan sampah dengan pemanasan tanpa melibatkan oksigen di dalamnya. Proses pirolisis ini secara umum berlangsung pada temperatur antara 500-800°C [20]. Produk yang dihasilkan dari pirolisis ini dapat berupa fraksi gas, cair dan residu padatan/arang, yang mempunyai nilai kalor tinggi dan dapat digunakan di industri [21]. Beberapa parameter dapat mempengaruhi produk pirolisis seperti temperatur, komposisi elementer, dan katalis. Namun demikian, komposisi sampah yang beragam menjadikan proses pirolisis berlangsung lebih kompleks. Pirolisis sampah dan biomassa masih banyak dilakukan pada skala laboratorium. Hasil pirolisis berupa produk cair masih kental dan kotor sehingga masih diperlukan proses pemurnian dan *refinery* lebih lanjut untuk nantinya layak digunakan. Oleh karena itu, teknologi pirolisis banyak berkembang untuk material tunggal dan jenis tertentu seperti plastik dan karet/ban bekas.

Pada pirolisis plastik, material akan meleleh dan kemudian berubah menjadi gas. Pada kondisi itu, rantai panjang hidrokarbon terengkahkan menjadi rantai pendek. Selanjutnya proses pendinginan dilakukan pada gas pirolisis tersebut sehingga akan mengalami proses kondensasi dan terbentuklah cairan. Produk cairan inilah yang kemudian disebut sebagai bahan bakar minyak (BBM), baik berupa bensin maupun bahan bakar diesel. Salah satu contoh skema proses pirolisis sampah plastik dan komponennya ditunjukkan oleh **Gambar 12**.



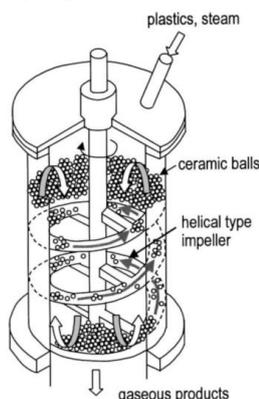
Gambar 12. Skema peralatan pirolisis sampah plastik [22].

Proses pirolisis yang sudah masuk pada skala komersial umumnya untuk bahan baku sampah plastik dan ban bekas. Ada beberapa jenis plastik yang digunakan dalam proses pirolisis dan hal tersebut akan sangat berpengaruh terhadap kualitas minyak yang dihasilkan seperti distribusi atom karbon, flash point, pour point dan bilangan setana atau oktana. Tiap jenis plastik tersebut mempunyai struktur kimia yang berbeda dan oleh karenanya mempunyai mekanisme reaksi yang berbeda. Selain itu, komposisi

berdasarkan analisis proksimat yang terdiri dari kadar air, karbon terikat, *volatile matter*, dan abu juga sangat berpengaruh terhadap hasil pirolisis. *Volatile matter* dan abu adalah faktor utama yang berpengaruh terhadap jumlah minyak yang dihasilkan [23]. Selain itu, kuantitas dan kualitas produk minyak hasil pirolisis juga dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu tipe reaktor, suhu, tekanan, katalis dan waktu tinggal [24].

Secara umum, penelitian konversi sampah plastik menjadi bahan bakar cair dengan teknologi pirolisis dikelompokkan menjadi dua, yaitu proses non katalis (termal) dan yang menggunakan katalis [25]. Penggunaan katalis diharapkan dapat menurunkan temperatur reaksi, meningkatkan laju dekomposisi dan kualitas produk. Beberapa macam jenis katalis telah diuji oleh para peneliti seperti zeolit, silika alumina dan katalis FCC (*fluid catalytic cracking*) [26]. Namun demikian, penggunaan katalis mengakibatkan kenaikan biaya operasional proses, sehingga tidak cocok dikembangkan di negara berkembang seperti Indonesia dan tidak efisien untuk skala kecil. Oleh karena itu, pengembangan pirolisis non katalis dengan modifikasi proses dan desain reaktor yang inovatif menjadi tantangan tersendiri bagi para peneliti.

