

BAB II

TINJAUAN HAKIKAT OBJEK STUDI

2.1 Pengertian, Fungsi dan Manfaat Fasilitas *Waste to Energy*

2.1.1 Pengertian

Waste to energy adalah istilah yang dipergunakan untuk mendeskripsikan teknologi yang dapat mengubah limbah organik yang tidak lagi dapat didaur ulang menjadi wujud energi yang dapat dipergunakan antara lain berupa panas/uap dan listrik. *Waste to energy* dapat terjadi melalui sejumlah proses seperti insinerasi, gasifikasi, pirolisis, pembusukan anaerobik dan pemulihan gas pada tempat pembuangan akhir. Pada umumnya, istilah *waste to energy* biasa digunakan untuk merujuk teknologi insinerasi yaitu proses pembakaran limbah pada suhu *ultra-high* sehingga dapat menghasilkan energi berupa panas/uap dan listrik.¹⁰

2.1.2 Dampak Positif dan Negatif

Berdasarkan jurnal *Waste to Energy: A Review of the Status and Benefits in USA* (Psomopoulos, Bourka, & Themelis, 2009), berikut ini merupakan beberapa dampak positif dari fasilitas *waste to energy*:

A. Mengurangi emisi gas rumah kaca

Teknologi *waste to energy* merupakan satu-satunya alternatif untuk pembuangan limbah yang sudah tidak dapat didaur ulang, dimana limbah menghasilkan gas karbondioksida, metana, senyawa organik yang mudah menguap dan hidrokarbon terklorinasi yang setidaknya 25% diantaranya lolos ke atmosfer sehingga menciptakan emisi gas rumah kaca. Beberapa penelitian menyimpulkan bahwa teknologi *waste to energy* dapat mengurangi emisi gas rumah kaca sebesar 1 ton karbondioksida per ton limbah yang terbakar daripada ditimbun di tanah.

¹⁰ (United States Environmental Protection Agency, n.d.) dalam (Roth, n.d.)

B. Menghasilkan energi dari sumber terbarukan

Rata-rata pembakaran 1 ton limbah pada fasilitas *waste to energy* dapat menghasilkan energi listrik sebesar 600 kWh yang dapat mengurangi penggunaan sumber daya tak terbarukan berupa penambangan 0,75 ton batubara kualitas tinggi atau impor 1 barel minyak untuk produksi listrik dengan metode konvensional dengan jumlah yang sama. *US Department of Energy (US DOE)* mengategorikan *waste to energy* sebagai salah satu jenis biomassa. Istilah biomassa dapat diartikan sebagai material organik yang tersedia secara terbarukan, termasuk tanaman, limbah makanan dan pertanian serta pakan ternak, limbah tanaman pertanian dan residu, limbah kayu dan residu, tanaman air, limbah hewan, limbah kota dan lain-lain. Biomassa dapat digunakan sebagai bahan bakar terbarukan yang bersih, berkelanjutan dan relatif dapat diandalkan untuk produksi listrik dan uap (panas). Sisa bagian yang tidak terbarukan, bagaimanapun, harus dipisahkan atau diterima sebagai bagian dari bahan bakar.

C. Menyelamatkan lahan

Proses pengolahan limbah dengan fasilitas *waste to energy* memungkinkan usia limbah tidak lama sehingga tidak membutuhkan lahan yang luas untuk menampung limbah. Selain itu, fasilitas *waste to energy* dapat dibangun di lokasi pembuangan limbah yang sudah ada sehingga secara finansial dapat menghemat biaya modal untuk pembelian lahan untuk pembangunan fasilitas pengolahan limbah yang baru.

Selain memberikan dampak positif, fasilitas *waste to energy* juga memiliki dampak negatif. Dampak negatif dari fasilitas *waste to energy* dengan insinerasi adalah masih tersisanya residu dari proses pembakaran limbah. Oleh sebab itu, residu hasil pembakaran perlu diberi penanganan khusus supaya tidak mencemari lingkungan. Residu hasil pembakaran terdiri dari beberapa bentuk material, yaitu:

1) Residu padat

Residu padat terdiri dari beberapa jenis material berdasarkan tingkat kekasarnya, yaitu: terak, pasir, arang dan abu. Material padat dapat dipergunakan sebagai material campuran untuk konstruksi jalan.

2) Residu cair

Residu cair berupa leachate, yaitu cairan limbah yang sudah membusuk. Residu cair dinetralkan hingga batas aman tertentu melalui instalasi pengolahan air untuk kemudian dialirkan ke aliran air setempat.

3) Residu gas

Residu gas umumnya terdiri dari gas dioksin dan merkuri. Dioksin dan merkuri bersifat karsinogen, sehingga perlu dinetralkan sebelum dilepaskan ke lingkungan. Penetralkan dilakukan dengan instalasi filter pada cerobong asap.

2.2 Tinjauan Fasilitas Waste to Energy

2.2.1 Kriteria Limbah Sebagai Sumber Daya

Limbah merupakan dampak negatif urbanisasi yang semakin meningkat secara tidak terelakkan. Melalui sudut pandang *waste to energy*, limbah tidak hanya dianggap sebagai sesuatu yang negatif, tetapi juga menjadi sebuah potensi akan adanya sumber energi yang dapat dihasilkan dari pengolahannya melalui teknologi *waste to energy*. Dalam menerapkan teknologi ini, limbah sebagai bahan baku diklasifikasikan sebagai berikut ini:

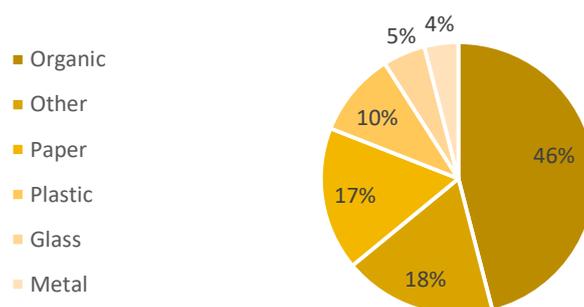
Tabel 2.1 Macam dan Sumber Limbah

Macam/Sumber		Komposisi
Limbah Rumah Tangga/ <i>Municipal Solid Waste (MSW)</i>	Residensial	Limbah makanan, kertas, kardus, plastik, limbah tekstil, kulit, limbah halaman, kayu, kaca, logam, abu, limbah khusus (misalnya barang besar, barang elektronik, barang putih, baterai, minyak, ban), limbah berbahaya rumah tangga.
	Industrial	Limbah umah tangga, kemasan, limbah makanan, kayu, baja, beton, batu bata, abu, limbah berbahaya.

Macam/Sumber		Komposisi
	Komersial-institusional	Kertas, karton, plastik, kayu, limbah makanan, gelas, logam, limbah khusus, limbah berbahaya, limbah elektronik.
	Konstruksi	Kayu, baja, beton, tanah, batu bata, genteng, kaca, plastik, insulasi, limbah berbahaya.
	Servis perkotaan	Penyiraman jalan, hiasan lansekap, lumpur, limbah dari area rekreasi.
Process Waste		Pecahan material, produk spesifikasi, terak, tailing, humus, batuan sisa, air proses dan bahan kimia.
Limbah Medis		Limbah infeksi (perban, sarung tangan, kultur, penyeka, darah dan cairan tubuh), limbah berbahaya (benda tajam, instrumen, bahan kimia), limbah radioaktif, limbah farmasi.
Limbah Pertanian		Limbah makanan yang tercemar, sekam padi, tangkai kapas, tempurung kelapa, pestisida, kotoran hewan, air kotor, plastik, mesin bekas, obat-obatan hewan.

Sumber: World Energy Council, 2016

Dari keempat macam limbah yang dipaparkan pada tabel di atas, jenis limbah yang umum dikonversikan menjadi energi melalui teknologi dan fasilitas *waste to energy* adalah *Municipal Solid Waste* (MSW) atau limbah rumah tangga secara umum yang dihasilkan dari aktivitas sehari-hari dengan komposisi material organik dominan.



Grafik 2.1 Komposisi Limbah pada *Municipal Solid Waste* (MSW)

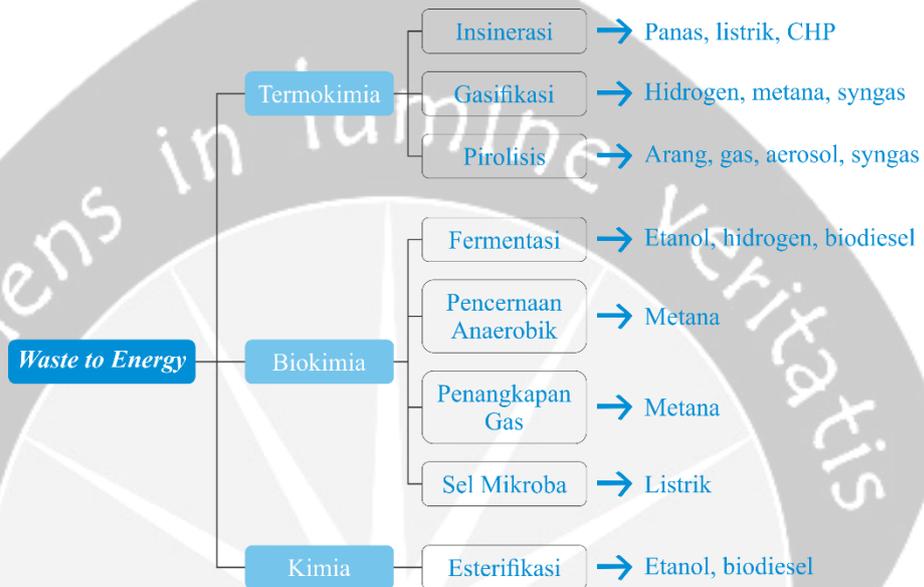
Sumber: World Energy Council, 2016

Komposisi limbah padat terbanyak di seluruh dunia berupa material organik, yaitu sebesar 46%. Dengan demikian, pengolahan limbah menjadi

energi memiliki potensi yang relatif besar dilakukan karena limbah organik ini menjadi sumber tak terbarukan untuk menghasilkan energi.

2.2.2 Teknologi Konversi Waste to Energy

Terdapat 3 klasifikasi teknologi yang selama ini digunakan pada fasilitas *waste to energy*, yaitu:



Gambar 2.1 Klasifikasi Teknologi Waste to Energy

Sumber: (World Energy Council, 2016) yang disederhanakan oleh Penulis, 2017

A. Termo-kimia

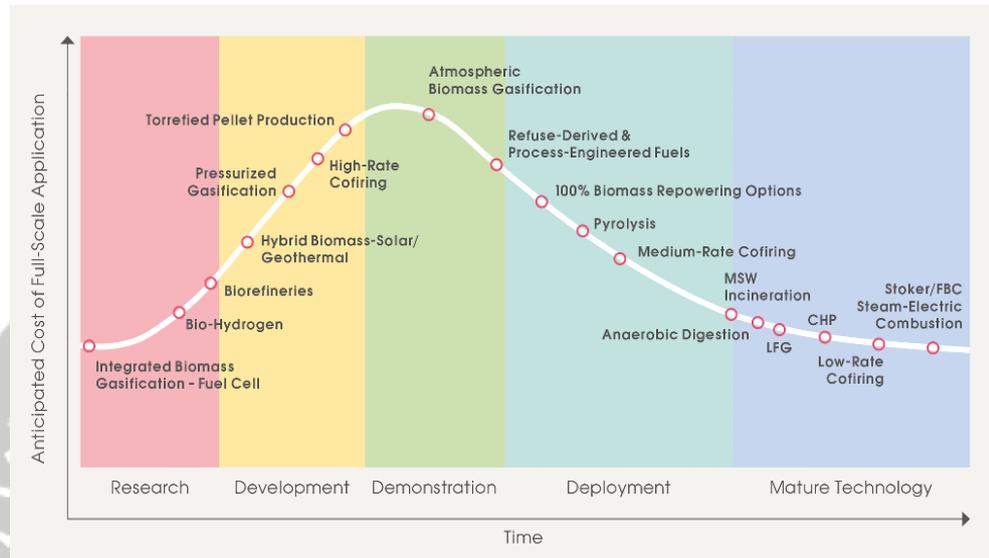
Teknologi konversi termo-kimia digunakan untuk menghasilkan energi dari limbah dengan menggunakan atau melibatkan suhu tinggi. Beberapa macam teknologi termokimia antarlain adalah: insinerasi, gasifikasi dan pirolisis.

B. Biokimia

Teknologi konversi biokimia memanfaatkan proses mikroba untuk mentransformasikan limbah dan dibatasi pada limbah yang dapat diurai seperti limbah makanan dan limbah. Dengan demikian, materi basah dari limbah organik dan limbah pertanian merupakan bahan baku yang paling sesuai untuk teknologi konversi biokimia.

C. Kimia-Esterifikasi

Teknologi konversi kimia menggunakan reaksi zat kimia untuk membusukkan limbah menjadi energi biodiesel dengan reaksi esterifikasi.



Gambar 2.2 Tingkat Kematangan Teknologi Pengolahan Limbah
Sumber: *The International Renewable Energy Agency (IRENA), 2012*

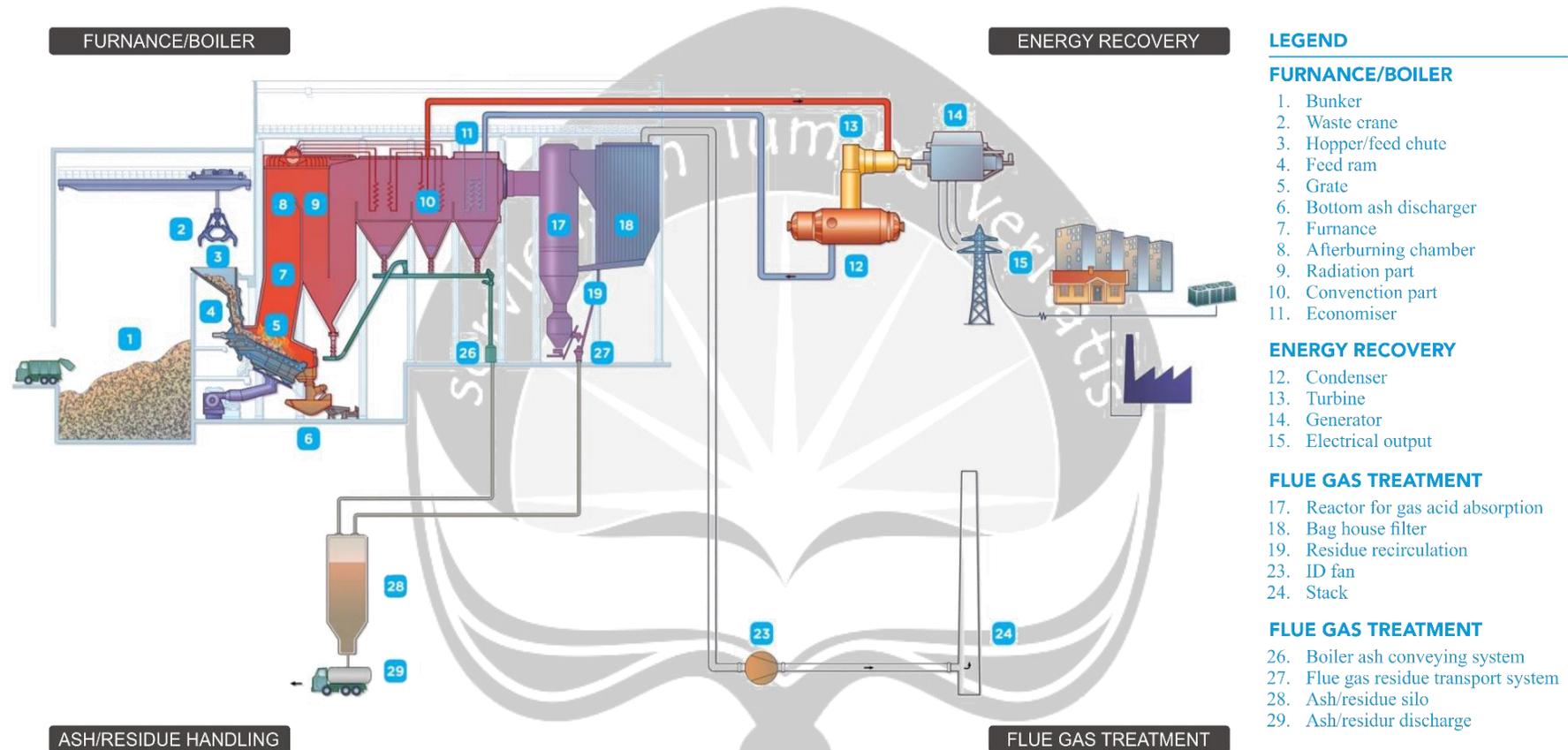
Dari ketiga teknologi konversi *waste to energy* tersebut, proses termokimia dengan teknik insinerasi paling banyak digunakan pada fasilitas *waste to energy* di Amerika Serikat.¹¹ Gambar tingkat kematangan teknologi pengolahan limbah menunjukkan bahwa teknik insinerasi berada pada tingkat teknologi yang sudah matang, dimana metode ini juga didukung dengan biaya finansial operasional yang relatif terjangkau.

2.3 Insinerasi

Fasilitas insinerasi modern menggunakan peralatan untuk mengendalikan polusi untuk mencegah pelepasan emisi polutan ke lingkungan. Saat ini, insinerasi merupakan satu-satunya teknologi *waste to energy* yang relatif terjangkau secara ekonomi dan layak beroperasi pada skala komersial.¹² Berikut skema potongan melintang fasilitas *waste to energy* yang menjelaskan proses insinerasi limbah menjadi empat bagian utama:

¹¹ *Waste-to-Energy: A review of the Status and Benefits in USA* (Psomopoulos, Bourka, & Themelis, 2009)

¹² Roth, n.d.



Gambar 2.3 Potongan melintang fasilitas waste to energy

Sumber: (International Solid Waste Association, 2013) dengan sedikit perubahan oleh Penulis, 2018

Keempat bagian utama dalam urutan proses insinerasi limbah dapat dijelaskan sebagai berikut:

A. *Furnance/Boiler* (Pembakaran)

Area pembakaran terdiri dari beberapa urutan proses pengolahan limbah, yaitu sebagai berikut:

1) *Tipping hall*

Tipping hall merupakan area penerimaan limbah dari truk pengumpul limbah. Untuk mengetahui jumlah limbah yang diterima, dilakukan proses penimbangan dengan jembatan timbang. Sementara itu, untuk menanggulangi bau dari limbah menyebar ke area yang lebih luas, area *tipping hall* dapat dirancang tertutup.

2) *Waste bunker*

Limbah yang diterima ditampung dalam *waste bunker*. Dimensi *waste bunker* ditentukan berdasarkan kapasitas limbah yang diterima. *Waste bunker* harus dirancang untuk menampung limbah selama kurang lebih satu minggu untukantisipasi adanya proses perbaikan atau penghentian lainnya dalam operasional fasilitas *waste to energy*.

3) *Waste feeding*

Di dalam *waste bunker*, limbah diproses dengan *crane*/mesin derek yang melayani berbagai tujuan. Pertama, *crane* dapat mengambil limbah yang terlalu besar untuk masuk ke pengumpan limbah langsung.

Kedua, *crane* mencampur limbah yang masuk untuk memastikan limbah yang diumpankan ke unit pembakaran sudah homogen supaya proses pembakaran stabil dan dapat mencapai nilai efisiensi energi tertinggi. Limbah tersebut mengarah ke zona pembakaran melalui saluran parasut yang juga berfungsi sebagai segel udara untuk menghindari kebocoran udara yang tidak terkendali ke ruang pembakaran. Umumnya, parasut harus dirancang untuk menangani benda dengan panjang hingga 1 m.

4) *Grate*

Setelah masuk ke dalam parasut, limbah diproses pada *grate* untuk melayani dua tujuan:

- a) Transportasi, agitasi, pengadukan, pencampuran, distribusi dan leveling limbah pada *grate*
- b) Distribusi udara pembakaran primer pada lapisan limbah

Desain *grate* umumnya dicirikan oleh prinsip-prinsip gerakan, termasuk penghalusan miring atau horizontal dengan bagian *grate* yang bergerak maju atau mundur. Waktu rata-rata pengolahan limbah dalam *grate* adalah sekitar 1 jam.

5) *Furnance*

Furnance/tungku pembakaran merupakan tempat pembakaran primer terjadi sekaligus pendinginan oleh dinding air dengan uap yang kemudian digunakan untuk pemulihan energi. Uap bertekanan tinggi mengalir melalui tabung membran yang kedap gas membentuk dinding dan langit-langit pada *furnance*. Oleh sebab itu, bagian tersebut harus sangat tahan terhadap korosi karena suhu gas buang yang sangat tinggi menciptakan komponen asam dan basa menjadi sangat agresif.