Permasalahan di dalam pirolisis non katalis adalah produksi *wax* dalam jumlah besar dan lamanya waktu proses. Wajima dkk. [27] telah mengembangkan pirolisis plastik dengan sistem pendingin *reflux* yang akan mengembalikan *wax* kembali ke dalam reaktor. Sejumlah peneliti mengembangkan sistem pirolisis dua step dengan step pertama adalah pelelehan plastik menggunakan reaktor *screw* dan step kedua adalah proses pirolisis menggunakan reaktor *fixed bed* [28]. Berbagai usaha juga telah dikembangkan untuk meningkatkan laju perpindahan panas di dalam reaktor, diantaranya-Nya menggunakan bola-bola keramik panas seperti pada Gambar 13. [29]. Dengan metode ini, waktu pirolisis dapat dipersingkat karena adanya peningkatan luas permukaan kontak antara bola keramik panas dengan plastik cair.



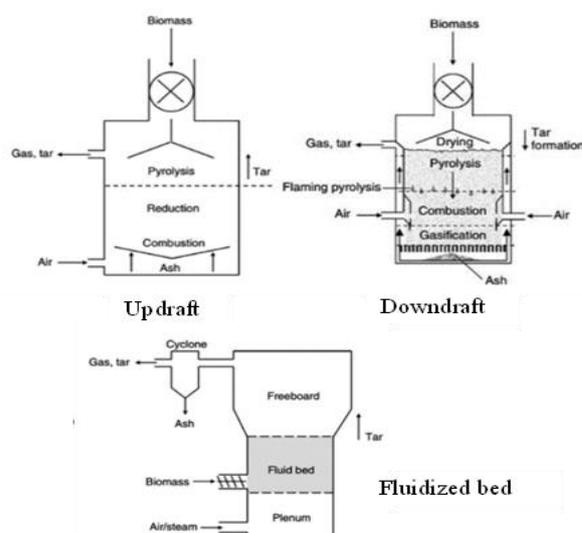
Gambar 13. Skema proses pirolisis menggunakan bola keramik sebagai medium pemanasan [29].

Penelitian mengenai co-pirolisis sampah plastik dan oli bekas telah dilakukan oleh beberapa peneliti [30], [31], [32], [33]. Kandungan nafta dan parafin pada produk cairnya lebih tinggi dibandingkan dengan pirolisis terpisah [30]. Hasil logam berat yang terdeteksi pada produk cairnya juga lebih rendah dibandingkan dengan pirolisis tunggal oli bekas. Secara umum, banyak peneliti mengkaji co-pirolisis sampah plastik dengan material lain seperti biomassa [34], [35], [36], minyak jelantah [37] dan batubara [38] untuk melihat efek interaksi kedua material ketika proses berlangsung. Bozkurt dkk. [39] telah meneliti co-pirolisis LDPE (*low density polyethylene*) dengan *oil shale* dan mengamati efek seenergetiknya dengan melihat kualitas produk minyaknya. Hasilnya menunjukkan bahwa tar yang dihasilkan lebih tinggi dibanding dengan pirolisis individual.

Gasifikasi

Gasifikasi adalah suatu metode untuk mengkonversi sampah padat menjadi bahan bakar gas melalui proses termal (termokimia) dengan pasokan udara terbatas pada suatu reaktor yang disebut dengan *gasifier* [40]. Ada beberapa tipe *gasifier* yang umum digunakan yaitu tipe *updraft*, *downdraft*, dan *fluidized bed*. *Gasifier* tipe *downdraft* adalah salah satu tipe yang mempunyai keunggulan dalam penggunaan skala kecil dengan konstruksi yang sederhana, kandungan tar pada *syngas* yang rendah dan dapat dikoneksikan dengan mesin diesel atau *gas engine* untuk menghasilkan listrik [41].

Keuntungan gasifikasi dibandingkan dengan pembakaran secara konvensional adalah efisiensi yang tinggi untuk pembangkitan energi skala kecil (< 1 MW). Beberapa tipe gasifikasi yaitu *updraft*, *downdraft* dan *fluidized bed* ditunjukkan oleh Gambar 14.



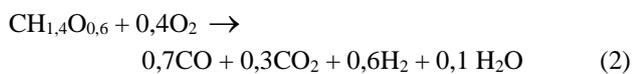
Gambar 14. Beberapa tipe reaktor gasifikasi [41].

Produk gasifikasi adalah bahan bakar gas yang komponen utamanya terdiri dari H₂, CO, CH₄, dan CO₂. Produk ini dapat digunakan secara langsung untuk pembakaran, dihubungkan dengan *dual fuel engine* untuk produksi listrik [42], [43] ataupun diintegrasikan ke *fuel cell* dengan memanfaatkan hidrogennya [44]. Perbaikan performa gasifikasi untuk meningkatkan nilai kalor *producer gas* terus dilakukan dengan cara optimalkan beberapa parameter.