Melalui pengaturan mulut pipa di atas limbah, udara sekunder dipasok untuk menyelesaikan reaksi pembakaran. Fungsi tambahan pasokan udara sekunder adalah mencampur gas pembakaran dan memastikan suhu gas asap yang seragam. Pada umumnya, 40% dari total udara pembakaran disediakan sebagai udara sekunder dan 60% sebagai udara utama.

Furnance harus dilengkapi dengan setidaknya dua pembakar tambahan yang akan digunakan selama *start-up* dan *shut-down* fasilitas *waste to energy* serta untuk menjaga kestabilan temperatur jika tiba-tiba terjadi penurunan temperatur.

Kombinasi suhu tinggi dan basa dalam gas buang membuat gas buang agresif. Maka dari itu, dinding tabung *furnance* dan tabung *boiler* harus dilapisi dengan resistan korosif dan tahan suhu seperti logam campuran Inconel, atau bisa juga dengan lapisan refraktori untuk menghindari kontak langsung antara gas buang dan tabung *boiler*. Umumnya, perlindungan terhadap korosi harus diterapkan hingga titik suhu gas buang di dalam *boiler* 850-900°C.

6) Boiler

Efisiensi boiler secara keseluruhan sangat tergantung pada suhu dan tekanan uap. Parameter uap yang optimal bergantung pada keseimbangan dua kriteria desain yang buruk, yaitu dengan perbandingan:

- a) Semakin tinggi suhu dan tekanan maka semakin banyak produksi listrik
- b) Semakin tinggi suhu dan tekanan maka semakin tinggi risiko korosi dan dengan demikian meningkatkan biaya pemeliharaan.

Pada umumnya, fasilitas *waste to energy* beroperasi dengan tekanan uap antara 40-60 bar dan suhu uap antara 400-425°C.



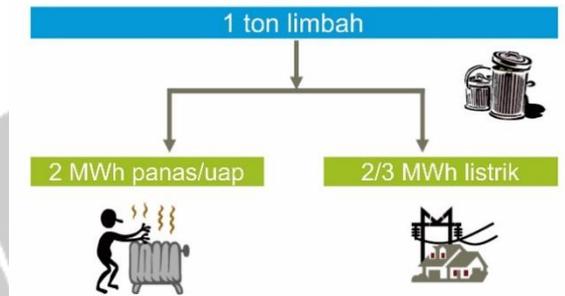
Gambar 2.4 (Kiri) boiler vertikal dan (kanan) boiler horizontal
Sumber: International Solid Waste Association, 2013

Pada prinsipnya ada dua desain dasar *boiler*, yaitu desain vertikal dan horizontal. Desain *boiler* vertikal memiliki melewati vertikal di kedua radiasi dan bagian konveksi (termasuk economizer). Desain boiler horizontal memiliki melewati radiasi vertikal diikuti oleh lulus konveksi horizontal dengan pra-evaporator, pemanas super, evaporator dan bagian *economizer*.

B. *Energy Recovery* (Pembangkitan Energi)

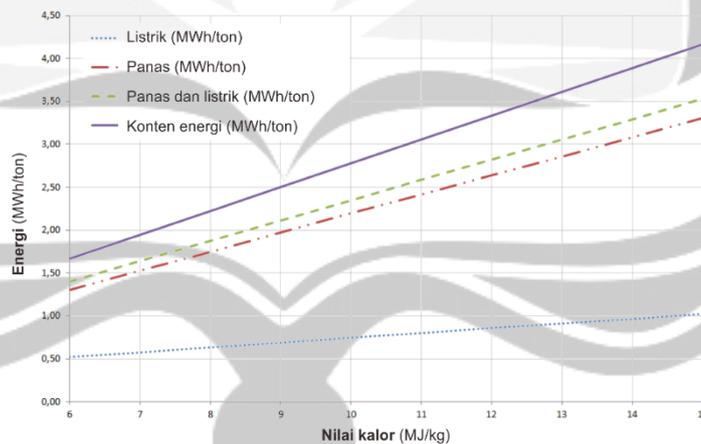
Setelah melalui tahap pembakaran, panas dikonversikan menjadi energi listrik dan atau uap. Panas yang dilepaskan dari proses pembakaran mengubah air menjadi uap, yang kemudian dikirim ke generator turbin untuk menghasilkan energi. Pemilihan konversi energi dapat disesuaikan berdasarkan kebutuhan energi di area perancangan fasilitas terkait.

Untuk konversi gabungan antara energi panas dan listrik, satu ton limbah dengan nilai kalori yang lebih rendah 10 MJ/kg dapat dikonversikan menjadi sekitar 2 MWh energi panas dan $\frac{2}{3}$ MWh energi listrik.



Gambar 2.5 Pemulihan energi dari satu ton limbah dengan nilai kalori 10 MJ/kg
 Sumber: International Solid Waste Association, 2013

Jika hanya listrik yang diproduksi, output konversi energi dapat diperkirakan meningkat menjadi sekitar 0,70-0,75 MWh per ton limbah dengan nilai kalori yang lebih rendah 10 MJ/kg. Produksi energi per ton limbah bervariasi secara proporsional dengan nilai kalori.



Gambar 2.6 Konten energi dan potensi pemulihan energi dari limbah
 Sumber: International Solid Waste Association, 2013

Jumlah energi yang dapat dipulihkan dari pembakaran limbah tergantung pada nilai kalori limbah dan teknologi yang diterapkan. Dalam produksi listrik saja, dapat diperoleh efisiensi termal tertinggi, tetapi perolehan keseluruhan total efisiensi terendah. Keseluruhan total efisiensi tertinggi ditemukan saat pemulihan energi listrik dan panas. Secara umum,

listrik memiliki nilai pasar yang lebih tinggi daripada panas. Oleh karena itu, kombinasi penjualan panas dan tenaga biasanya optimal.

C. *Flue Gas Treatment* (Penetralan Gas Buang)

Gas buang mengandung polutan dari limbah dan membutuhkan penetralan sebelum dilepaskan ke atmosfer. Terdapat beberapa metode penetralan gas buang, mulai dari metode kering hingga basah yang lebih rumit. Pada dasarnya, semua proses didasarkan pada reaksi antara kapur disuntikkan dalam reaktor dan komponen asam dalam gas buang yang mengubahnya menjadi senyawa padat. Senyawa-senyawa ini dihilangkan bersama dengan *fly ash* (abu terbang) dalam mesin *downstream baghouse filter*. Penambahan karbon aktif antara reaktor dan *downstream baghouse filter* dimungkinkan juga untuk menghilangkan dioksin dan merkuri (Hg).

Semua proses pembakaran menghasilkan NO_x. Jumlahnya dipengaruhi oleh suhu dan komposisi molekul dari pasokan udara. NO_x dapat dikontrol melalui kontrol proses pembakaran. Dua sistem yang paling umum adalah SNCR (*Selective Non-Catalytic Reduction*) dan SCR (*Selective Catalytic Reduction*). Kedua sistem mengurangi NO_x menjadi N₂ dengan menambahkan amonia ke gas buang mentah. Dalam proses SNCR, amonia disuntikkan ke dalam gas asap pada suhu sekitar 850-900°C. Pada proses SCR, reaksi amonia dan gas buang terjadi pada permukaan katalis. SCR biasanya digunakan hanya pada fasilitas *waste to energy* yang berada di bawah batas peraturan NO_x yang ketat.

Tabel 2.2 Batas Nilai Emisi Gas Buang dan Level Operasional BAT

Senyawa	Rata-Rata per 30 menit (mg/NM ³)		Rata-Rata Harian (mg/NM ³)	
	Batas dalam 2000/76/EC	BAT	Batas dalam 2000/76/EC	BAT
Total debu	20	1-20	10	1-5
HCl	60	1-50	10	1-8
HF	4	<2	1	<1
SO ₂	200	1-150	50	1-40
NO _x SNCR	400	30-350	200	120-180
TOC	20	1-20	10	1-10
CO	100	5-100	50	5-30
Merkuri dan komponen sejenis	n/a	0.001-0.03	0.05	0.001-0.02
Cadmium dan Thalium	n/a	0.005-0.05*	0.05	0.005-0.05*

Logam	n/a	0.005-0.5*	0.5	0.005-0.5*
Dioksin dan Furans	n/a	0.01-0.1*	0.1	0.01-0.1*
Amonia	n/a	1-10	n/a	<10

Sumber: International Solid Waste Association, 2013

Tabel 2.2 menunjukkan batas nilai emisi gas buang dan level operasional BAT dengan standar Eropa. BAT (*Best Available Techniques*) merupakan teknik ideal yang dapat digunakan sebagai standar aman dalam penetralan emisi gas buang dari fasilitas *waste to energy* untuk dilepaskan ke atmosfer yang diukur dalam rata-rata setengah jam (30 menit) dan rata-rata harian.

Gas buang yang telah dikontrol kadar polusinya dibuang melalui cerobong asap. Ketinggian cerobong dapat disesuaikan berdasar pertimbangan topografi dan kondisi meteorologikal yang berlaku.

D. *Residue Handling* (Penanganan Residu Padat)

Setelah melewati proses pembakaran, volume residu padat sisa pembakaran menjadi sekitar 10% dari volume aslinya dan sekitar 20% dari berat asli. Residu padat tersebut merupakan kombinasi dari abu dasar (*bottom ash*), abu terbang (*fly ash*) dan residu setelah proses pengolahan gas buang. Kualitas abu dasar, yaitu konten organik yang tersisa, diukur untuk mengevaluasi proses pembakaran dan harus lebih rendah dari 3%.

Abu dasar dapat digunakan untuk keperluan konstruksi sebagai pengganti kerikil setelah logam disortir untuk didaur ulang. Sementara itu, residu abu terbang dan gas buang dianggap limbah berbahaya dan harus dinetralkan dengan pengolahan yang tepat.

Abu dikumpulkan dan dibawa ke tempat pembuangan limbah, dimana sistem penyaringan *baghouse filter* yang memiliki efisiensi tinggi dalam menangkap partikulat. Seiring aliran gas mengalir melalui filter ini, lebih dari 99% partikel disingkirkan. Partikel abu yang terjaring jatuh ke dalam *baghouse* dan diangkut oleh sistem conveyor tertutup menuju ke ruang buangan abu. Abu kemudian dibasahi untuk mencegah abu bercampur dengan abu bawah dari area pembakaran. Conveyor mengangkat residu abu ke bangunan tertutup yang dimuat ke dalam truk tertutup dan bocor dan dibawa

ke tempat pembuangan limbah yang dirancang untuk melindungi abu kontaminasi air tanah.