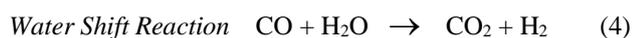
Proses gasifikasi melibatkan beberapa reaksi secara bersamaan dan relatif kompleks. Prinsip reaksi global gasifikasi adalah sebagai berikut [45] :



Namun demikian, terdapat energi yang lebih banyak terkandung dalam CO dan H₂ dibandingkan dengan sampah (reaksi endotermis), sehingga diperlukan energi dari luar dan menyebabkan prosesnya menjadi lebih kompleks. Dalam praktiknya, oksigen lebih harus ditambahkan untuk proses ini, sehingga akan menghasilkan CO₂ dan H₂O berdasarkan reaksi :



Reaksi global tersebut merupakan gabungan dari beberapa reaksi elementer. Prinsip reaksi elementer gasifikasi adalah sebagai berikut :



Untuk dapat menghasilkan listrik dari sampah, maka alat utama *gasifier* harus didukung beberapa peralatan lainnya untuk menjamin kualitas dan kontinuitas produksi listrik jangka panjang. Untuk itulah kemudian *gasifier* dirangkai dengan sistem kondisi gas yang terdiri dari *gas cooling* dan *gas cleaning* sebelum masuk ke dalam mesin. *Gas cooling system* berfungsi untuk mendinginkan *syngas* yang keluar dari *gasifier*. Sementara itu *gas cleaning system* bekerja untuk membersihkan partikel dan tar yang masih tersisa di *syngas* hingga betul-betul bersih. Untuk menarik *syngas* agar bisa masuk ke dalam mesin, maka digunakan blower hisap yang sekaligus berfungsi untuk mengatur masukan udara dalam *gasifier*.

Salah satu parameter penting dalam proses gasifikasi adalah tipe reaktor yang digunakan. Tipe reaktor akan mempengaruhi mekanisme dan proses reaksinya sehingga akan mempengaruhi *syngas* yang dihasilkan dan efisiensi prosesnya. Salah satu mekanisme reaksinya adalah bagaimana kontak antara padatan sampah dengan udara di dalam reaktor. Beberapa tipe reaktor akan dijelaskan

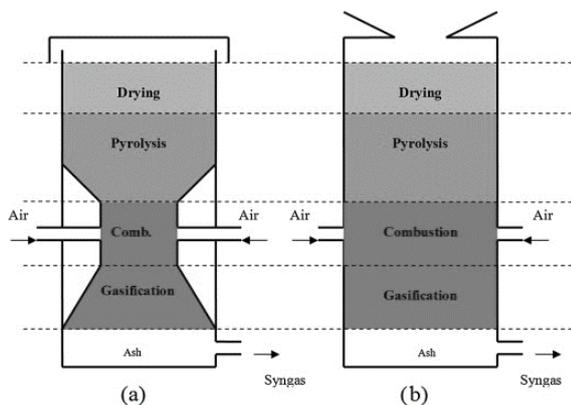
berikut ini meliputi tipe reaktor yang banyak digunakan yaitu tipe *updraft*, *downdraft*, dan *fluidized bed*.

Pada tipe ini sumber panas terletak di bawah bahan bakar seperti tampak dalam Gambar 14. Dalam gambar ini terlihat aliran udara bergerak ke zona gasifikasi di bagian bawah yang menyebabkan asap pirolisis yang dihasilkan melewati zona gasifikasi yang panas. Hal ini membuat tar yang terkandung dalam asap terbakar, sehingga gas yang dihasilkan oleh reaktor ini lebih bersih. Keuntungan reaktor tipe ini adalah reaktor ini dapat digunakan untuk operasi gasifikasi yang berkesinambungan dengan menambahkan bahan bakar melalui bagian atas reaktor. Namun untuk operasi yang berkesinambungan dibutuhkan sistem pengeluaran abu yang baik, agar bahan bakar bisa terus ditambahkan ke dalam reaktor.

Gasifikasi tipe *downdraft* sangat cocok diterapkan untuk skala kecil [46]. Secara umum, kapasitas *gasifier* tipe *downdraft* berkisar antara 10 kW – 1 MW (Basu, 2014). Beberapa aplikasi dari *gasifier* tipe ini untuk pembangkitan listrik berbahan baku sampah, kayu, limbah pertanian dan lain-lain [47]. *Gasifier* tipe ini memiliki beberapa keunggulan diantara-Nya mudah dalam fabrikasi dan pengoperasian, kadar tar yang rendah. Namun demikian, tipe ini juga mempunyai beberapa kelemahan yaitu terjadinya penyumbatan dan hanya cocok untuk sampah dengan kadar air rendah. Untuk mengatasi kelemahan tersebut, beberapa modifikasi telah dilakukan mulai dari suplai bahan bakar, sistem suplai udara, sistem resirkulasi gas, dan lain-lain [48]. Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA) Putri Cempo Surakarta telah mengadopsi teknologi *gasifier* tipe *downdraft* ini dengan kapasitas totalnya mencapai 5 MW.

Ada dua model utama dari *gasifier* tipe *downdraft* ini yaitu *gasifier* model dengan throat (*Imbert/throated*) dan model tanpa throat (*stratified/throatless/open core*). Kedua model *gasifier* ini telah banyak digunakan untuk gasifikasi biomassa dan sampah (*RDF-refuse derived fuel*) dengan media agen gasifikasinya berupa udara, oksigen maupun steam [49].

Gasifier model *Imbert* sangat cocok untuk *feedstock* dengan kandungan abu dan kadar air masing-masing kurang dari 5% dan 20%. Adanya leher (*throat*) mengakibatkan terjadinya pencampuran gas secara maksimum pada kondisi temperatur tinggi sehingga bisa mengurangi kadar tar karena telah terrengkahkan pada zona tersebut. Namun demikian, *gasifier* model ini memiliki efisiensi yang lebih rendah karena sejumlah panas dibawa keluar melalui *syngas* pada suhu tinggi.



Gambar 15. Skema proses gasifikasi menggunakan reaktor tipe (a) imbert *downdraft gasifier* dan (b) *stratified downdraft gasifier* [50].

Gasifier tipe tanpa leher (*stratified*) didesain untuk menghilangkan hambatan pada bagian pengecilan reaktor dengan di tempat tersebut terjadi potensi aliran sampah/biomassa berhenti dan terkunci. *Gasifier* tipe *stratified* ini cocok untuk umpan dengan kadar abu maksimalnya 20%. Model ini juga lebih mudah dari sisi fabrikasi dan dapat diperbesar sesuai dengan kebutuhan seperti **Gambar 15**. Namun demikian, model tanpa *throat* ini mempunyai kelemahan berupa kadar tar yang lebih tinggi dikarenakan reaksi gasifikasi pada temperatur tinggi tidak terjadi seperti halnya pada model dengan *throat*.

KESIMPULAN

Kajian ini menganalisis beberapa teknologi alternatif yang dapat digunakan untuk mengolah sampah padat perkotaan menjadi sumber energi. Saat ini ada banyak teknologi yang bisa digunakan untuk mengolah sampah menjadi produk yang bermanfaat. Secara umum teknologi ini dikelompokkan menjadi dua kategori utama yaitu : perlakuan mekanis dan biologi (*mechanical biological treatment-MBT*), dan perlakuan termal, dengan beberapa sub-kategori di dalamnya. Dari sekian banyak alternatif, teknologi termal merupakan proses yang paling cepat dan meninggalkan residu yang paling sedikit. Beberapa teknologi termal dapat diterapkan diantaranya pembakaran/insinerasi, gasifikasi dan pirolisis. Teknologi insinerasi umumnya digunakan pada skala besar karena melibatkan proses yang menggunakan *boiler* dan turbin. Sementara gasifikasi bisa diterapkan pada skala yang lebih kecil dengan menggunakan mesin gas atau mesin diesel sebagai pembangkit listriknya. Gasifikasi tipe *downdraft* lebih cocok diterapkan dengan beberapa kelebihanannya, khususnya kadar tar yang lebih rendah. Sedangkan pirolisis lebih cocok untuk jenis sampah homogen dan tertentu seperti plastik dan ban bekas.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. Syamsiro, "Kajian Pemilihan Teknologi

Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTsa) ," Surakarta, May 2021.