2.4 Standar Perencanaan

Berikut ini merupakan hal-hal yang perlu diperhatikan untuk memenuhi standar perencanaan fasilitas *waste to energy* berdasarkan buku *Municipal Waste Incineration* (The World Bank, 1999):

2.4.1 Pemilihan Lokasi

Fasilitas insinerasi limbah merupakan fasilitas pelayanan publik. Pemilihan lokasi perlu ditentukan dengan pertimbangan isu ekonomi dan lingkungan. Dampak lingkungan harus selalu diketahui secara transparan oleh masyarakat. Apabila dirancang dan dioperasikan dengan sesuai dengan standar ideal, fasilitas insinerasi dapat dikomparasikan dengan industri menengah dan berat dalam aspek dampak lingkungan, potensi gangguan publik, syarat jaringan transportasi dan kebutuhan infrastuktur lainnya.

Sebuah fasilitas *waste to energy* insinerasi akan membarukan energi dalam bentuk panas atau listrik tergantung pada permintaan, sehingga dengan demikian fasilitas ini setara dengan pembangkit listrik tenaga fosil. Dalam kasus serupa, fasilitas *waste to energy* insinerasi setara dengan pembangkit listrik tenaga batubara pada hal emisi gas buang dan limbah padat sisa pembakaran dan pembersihan gas buang.

Dengan demikian, letak sebuah fasilitas *waste to energy* perlu dekat dengan pembangkit listrik tenaga fosil yang sudah ada untuk proses penyaluran energi; atau perlu dekat dengan pembangkit listrik baru.

A. Kriteria

Berikut merupakan kriteria pemilihan lokasi fasilitas *waste to energy*:

✓ ✓ ✓	Tempat pembuangan akhir yang terkontrol harus tersedia untuk pembuangan residu.
✓ ✓	Dalam kaitannya dengan kualitas udara pada lokasi tapak, pembalikan kabut asap secara berkala maupun berkelanjutan tidak disarankan.

✓ ✓	Fasilitas insinerasi limbah harus berada pada lahan yang berada pada zona industri menengah atau berat.
✓	Fasilitas insinerasi harus berada di area industrial yang dekat dengan pembangkit listrik.
✓	Durasi pengangkutan limbah dari tempat pembuangan akhir ke fasilitas insinerasi tidak lebih dari 1 jam.
✓	Fasilitas insinerasi setidaknya harus berjarak 300-500 meter dari zona residensial.
✓	Fasilitas insinerasi harus terletak dekat dengan konsumen energi yang layak.

B. Penilaian Kelayakan Lokasi

Keberadaan fasilitas *waste to energy* insinerasi umumnya akan terjadi saat permintaan fasilitas semacam itu dilakukan melalui survei limbah. Perlu dilakukan survey untuk mengidentifikasi jumlah limbah, meliputi bagaimana pengumpulan atau pengangkutan dan memberikan informasi tentang area yang akan dilayani, termasuk perkiraan lokasi pusat pembaruan energi limbah.

Pertimbangan saat mengevaluasi lokasi fasilitas insinerasi limbah sama dengan penilaian dampak lingkungan. Perbedaan utamanya adalah bahwa proses penentuan tapak mempertimbangkan banyak lokasi, kemudian memberi peringkat dengan menerapkan informasi yang ada ke variabel. Namun, penilaian dampak lingkungan melihat dampak keberadaan fasilitas terhadap lingkungan secara lebih rinci dan seringkali hanya setelah memberikan informasi tambahan dan lebih detail pada tapak dan fasilitas.

Penentuan tapak harus berhadapan dengan sejumlah aspek, yaitu: kedekatan dengan pusat pembangkit energi, lalu lintas dan transportasi, kualitas udara, dampak kebisingan, kedekatan dengan jaringan distribusi energi, utilitas dan tempat pembuangan akhir. Jika aspek-aspek tersebut tidak relevan untuk lokasi tertentu, hal ini perlu menjadi perhatian khusus.

1) Dekat dengan pusat pembangkit energi

Pengambilan limbah dengan jarak jauh mahal dan tidak baik bagi lingkungan (karena emisi CO₂ dan NO_x). Oleh karena itu, fasilitas *waste to energy* harus sedekat mungkin dengan daerah yang mengantarkan limbah ke fasilitas. Hal ini bahkan lebih penting jika fasilitas *waste to energy* juga menghasilkan panas dan akan terhubung ke jaringan pemanas distrik yang melayani area yang sama.

Kedekatan dengan pusat limbah penting untuk menggunakan kendaraan pengumpul dan jumlah pekerja seefisien mungkin untuk meminimalkan durasi waktu perjalanan. Waktu pengangkutan yang diperpanjang karena jarak yang jauh atau kemacetan membutuhkan lebih banyak kendaraan dan staf untuk pengumpulan dan pengangkutan atau pengalihan limbah ke kendaraan yang lebih besar di pengepul limbah. Kedua solusi tersebut meningkatkan biaya operasional.

2) Lalu lintas dan akses transportasi

Fasilitas insinerasi menyebabkan padatnya lalu lintas dengan limbah yang mencemari jalan. Maka dari itu, fasilitas *waste to energy* sebisa mungkin berada di dekat akses yang memungkinkan lalu lintas padat.

Sekitar 100-400 truk bisa sampai di fasilitas *waste to energy* setiap harinya, tergantung pada ukuran fasilitas dan kendaraan pengumpulnya. Tinjauan lalu lintas mungkin diperlukan untuk minimalisasi kemacetan lalu lintas dan menghindari pemborosan waktu.

Selain berkontribusi pada kemacetan lalu lintas, truk akan bergetar, mengeluarkan debu dan menimbulkan kebisingan. Karena kendaraan transportasi seharusnya tidak melewati jalan perumahan atau area sensitif lainnya.

3) Kualitas udara

Fasilitas insinerasi limbah yang dilengkapi dengan sistem pembersihan gas buang standar modern menciptakan sedikit polusi udara atau bau. Karena itu, penentuan tapak jarang menimbulkan masalah yang terkait

dengan kualitas udara. Namun, fasilitas insinerasi harus berada di daerah terbuka dimana emisi tidak terjebak. Misalnya, tanaman tidak boleh diletakkan di lembah sempit atau daerah rawan kabut asap.

Limbah menghasilkan bau saat proses pengangkutan dan penanganan di fasilitas insinerasi. Penggunaan ventilasi udara di area *bunker* dalam proses insinerasi biasanya menghilangkan bau yang paling menyengat.

4) Kebisingan

Sebagian besar suara bising akan datang dari kipas gas buang/ID fan yang memiliki kebisingan rata-rata $>90\text{dB}$ ¹³ dan ventilator yang digunakan dalam pendingin yang beroperasi 24 jam sehari. Ventilator biasanya diletakkan di area atap fasilitas insinerasi yang menimbulkan kebisingan tinggi. Penanganan limbah dan residu di dalam fasilitas insinerasi juga dapat mengeluarkan suara bising. Transportasi ke dan dari fasilitas insinerasi akan menimbulkan kebisingan, terutama di siang hari. Oleh karena itu, fasilitas insinerasi harus berjarak minimal 300-500 m dari daerah pemukiman untuk meminimalkan dampak kebisingan sekaligus untuk menghindari dari gangguan bau.

5) Dekat dengan pusat jaringan distribusi energi

Fasilitas insinerasi akan menghasilkan energi berupa uap dan atau listrik. Energi yang dapat dihasilkan merupakan aset penting karena dapat dijual untuk meningkatkan pendapatan fasilitas insinerasi secara signifikan dan dapat dipergunakan untuk berbagai keperluan.

Terlepas dari bagaimana energi digunakan, fasilitas insinerasi sebaiknya berada di dekat jaringan distribusi energi sehingga sistem pengiriman dapat dihubungkan ke jaringan distribusi yang ada sehingga menghindari biaya konstruksi atau operasional yang tinggi.

6) Utilitas

Fasilitas insinerasi membutuhkan jenis utilitas yang sama seperti industri menengah sampai berat. Panas yang dihasilkan dalam proses pembakaran diasumsikan digunakan secara bijak. Akan tetapi, akan

¹³ Kisku & Bhargava, 2006

ada saat pendinginan yang dibutuhkan, baik sebagai pendinginan air langsung atau melalui pendingin udara atau menara pendingin. Fasilitas insinerasi juga akan menghasilkan air limbah yang tercemar sampai tingkat tertentu tergantung pada pendinginan dan sistem pembersihan gas buang.

7) Tempat pembuangan akhir residu

Walaupun fasilitas insinerasi limbah dapat meminimalisasi volume limbah secara signifikan, tetap akan ada residu yang harus dibuang di tempat pembuangan akhir. Residu ini terdiri dari abu dari limbah yang terbakar, abu terbang dan residu lainnya dari pembersihan gas buang. Abu dapat didaur ulang untuk material konstruksi atau dibuang tanpa tindakan khusus. Dalam segala situasi, fasilitas insinerasi harus memiliki akses ke ruang pembuangan residu yang dirancang dengan benar dan dioperasikan untuk pembuangan residu akhir.

Residu pembersihan gas buang dengan gas asam sangat mudah larut dan dapat menyebabkan pencemaran air tanah. Lapisan dan cakupan TPA yang tepat dapat mengendalikan hal ini, bersamaan dengan merawat lindi/*leachate*¹⁴ untuk mengeluarkan logam berat sebelum dibuang.