- [2] M. Syamsiro, S. G. Herawan, and M. N. Aridito, "Potential of MSW and COVID-19 Medical Waste as Feedstocks for Gasification Process," in *Proceedings of the 2nd International Interdisciplinary Conference on Environmental Sciences and Sustainable Developments (IICSSD) 2022*, Palu: Atlantis Press, Jan. 2024, pp. 1–7.
- [3] Y. Ding *et al.*, "A review of China's municipal solid waste (MSW) and comparison with international regions: Management and technologies in treatment and resource utilization," *Journal of Cleaner Production*, vol. 293. Elsevier Ltd, Apr. 15, 2021. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126144.
- [4] S. N. M. Menikpura, J. Sang-Arun, and M. Bengtsson, "Assessment of environmental and economic performance of Waste-to-Energy facilities in Thai cities," *Renew Energy*, vol. 86, pp. 576–584, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.08.054.
- [5] K. A. Ayuba, L. A. Manaf, A. H. Sabrina, and S. W. N. Azmin, "Current Status of Municipal Solid Waste Management Practise in FCT Abuja," *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, vol. 5, no. 6, pp. 295–304, Jun. 2013, doi: 10.19026/rjees.5.5704.
- [6] H. O. Iyamu, M. Anda, and G. Ho, "A review of municipal solid waste management in the BRIC and high-income countries: A thematic framework for low-income countries," *Habitat International*, vol. 95. Elsevier Ltd, Jan. 01, 2020. doi: 10.1016/j.habitatint.2019.102097.
- [7] MEFI, "Solid waste composition based on waste sources," Ministry of Environment and Forestry Indonesia. Accessed: Jan. 12, 2024. [Online]. Available: <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/>
- [8] F. D. Qonitan, I. Wayan Koko Suryawan, and A. Rahman, "Overview of Municipal Solid Waste Generation and Energy Utilization Potential in Major Cities of Indonesia," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Apr. 2021. doi: 10.1088/1742-6596/1858/1/012064.
- [9] KLHK, "Komposisi sampah berdasarkan sumber dan jenis sampah Tahun 2022," Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- [10] A. Kumar and S. R. Samadder, "A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste," *Waste Management*, vol. 69. Elsevier Ltd, pp. 407–422, Nov. 01, 2017. doi: 10.1016/j.wasman.2017.08.046.
- [11] A. Sarwono *et al.*, "Refuse Derived Fuel for Energy Recovery by Thermal Processes. A Case Study in

- Depok City, Indonesia,” *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 88, no. 1, pp. 12–23, 2021, doi: 10.37934/arfmts.88.1.1223.
- [12] Q. Wang, Z. Zhang, M. Wang, and B. Wang, “Smart Management Platform for Landfilling of Waste after Mechanical Biological Treatment,” *Advances in Civil Engineering*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/5376066.
- [13] H. Li *et al.*, “Expanding plastics recycling technologies: chemical aspects, technology status and challenges,” *Green Chemistry*, vol. 24, no. 23. Royal Society of Chemistry, pp. 8899–9002, Sep. 14, 2022. doi: 10.1039/d2gc02588d.
- [14] T. A. Kurniawan, M. H. Dzarfan Othman, G. H. Hwang, and P. Gikas, “Unlocking digital technologies for waste recycling in Industry 4.0 era: A transformation towards a digitalization-based circular economy in Indonesia,” *J Clean Prod*, vol. 357, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131911.
- [15] O. K. M. Ouda, S. A. Raza, A. S. Nizami, M. Rehan, R. Al-Waked, and N. E. Korres, “Waste to energy potential: A case study of Saudi Arabia,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 61. Elsevier Ltd, pp. 328–340, Aug. 01, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2016.04.005.
- [16] Anonym, “Overview of Anaerobic Digestion for Municipal Solid Waste,” Oct. 2016. Accessed: Jan. 22, 2024. [Online]. Available: www.globalmethane.org
- [17] M. Cyranka and M. Jurczyk, “Energy Recovery from Municipal Waste based on Moving Grate Technology,” *Agricultural Engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 23–33, Apr. 2016, doi: 10.1515/agriceng-2016-0003.
- [18] P. E. Escamilla-García, R. H. Camarillo-López, R. Carrasco-Hernández, E. Fernández-Rodríguez, and J. M. Legal-Hernández, “Technical and economic analysis of energy generation from waste incineration in Mexico,” *Energy Strategy Reviews*, vol. 31, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.esr.2020.100542.
- [19] B. Leckner and F. Lind, “Combustion of municipal solid waste in fluidized bed or on grate – A comparison,” *Waste Management*, vol. 109. Elsevier Ltd, pp. 94–108, May 15, 2020. doi: 10.1016/j.wasman.2020.04.050.
- [20] M. Syamsiro, “Kajian Pengaruh Penggunaan Katalis Terhadap Kualitas Produk Minyak Hasil Pirolisis Sampah Plastik,” *Jurnal Teknik*, vol. 5, no. 1, pp. 47–56, Apr. 2015.
- [21] Y. Du, T. Ju, Y. Meng, T. Lan, S. Han, and J. Jiang, “A review on municipal solid waste pyrolysis of different composition for gas production,” *Fuel Processing Technology*, vol. 224. Elsevier B.V., Dec. 15, 2021. doi: 10.1016/j.fuproc.2021.107026.
- [22] M. Syamsiro, Z. Mufrodi, R. Rafly, and S. Machmud, “Energy Recovery from Food Packaging Plastics by Thermal and Catalytic Pyrolysis Processes,” *Universal Journal of Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 51–58, Jan. 2020, doi: 10.13189/ujme.2020.080107.
- [23] J. Aguado, D. P. Serrano, G. San Miguel, M. C. Castro, and S. Madrid, “Feedstock recycling of polyethylene in a two-step thermo-catalytic reaction system,” *J Anal Appl Pyrolysis*, vol. 79, no. 1, pp. 415–423, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2006.11.008>.
- [24] S. D. Anuar Sharuddin, F. Abnisa, W. M. A. Wan Daud, and M. K. Aroua, “A review on pyrolysis of plastic wastes,” *Energy Conversion and Management*, vol. 115. Elsevier Ltd, pp. 308–326, May 01, 2016. doi: 10.1016/j.enconman.2016.02.037.
- [25] B. Kunwar, H. N. Cheng, S. R. Chandrashekar, and B. K. Sharma, “Plastics to fuel: a review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54. Elsevier Ltd, pp. 421–428, Feb. 01, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.10.015.
- [26] J.-L. Wang and L.-L. Wang, “Catalytic Pyrolysis of Municipal Plastic Waste to Fuel with Nickel-loaded Silica-alumina Catalysts,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 33, no. 21, pp. 1940–1948, Aug. 2011, doi: 10.1080/15567030903436814.
- [27] W. Takaaki, Z. H. Zar, and N. Hideki, “Oil production from polyethylene plastics by thermal pyrolysis using a reflux condenser,” in *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publications Ltd, 2014, pp. 842–845. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1025-1026.842.
- [28] J. Walendziewski, “Continuous flow cracking of waste plastics,” *Fuel Processing Technology*, vol. 86, no. 12–13, pp. 1265–1278, Aug. 2005, doi: 10.1016/j.fuproc.2004.12.004.
- [29] T. Masuda, T. Kushino, T. Matsuda, S. R. Mukai, K. Hashimoto, and S.-I. Yoshida, “Chemical recycling of mixture of waste plastics using a new reactor system with stirred heat medium particles in steam atmosphere,” 2001.
- [30] S. Uçar, A. R. Özkan, and S. Karagöz, “Co-pyrolysis of waste polyolefins with waste motor oil,” *J Anal Appl Pyrolysis*, vol. 119, pp. 233–241, May 2016, doi: 10.1016/j.jaap.2016.01.013.
- [31] S. Breyer, L. Mekhitarian, B. Rimez, and B. Haut, “Production of an alternative fuel by the co-pyrolysis of landfill recovered plastic wastes and used lubrication oils,” *Waste Management*, vol. 60, pp. 363–374, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2016.12.011.