2.4.2 Struktur Organisasi

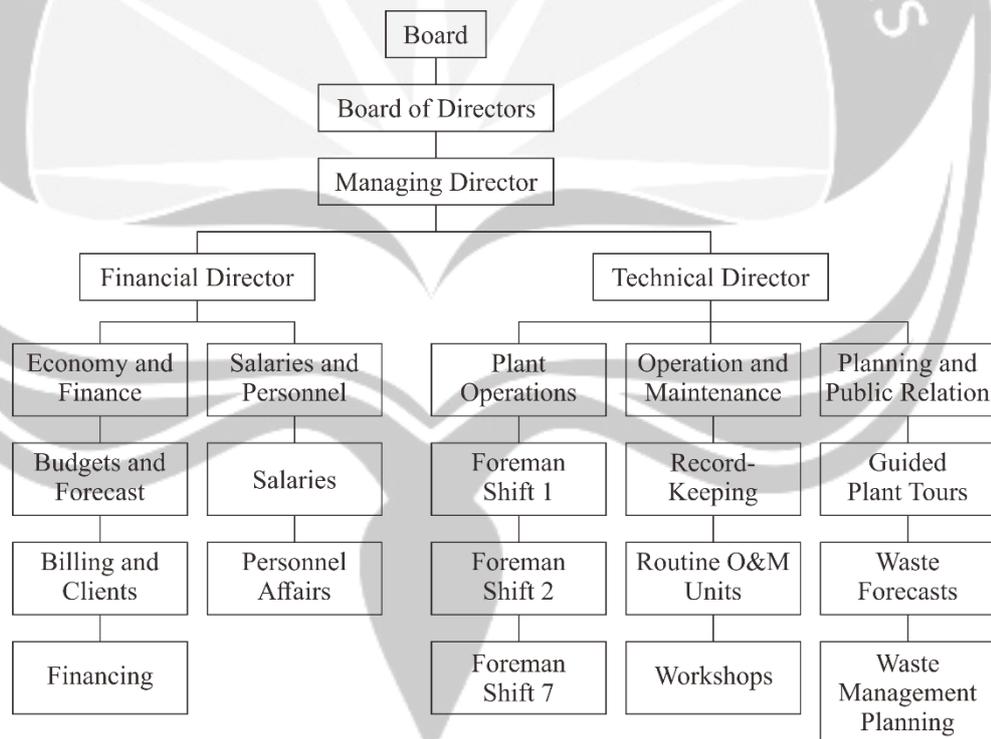
Proses operasional dan *maintenance* yang dilakukan secara efisien dan kompeten merupakan kunci untuk menerapkan teknologi *waste to energy* dengan sukses. Hal tersebut juga membuat manfaat fasilitas *waste to energy* dan nilai investasi optimal. Berdasarkan (The World Bank, 1999), proses operasional dan *maintenance* tersebut membutuhkan hal-hal sebagai berikut:

- 1) Struktur organisasi dan manajemen fasilitas *waste to energy* yang terstruktur

¹⁴ Lindi/*leachate* merupakan cairan yang dikeluarkan dari sampah akibat proses degradasi biologis. Lindi juga dapat pula didefinisikan sebagai air atau cairan lainnya yang telah tercemar sebagai akibat kontak dengan sampah (Rustiawan et al., 1993).

- 2) Pekerja, manager dan staf operasional yang terlatih dan terampil dalam berbagai tingkatan
- 3) Kebutuhan pengadaan suku cadang tercukupi
- 4) Kebersihan fasilitas *waste to energy* yang terjaga dan lingkungan kerja yang aman
- 5) Pencatatan yang efisien, termasuk spesifikasi dan gambar kerja fasilitas *waste to energy*, mesin dan komponen lain; data emisi; kuantitas dan tipe limbah; data operasional (missal: temperatur, tekanan, efisiensi dan konsumsi)

Pada umumnya, fasilitas *waste to energy* dengan teknologi insinerasi mempekerjakan 50-200 orang pekerja. Pekerja-pekerja tersebut ditempatkan dalam sebuah struktur organisasi berdasarkan tipe pekerjaan yang dilakukan. Terdapat beberapa tipe struktur organisasi pada fasilitas *waste to energy*, salah satunya adalah sebagai berikut:



Gambar 2.7 Struktur organisasi fasilitas *waste to energy* secara umum
 Sumber: (The World Bank, 1999) yang digambar ulang oleh penulis.

Struktur organisasi dan jumlah pekerja pada fasilitas *waste to energy* sebaiknya disusun secara aktual dan seimbang dengan mempertimbangkan

beberapa hal berikut: tipe pekerjaan, ukuran fasilitas, efektivitas dan kemampuan pekerja serta hubungan tanggung jawab antara divisi pekerja terkait.

Kepemilikan fasilitas *waste to energy* dapat berasal dari berbagai pihak, misalnya: pemerintah lokal, pemerintah pusat, perusahaan privat dan atau publik, serta investor. Hal penting yang perlu dilakukan oleh pemilik adalah memastikan pasokan limbah pada fasilitas *waste to energy* tercukupi secara kuantitas dan kualitas; keberlanjutan finansial; serta perawatan dan pemeliharaan operasional fasilitas secara terkontrol. Dalam struktur organisasi pada Gambar 2.7, pemilik berada pada kelompok *Board of Directors*. Dalam *Board of Directors*, pemilik bertanggung jawab dalam proses pengambilan keputusan penting berdasarkan rekomendasi *Plant Management*.

Idealnya, salah satu *Managing Director* bertanggung jawab dalam operasional dan kebutuhan finansial fasilitas *waste to energy*. Secara umum, *Managing Director* akan melakukan koordinasi dengan *Board of Directors* untuk menunjuk *Financial Director* dan *Technical Director* untuk melakukan koordinasi lapangan harian fasilitas *waste to energy*. Hal ini penting dilakukan dalam kelompok manajemen untuk mendapat akses yang relevan dalam melakukan kontrol operasional finansial, teknis dan kontrol lingkungan setiap harinya. Secara umum, departemen yang ada dalam sebuah fasilitas *waste to energy* adalah sebagai berikut:

- 1) Operator fasilitas *waste to energy*
- 2) Operasional dan *maintenance*
- 3) *Public relations* (Humas)
- 4) Perencanaan dan peramalan
- 5) Keuangan
- 6) Personil

Pekerja dalam fasilitas *waste to energy* tidak harus bersifat pekerja tetap. Tim manajemen dapat menentukan hubungan pekerja yang bersifat kontrak yang bekerjasama dengan berbagai pihak eksternal. Pekerja kontrak dapat melakukan pekerjaan sebagai berikut:

- 1) Proses pembersihan dan transportasi residu
- 2) Kegiatan kebersihan
- 3) Manajemen finansial
- 4) Operasional dan *maintenance* unit tertentu pada fasilitas *waste to energy*
- 5) Tes berkala dan analisis emisi
- 6) Perencanaan dan studi kelayakan untuk pengembangan pembangunan *fasilitas waste to energy*

Pihak manajemen juga bertanggung jawab dalam proses pelatihan pekerja supaya memenuhi kriteria kemampuan dasar. Proses pelatihan pekerja tersebut juga dilakukan untuk menjaga keselamatan dan kesehatan pekerja, terutama untuk mengurangi risiko kegagalan dan kecelakaan kerja. Kriteria kemampuan dasar disesuaikan dengan jenis pekerjaan, contohnya adalah sebagai berikut:

Tabel 2.3 Pekerja, jumlah pekerja dan kriteria kemampuan dasar yang diperlukan untuk mengoperasikan fasilitas insinerasi

Pekerja	Jumlah	Kriteria Kemampuan Dasar
Direktur pengelolaan, keuangan dan teknis	3	Managemen dokumen, managemen utilitas publik.
Staff ekonomi, akuntansi dan staff kantor	6	Keahlian mengelola dokumen pada bidang ekonomi atau akuntansi, keahlian dalam sistem managemen informasi elektronik.
Operator fasilitas insinerasi	>14	Keahlian dan sertifikasi sebagai <i>chief facility operator</i> atau shift supervisor, Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) dan operasi industri.
Operator <i>crane</i>	>7	Pengalaman pada operasi mesin, penyortiran dan homogenisasi limbah sebelum proses insinerasi serta pemadaman kebakaran.
<i>Shift supervisor</i>	>7	Kemampuan manajemen dan perencanaan yang baik, pengalaman operasional industri, K3, Pertolongan Pertama Pada Kecelakaan (P3K).
Montir	>5	K3 dan P3K.
Elektrisi	>2	K3 dan P3K.
Pekerja umum	30	K3 dan P3K.
TOTAL	≥74	

Sumber: The World Bank, 1999

Kode praktik atau prosedur kerja perlu didokumentasikan secara tertulis harus disiapkan untuk semua kegiatan dan fasilitas utama pengolahan limbah. Dokumentasi tertulis dipergunakan untuk orientasi pekerja, terutama pekerja baru, sekaligus sebagai sumber referensi bagi pekerja sepanjang tahun. Dokumentasi tersebut harus dapat memberi instruksi kepada pekerja untuk mengoperasikan peralatan dan prosedur yang harus dilakukan apabila terjadi kegagalan maupun kecelakaan kerja. Harus ada rencana cadangan jika terjadi kecelakaan atau kegagalan peralatan.

Pemasok peralatan perlu me prosedur kerja sebagai bagian dari kontrak. Idealnya, prosedur kerja tersebut digunakan untuk menyiapkan prosedur kerja terpadu untuk seluruh fasilitas *waste to energy*. Prosedur terpadu harus tersedia di ruang operator dan dengan *shift supervisor* dan personil lainnya.

2.4.3 Proses Operasi dan Perawatan

Operasi dan pemeliharaan yang efisien dan kompeten adalah kunci penerapan teknologi insinerasi limbah yang sukses dan menjamin keuntungan optimal dari investasi yang dilakukan. Beberapa operasional dan perawatan perlu menerapkan hal-hal berikut¹⁵:

- 1) Fasilitas yang dikelola dengan struktur organisasi yang baik.
- 2) Pekerja, manajer dan personil operasi yang terlatih dan terampil di semua tingkatan.
- 3) Kinerja yang efisien serta lingkungan kerja yang bersih dan aman.
- 4) Pendataan yang efisien meliputi spesifikasi dan gambar kerja rancangan fasilitas insinerasi, mesin dan komponen lainnya; data emisi; jumlah dan jenis limbah; data operasi (misalnya, suhu, tekanan, efisiensi, dan konsumsi).

¹⁵ The World Bank, 1999

Hal-hal berikut ini menunjukkan bahwa ketersediaan dan layanan eksternal sangat penting untuk operasional lanjutan fasilitas *waste to energy*:

- 1) Pasokan listrik bertegangan tinggi dan stabil
- 2) Air
- 3) Pembuangan residu yaitu, ketersediaan tempat pembuangan akhir yang direkayasa dan sanitasi untuk residu
- 4) Ketersediaan bahan habis pakai (seperti kapur, minyak, dan pelumas)

Jika limbah tidak mengandung senyawa berbahaya, pada umumnya kualitas terak dan abu akan memungkinkan untuk didaur ulang setelah pengayakan, misalnya untuk material perkerasan jalan. Oleh karena itu, terak dapat diangkut ke daerah pemilahan, terak dan abu yang ditolak dapat dipindahkan ke tempat pembuangan akhir dan residu pengendalian polusi udara dapat digunakan untuk mengamankan bagian TPA.

Bagaimanapun, residu harus diangkut dengan kendaraan yang sesuai dalam muatan penuh sehingga menghindari pengotoran atau penyebaran debu. Kendaraan semacam itu dapat dibeli dan dioperasikan oleh fasilitas insinerasi atau jasa tersebut dapat disubkontrakkan ke perusahaan swasta.

2.4.4 Pembaruan Energi

Manfaat utama dari insinerasi limbah padat adalah kemungkinan penggunaan kembali limbah sebagai bahan bakar untuk produksi energi. Insinerasi limbah dapat mengurangi gas metana di tempat pembuangan limbah dan mengganti bahan bakar fosil, mengurangi emisi gas rumah kaca secara keseluruhan.

Gas buang yang membawa energi yang dilepaskan di tungku pembakaran insinerasi harus didinginkan dalam ketel sebelum memasuki sistem pengendalian pencemaran udara. Boiler juga merupakan instalasi teknis yang diperlukan untuk pemulihan energi. Jenis boiler yang layak, bagaimanapun, tergantung apakah energi digunakan untuk air panas untuk pemanasan distrik, mengolah uap untuk berbagai jenis industri, atau listrik.

Kemungkinan penggunaan akhir bergantung pada kondisi permintaan pasar energi lokal, meliputi:

- 1) Infrastruktur untuk distribusi energi, misalnya ketersediaan jaringan listrik dan jaringan pemanas distrik.
- 2) Pola konsumsi energi tahunan (*output* energi dari tanaman insinerasi MSW cukup konstan).
- 3) Harga berbagai jenis energi dan kemungkinan kesepakatan dengan konsumen.

Efisiensi termal keseluruhan dari fasilitas insinerasi limbah yang dilengkapi untuk pemulihan energi bergantung pada penggunaan akhir energi yang dipulihkan. Produksi listrik memiliki efisiensi termal yang rendah, namun menghasilkan energi dengan harga tinggi, sedangkan air panas untuk pemanas distrik dianggap energi murah, namun efisiensi termal secara keseluruhan tinggi dan kompleksitas dan biaya instalasi teknis yang diperlukan relatif rendah. Kriteria pada aspek pembaruan energi antarlain adalah sebagai berikut:

✓ ✓ ✓	Gas buang dari tungku harus didinginkan sampai 200° C atau lebih rendah dalam boiler untuk menerapkan teknologi pengolahan gas buang yang tersedia.
✓ ✓	Perekonomian tanaman harus dioptimalkan melalui produksi energi dan penjualan.
✓ ✓	Perjanjian yang tidak dapat dibatalkan untuk penjualan energi (jenis dan kuantitas) harus ada sebelum keputusan akhir dibuat mengenai disain bagian pemulihan energi dari fasilitas insinerasi MSW.
✓ ✓	Bila energi surplus digunakan untuk pemanasan distrik, fasilitas insinerasi harus ditempatkan di dekat jaringan yang ada untuk menghindari sistem transmisi baru yang mahal.
✓	Jika ada pasar reguler untuk penjualan air panas (pemanasan distrik atau sejenisnya), atau jika uap hadir, fasilitas insinerasi harus didasarkan pada produksi air panas atau uap saja. Konfigurasi ini biasanya lebih baik dari segi kerumitan teknis. dan kelayakan ekonomi. Selama musim hangat, tingkat tertentu pendinginan ke lingkungan mungkin lebih baik daripada solusi yang menuntut investasi lebih besar.

Energi dilepaskan dari insinerasi dan meninggalkan tungku sebagai gas buang pada suhu sekitar 1.000-1.200° C. Gas buang panas dari insinerasi harus didinginkan sebelum bisa dilewatkan ke sistem pembersihan gas buang. Gas buang didinginkan melalui boiler, di mana energi yang dilepaskan dari insinerasi pada awalnya pulih sebagai air panas atau uap.

Tabel 2.4 Efisiensi pada berbagai sistem pembaruan energi

Penggunaan energi	Pembaruan	Efisiensi keseluruhan	
Panas saja	Panas	80 %	80 %
Uap saja	Uap	80 %	80 %
Listrik saja	Listrik	35 %	35 %
Kombinasi uap dan listrik	Uap	0 – 75 %	35 – 75 %
	Listrik	0 – 35 %	
Kombinasi panas dan listrik	Panas	60 – 65 %	85 %
	Listrik	20 – 25 %	

Sumber: (The World Bank, 1999)

Berdasarkan tabel di atas, angka efisiensi dapat digunakan untuk menghitung jumlah energi mutlak yang dipulihkan dan pendapatan dari penjualan energi. Kemungkinan penggunaan akhir dari energi listrik, panas atau uap bergantung pada jenis boiler. Boiler dibagi menjadi tiga kategori besar sebagai berikut:

- 1) Boiler penghasil air panas menghasilkan panas saja (air panas). Boiler ini juga digunakan jika *heat recovery* tidak memungkinkan (pendinginan kelebihan panas).
- 2) Boiler dengan tekanan rendah hanya dapat memproduksi uap bertekanan rendah.
- 3) Boiler penghasil uap menghasilkan tenaga dan menggabungkan tenaga dan memproses uap atau panas.

Potensi implementasi fasilitas *waste to energy* sangat bergantung pada kondisi ekonomi, sosial dan politik tertentu dari negara dimana strategi pelaksanaan harus dilaksanakan. Klasifikasi berikut untuk berbagai negara hanyalah satu kemungkinan pendekatan untuk menganalisis berbagai kemungkinan hasil dalam hal pemulihan energi dari limbah di seluruh dunia.

Berdasarkan pendapatan negara, Indonesia digolongkan dalam negara dengan pendapatan menengah-ke bawah¹⁶.

Tabel 2.5 Strategi Fasilitas Waste to Energy di Negara dengan Pendapatan Menengah ke Bawah

Sektor Energi	Sektor Limbah	Strategi Waste to Energy
Terdapat jenis energi yang lebih beragam daripada negara yang berpenghasilan tinggi	Peningkatan produk limbah yang tak terelakkan didorong oleh faktor industri, kesejahteraan dan konsumsi masyarakat	Penting untuk menyusun struktur <i>waste to energy</i> dalam kaitannya dengan kebutuhan dan peluang yang spesifik untuk negara tersebut
Energi listrik dibutuhkan di area yang memiliki tingkat urbanisasi tinggi, proses modern yang dikembangkan dan keberadaan grid jaringan listrik	Tingkat pengumpulan limbah masih beragam dan masih ada sektor limbah informal yang cukup besar	Investasi untuk pelaksanaan <i>fasilitas waste to energy</i> harus diimbangi dengan investasi di sektor pengelolaan limbah (dan air)
Bentuk energi lain yang diperlukan adalah pemanasan/pendinginan rumah tangga, proses uap untuk industri dan syngas untuk transportasi	Pengumpulan, pengolahan dan pembuangan limbah yang tidak didukung oleh pihak berwenang setempat dan atau pemerintah	Kerangka peraturan di sekitar lingkungan/emisi mungkin tidak hadir atau efektif. Perlu ada kerangka kerja yang tepat untuk mendorong investasi fasilitas <i>waste to energy</i> ke arah yang berkelanjutan.

Sumber: (World Energy Council, 2016)

2.4.5 Residu Insinerasi dan Kontrol Polusi

Selama proses insinerasi, sebagian besar limbah dibakar dan diubah menjadi gas yang tidak berbahaya seperti karbon dioksida (CO₂) dan uap air (H₂O). Gas-gas ini dibuang sebagai gas buang ke atmosfer melalui setumpuk tanaman, bersamaan dengan kelebihan oksigen dan nitrogen dari udara bakar. Selain itu, gas buang mengandung berbagai senyawa polusi udara, yang konsekuensinya harus dikurangi.

¹⁶ The World Bank, 2017

Namun, bagian dari limbah tidak mudah terbakar dan dikeluarkan dari tungku pembakaran sebagai terak, residu padat. Proses pembersihan gas buang juga menghasilkan residu, baik secara langsung atau dengan perlakuan selanjutnya dari cairan penggosok bekas, tergantung metode pembersihan gas buang yang digunakan. Bergantung pada keadaan setempat, beberapa terak dapat digunakan atau didaur ulang, namun residu pengolahan gas buang biasanya tidak berguna dan harus ditimbun. Dengan demikian, tempat pembuangan limbah untuk residu insinerator harus ditempatkan, dirancang, dan dioperasikan dengan mempertimbangkan sifat pelindian dari residu individu.

2.4.6 Dampak Terhadap Lingkungan dan Kesehatan Kerja

Fasilitas insinerasi limbah umumnya berada dekat dengan daerah berpenduduk padat karena alasan ekonomi. Efek lingkungan negatif dari fasilitas insinerasi dapat mempengaruhi sejumlah besar orang. Kombinasi antara perencanaan dan tindakan teknis diperlukan untuk meminimalisasi dampak tersebut.

Dari residu insinerasi, hanya terak yang bisa dianggap ramah lingkungan untuk digunakan kembali. Residu pembersih gas buang jauh lebih mudah larut daripada limbah asli dan harus dibuang ke tempat pembuangan limbah yang dirancang dan dioperasikan dengan tepat untuk menghindari dampak negatif pada permukaan tanah atau permukaan air.

Fasilitas insinerasi limbah mungkin memiliki dampak negatif pada kualitas udara yang cukup luas. Limbah itu sendiri dapat menciptakan bau dan debu di lingkungan sekitar, dan gas buang yang mengandung partikel dan uap tersebar di area yang lebih luas, mengurangi kualitas udara secara keseluruhan jika tidak ditangani dengan cukup.

Limbah mungkin mengandung bahan berbahaya dan menular (walaupun tidak seharusnya). Dikombinasikan dengan pelepasan debu yang mengandung endotoksin, hal tersebut berisiko pada kesehatan orang-orang yang bekerja di area penerimaan fasilitas insinerasi. Tindakan pencegahan khusus harus dilakukan untuk meminimalkan risiko tersebut.

Risiko kesehatan kerja dan tindakan perlindungan untuk sisa tanaman serupa dengan yang diidentifikasi atau dibutuhkan di tempat-tempat seperti pembangkit listrik berbahan bakar batubara. Kriteria pengolahan limbah untuk meminimalisasi dampak negatif residu pengolahan limbah ke lingkungan adalah sebagai berikut:

✓	✓	✓	Instalasi pengolahan gas buang harus mampu menghilangkan debu sekurang-kurangnya seefisien pengendapan elektrostatik dua tahap (kontrol emisi dasar, debu < 30 mg/Nm ³).
✓	✓	✓	TPA yang dikendalikan dan dioperasikan dengan baik harus tersedia untuk pembuangan residu.
✓	✓		Untuk menghindari kebisingan, debu dan bau di daerah pemukiman, fasilitas insinerasi limbah harus ditempatkan di zona penggunaan lahan yang ditujukan untuk industri menengah atau berat.
✓	✓		Ukuran cerobong harus dua kali tinggi bangunan tertinggi dalam 1 km, atau setinggi 70 meter.