- [32] M. Syamsiro, M. A. Saputro, J. Winarno, B. Megaprastio, and Z. Mufrodi, "Studi Co-pirolisis Plastik HDPE dan Oli Bekas Menjadi Bahan Bakar Cair Alternatif," in *Prosiding Seminar Nasional Diseminasi Hasil Penelitian (deHAP) 2021*, Yogyakarta: Universitas Janabadra, Dec. 2021, pp. 331–337.
- [33] M. Syamsiro, B. Megaprastio, J. Winarno, M. Saputro, and Z. Mufrodi, "Produksi Bahan Bakar Minyak Alternatif Dari Pirolisis Plastik Polipropilen dan Oli Bekas," in *Prosiding Seminar Nasional Diseminasi Hasil Penelitian (deHAP) 2021*, Yogyakarta: Universitas Janabadra, Dec. 2021, pp. 317–325.
- [34] S. A. Y. Shah, M. Zeeshan, M. Z. Farooq, N. Ahmed, and N. Iqbal, "Co-pyrolysis of cotton stalk and waste tire with a focus on liquid yield quantity and quality," *Renew Energy*, vol. 130, pp. 238–244, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.06.045.
- [35] N. I. Izzatie *et al.*, "Co-pyrolysis of rice straw and polypropylene using fixed-bed pyrolyzer," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Dec. 2016. doi: 10.1088/1757-899X/160/1/012033.
- [36] P. Lu, Q. Huang, A. C. (Thanos) Bourtsalas, Y. Chi, and J. Yan, "Synergistic effects on char and oil produced by the co-pyrolysis of pine wood, polyethylene and polyvinyl chloride," *Fuel*, vol. 230, pp. 359–367, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.05.072.
- [37] Y. Wang *et al.*, "Catalytic co-pyrolysis of waste vegetable oil and high density polyethylene for hydrocarbon fuel production," *Waste Management*, vol. 61, pp. 276–282, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2017.01.010.
- [38] S. Matali, N. A. Rahman, S. S. Idris, A. Alias, and M. Mohatar, "Characteristics of Malaysian Sub-Bituminous Coal and Waste HDPE Blends Via TGA," *J Teknol*, vol. 76, no. 10, pp. 21–26, 2015, [Online]. Available: www.jurnalteknologi.utm.my
- [39] P. A. Bozkurt, O. Tosun, and M. Canel, "The synergistic effect of co-pyrolysis of oil shale and low density polyethylene mixtures and characterization of pyrolysis liquid," *Journal of the Energy Institute*, vol. 90, no. 3, pp. 355–362, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.joei.2016.04.007.
- [40] A. R. Saleh, B. Sudarmanta, H. Fansuri, and O. Muraza, "Syngas production from municipal solid waste with a reduced tar yield by three-stages of air inlet to a downdraft gasifier," *Fuel*, vol. 263, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116509.
- [41] P. R. Bhoi, R. L. Huhnke, A. Kumar, S. Thapa, and N. Indrawan, "Scale-up of a downdraft gasifier system for commercial scale mobile power generation," *Renew Energy*, vol. 118, pp. 25–33, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.11.002.
- [42] G. Oh *et al.*, "Syngas production through gasification of coal water mixture and power generation on dual-fuel diesel engine," *Journal of the Energy Institute*, vol. 92, no. 2, pp. 265–274, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.01.009>.
- [43] L. I. Chaves *et al.*, "Small-scale power generation analysis: Downdraft gasifier coupled to engine generator set," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58. Elsevier Ltd, pp. 491–498, May 01, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.033.
- [44] S. P. Singh, B. Ohara, and A. Y. Ku, "Prospects for cost-competitive integrated gasification fuel cell systems," *Appl Energy*, vol. 290, p. 116753, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116753>.
- [45] X. Xiang, G. Gong, C. Wang, N. Cai, X. Zhou, and Y. Li, "Exergy analysis of updraft and downdraft fixed bed gasification of village-level solid waste," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 1, pp. 221–233, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.247>.
- [46] C. Gai and Y. Dong, "Experimental study on non-woody biomass gasification in a downdraft gasifier," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 6, pp. 4935–4944, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.031>.
- [47] G. Teixeira, L. Van de Steene, E. Martin, F. Gelix, and S. Salvador, "Gasification of char from wood pellets and from wood chips: Textural properties and thermochemical conversion along a continuous fixed bed," *Fuel*, vol. 102, pp. 514–524, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.05.039>.
- [48] A. A. P. Susastriawan, H. Saptoadi, and Purnomo, "Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76. Elsevier Ltd, pp. 989–1003, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2017.03.112.
- [49] A. Bhavanam and R. C. Sastry, "Biomass gasification process in downdraft fixed bed reactors A Review," *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, vol. 2, no. 6, pp. 425–433, 2011.
- [50] A. Z. Mendiburu, J. A. Carvalho, and C. J. R. Coronado, "Thermochemical equilibrium modeling of biomass downdraft gasifier: Stoichiometric models," *Energy*, vol. 66, pp. 189–201, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.022>.