A. Dampak terhadap lingkungan

Fasilitas insinerasi limbah yang dibangun dengan benar dan dioperasikan diharapkan dapat dibandingkan dengan kegiatan industri menengah sampai berat sejauh dampak lingkungan, persyaratan transportasi dan kebutuhan infrastruktur lainnya dan potensi gangguan masyarakat.

Karena fasilitas insinerasi limbah mirip dengan kegiatan industri menengah sampai berat, maka harus ditempatkan di dalam zona yang dipersyaratkan untuk kegiatan industri. Selain itu, karena mirip dengan pembangkit listrik dalam produksi dan residunya, fasilitas ini sebaiknya ditempatkan di dekat pembangkit listrik, terutama yang berbahan bakar batubara. Berikut akan dipaparkan beberapa kemungkinan dampak lingkungan dan tindakan yang dirancang untuk menguranginya:

1) Kebisingan

Kebisingan yang dihasilkan pada tanaman insinerasi berasal dari pengangkutan limbah dan residu pengolahan ke dan dari fasilitas insinerasi, menangani limbah dan residu di dalam fasilitas insinerasi, dan emisi kebisingan dari peralatan yang terpasang.

2) Bau

Proses pembakaran menghancurkan semua zat pemancar bau dalam limbah, dan terak dan abu terbang steril dan tidak berbau setelah pendinginan. Penanganan limbah yang diperlukan di dalam dan sekitar lubang akan menciptakan bau dan akan membuat bakteri dan racun mengudara.

3) Polusi udara

Polutan udara dari proses pembakaran dipancarkan melalui tumpukan. Dengan mengasumsikan proses pembakaran yang optimal untuk penghancuran partikel dan gas yang lengkap, pembersihan gas buang yang diterapkan dan tinggi tumpukan menentukan kontribusi yang dihasilkan terhadap kualitas udara.

4) Pembangkitan energi dan akses ke ruang pembuangan residu

Dalam proses pembakaran, volume limbah akan berkurang sekitar 90% dan berat 70-75%. Output residu dari proses pembakaran terutama adalah abu dasar (terak), *boiler* dan *fly ash* hanya akan menyumbang sebagian kecil limbah yang dibakar.

5) Ketersediaan air

Pasokan air diperlukan untuk air umpan ke boiler dan untuk berbagai proses di fasilitas insinerasi limbah: pembersihan, pendingin terak, scrubber gas buang (jika diterapkan), dan keperluan sanitasi staf. Air pendingin terak tidak memiliki persyaratan kualitas, sehingga air sungai yang tercemar atau air tanah dapat digunakan.

Konsumsi air untuk pendinginan terak dapat diasumsikan berada dalam skala besar dari 0,05 sampai 0,01 m³ / metrik ton limbah jika ekstraktor terak yang ada diaplikasikan. Air juga akan digunakan jika scrubber gas buang atau reaktor semi kering dipasang. Kualitas air minum tidak diperlukan untuk proses ini, namun air harus memiliki kandungan padat yang relatif rendah, sehingga kapur dapat diencerkan di dalamnya dan disemprotkan melalui nosel ke aliran gas buang. Konsumsi air akan tergantung pada teknologi yang diterapkan.

6) Pembuangan air limbah

Air limbah yang dihasilkan dari proses basah akan memiliki konsentrasi garam yang tinggi dan logam berat terlarut. Kadmium dapat diasumsikan paling penting sehubungan dengan batas emisi. Konsentrasi yang sebenarnya akan tergantung pada komposisi limbah yang terbakar.

B. Dampak terhadap kesehatan pekerja

Dalam artikel berjudul *From Machine to Habitat* yang ditulis oleh Miriel Ko¹⁷, dijelaskan perkembangan industri sebelum abad ke-20, desain bangunan dengan tipologi industri menekankan pentingnya kebutuhan untuk tercapainya keamanan dan efisiensi. Secara sederhana, pernyataan ini dapat dijelaskan dengan fungsi dan utilitas yang terkait dengan lingkungan serta nilai estetika yang tidak dianggap sebagai bagian penting dari proses desain. Sebagai antisipasi dampak kebakaran, desain dari tipologi bangunan industrial seringkali berupa void yang dilingkupi elemen dinding, partisi dan tangga. Penggantian elemen dengan atap datar dan bukaan jendela yang lebar, tipologi industrial dengan gaya baru seperti ini dirancang untuk mencegah penyebaran api ketika terjadi kebakaran, tetapi juga untuk membantu proses evakuasi. Material dinding dari pasangan bata dengan bingkai kayu yang masif, bangunan industrial seringkali memiliki ruang yang bebas kolom. Hal ini dapat menciptakan efisiensi ruang untuk performa mesin yang berat.

Dalam merancang sebuah fasilitas dengan tipologi industrial, selain memperhatikan keamanan dan efisiensi, perlu juga memperhatikan aspek tenaga kerja manusia. Selama ini, tenaga kerja pada fasilitas industri masih dianggap setara dengan mesin. Perspektif ini perlu diperbaharui, bahwa pekerja industri merupakan manusia yang perlu diperlakukan secara manusiawi, bermartabat dan berkelanjutan.

¹⁷ Dalam majalah FuturArc Vol. 53 “Industrial Building” (Ko, 2017)

Pada fasilitas insinerasi, banyak pekerja yang terpapar senyawa beracun, terutama logam berat.¹⁸ Saat ini, perlakuan terhadap pekerja terkait dengan kesehatan, identitas perusahaan dan konsep keberlanjutan merupakan aspek yang sangat berpengaruh pada ruang kerja. Jika tujuan utama dari proses desain untuk arsitektur industrial hanya sebatas keamanan dan efisiensi; teknologi, globalisasi dan hak asasi manusia (sebagai pekerja) juga memiliki prioritas yang lebih tinggi.

Desain dan fungsi dari fasilitas industri yang dioperasikan oleh manusia ini mempengaruhi daya jual global dari sebuah perusahaan dan pertumbuhan jangka panjang dari perusahaan tersebut. Usaha bersama dari berbagai pemerintahan dan organisasi internasional mendesak operator industrial untuk mempertimbangkan kesehatan dan keselamatan kerja, sumber daya manusia dan emisi global yang dihasilkan. Dengan sertifikasi tertentu, perancangan bangunan dengan tipologi industrial bertransformasi menjadi dimensi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan secara paradigma sosial.

2.5 Standar Perancangan

Berikut ini merupakan standar yang perlu diperhatikan untuk merancang fasilitas *waste to energy* berdasarkan instrumen/mesin yang dipergunakan dan ruang yang diperlukan:

A. *Furnance/Boiler* (Pembakaran)

Area pembakaran terdiri dari beberapa urutan proses pengolahan limbah, yaitu sebagai berikut:

1) *Tipping hall*

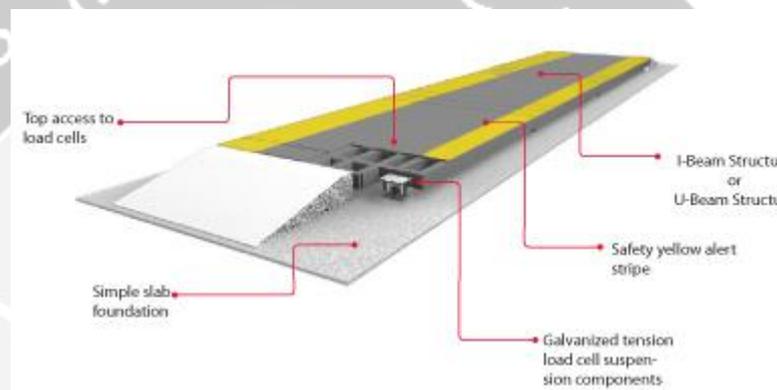
Tipping hall merupakan area penerimaan limbah dari truk pengumpul limbah. Perancangan *tipping hall* membutuhkan beberapa kebutuhan ruang berikut:

¹⁸ EA, J, D, & E, 1992

Untuk mengetahui jumlah limbah yang diterima, dilakukan proses penimbangan dengan jembatan timbang. Sementara itu, untuk menanggulangi bau dari limbah menyebar ke area yang lebih luas, area *tipping hall* dapat dirancang tertutup.

a) Jembatan timbang

Jembatan timbang/*truck scale weighbridge* merupakan alat untuk menghitung muatan truk. Jembatan timbang dipergunakan untuk mendata jumlah limbah yang diangkut oleh setiap truk dalam proses penerimaan limbah.

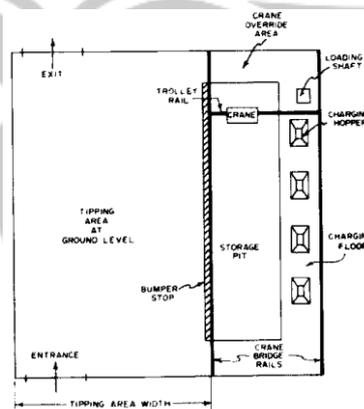


Gambar 2.8 Truck scale weighbridge

Sumber: AGWEIGH, n.d.

b) Area manuver kendaraan

Area manuver kendaraan truk pengangkut limbah perlu didesain secara efektif berdasarkan ukuran truk supaya limbah dapat masuk ke *waste bunker* dengan tepat.



Gambar 2.9 Area manuver tipping point

Sumber: Chiara & Callender, Time Saver Standards for Building Types, 1983

2) *Waste bunker*

Limbah yang diterima ditampung dalam *waste bunker*. Dimensi *waste bunker* ditentukan berdasarkan kapasitas limbah yang diterima. *Waste bunker* harus dirancang untuk menampung limbah selama kurang lebih satu minggu untukantisipasi adanya proses perbaikan atau penghentian lainnya dalam operasional fasilitas *waste to energy*. *Waste bunker* pada umumnya berbentuk bak di bawah level tanah dengan konstruksi beton bertulang kepad air untuk kekuatan struktur dari beban limbah yang ditampung. Umumnya, *waste bunker* menggunakan pondasi raft.



Gambar 2.10 Konstruksi *waste bunker* dengan pondasi raft

Sumber: Hereford & Worcester Mercia Envirocover Waste to Energy, n.d.

Waste bunker dapat didesain tertutup untuk mereduksi bau limbah di dalam bak dengan memberi bukaan untuk proses penerimaan limbah.

3) *Waste feeding*

Di dalam *waste bunker*, limbah diproses dengan *crane*/mesin derek untuk diantarkan ke parasut zona pembakaran. Proses *waste feeding* dilakukan dengan mengoperasikan *crane* melalui ruang operator yang letaknya berdekatan secara visual dengan *waste bunker*.

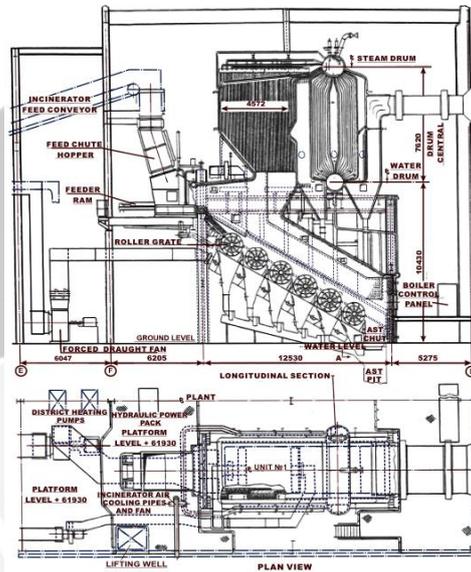


Gambar 2.11 *Crane operator room*

Sumber: Capozzi, 2015

4) Rangkaian proses pembakaran

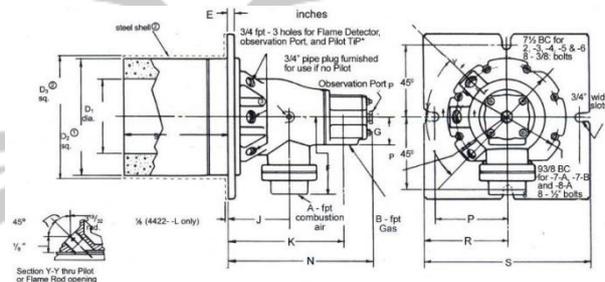
Limbah memasuki proses pembakaran dalam mesin boiler. Berikut ini adalah layout mesin boiler:



Gambar 2.12 Mesin boiler

Sumber: Ruffell, 2011

Mesin boiler dioperasikan dengan tenaga kipas/*ID fan*. *ID fan* merupakan sumber kebisingan utama pada fasilitas *waste to energy*. Maka dari itu, perlu peredam kebisingan dengan penerapan dinding beton.

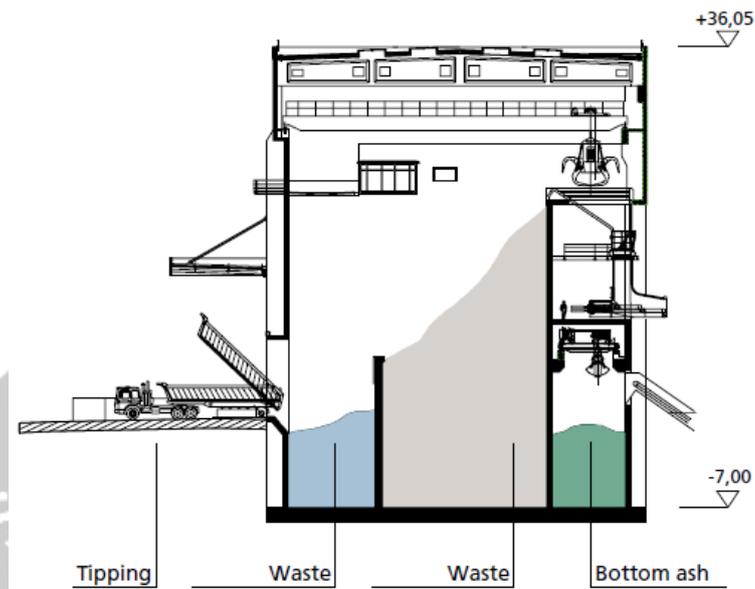


Burner Model	A	B	D ₁	D ₂	D ₃	E	F	G	J	K	N	P	R	S	WEIGHT KG
FFG-2	1 1/4	1	5	8 1/2	9 1/2	1/2	5 1/4	2	4 3/8	8 5/8	10 5/8	5 1/4	6	12	35
FFG-3	1 1/2	1	5	8 1/2	9 1/2	1/2	5 1/4	2	4 3/8	8 5/8	10 5/8	5 1/4	6	12	35
FFG-4	2	1 1/4	5	8 1/2	9 1/2	1/2	5 1/4	2	4 3/8	8 5/8	10 5/8	5 1/4	6	12	35
FFG-5	2 1/2	1 1/2	5	8 1/2	9 1/2	1/2	5 1/4	2	4 3/8	8 5/8	10 5/8	5 1/4	6	12	35
FFG-6	3	1 1/2	5	8 1/2	9 1/2	1/2	5 7/16	2	4 3/8	8 5/8	10 5/8	5 1/4	6	12	35

Gambar 2.13 *ID fan*

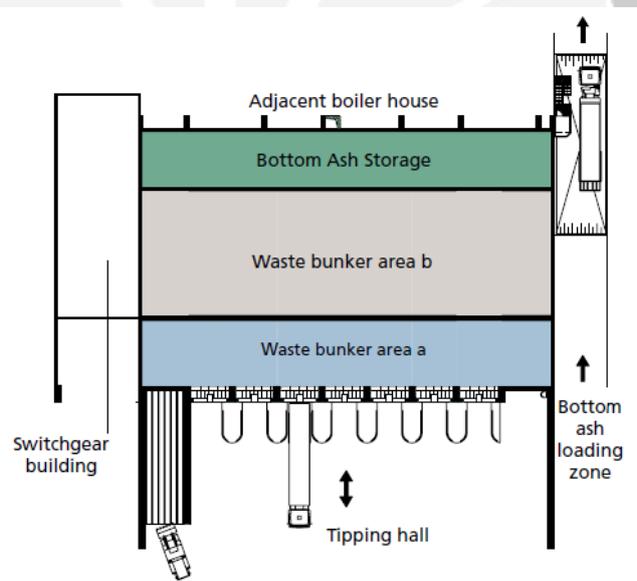
Sumber: Ruffell, 2011

Terdapat keberdekatan ruang berdasarkan proses pengolahan limbah yang perlu dipatuhi, yaitu keberdekatan antara ruang: *tipping point*, *waste bunker*, *waste feeding* dan *boiler*.



Gambar 2.14 Potongan area penerimaan
 Sumber: Weber

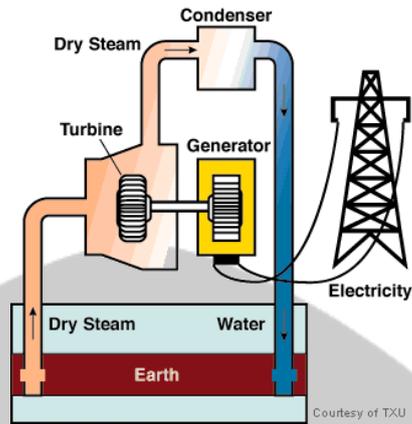
Tata letak ruang pada ruang yang berdekatan dapat dijelaskan dengan gambar berikut:



Gambar 2.15 Tata letak massa area penerimaan limbah
 Sumber: Weber

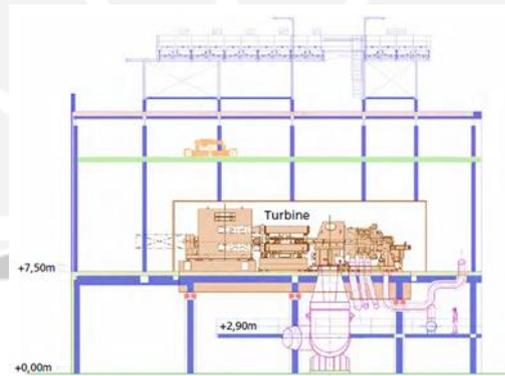
B. Energy Recovery (Pembangkitan Energi)

Setelah melalui tahap pembakaran, uap dari boiler dialirkan ke *steam turbine* dan generator untuk membangkitkan energi.



Gambar 2.16 Skema energy recovery
 Sumber: The Heart of America, 2011

Energi yang dihasilkan oleh generator kemudian disalurkan ke grid listrik terdekat untuk didistribusikan sebagai sumber energi. Penyaluran energi dilakukan dengan membuat instalasi kabel bawah tanah.

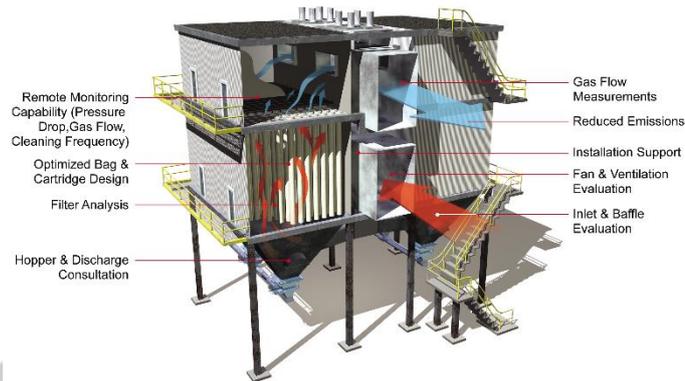


Gambar 2.17 Ruang generator dan turbin
 Sumber: Weber

Turbin dan generator memiliki kelemahan, yaitu kebisingan. Untuk meredam kebisingan, dapat dilakukan pemilihan spesifikasi mesin modern yang tidak terlalu bising dan atau dengan peredaman ruang berdinding beton.

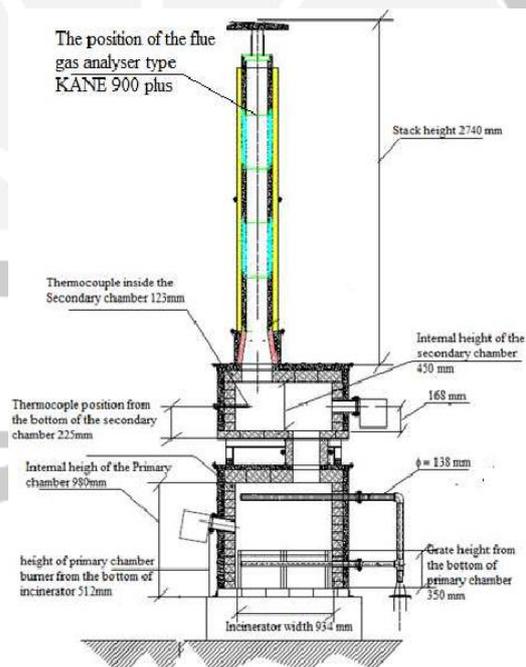
C. Flue Gas Treatment (Penetralan Gas Buang)

Gas buang mengandung polutan dari limbah dan membutuhkan penetralan sebelum dilepaskan ke atmosfer. Setelah melalui boiler, residu gas masuk ke instalasi *baghouse filter*. Pada instalasi ini, residu gas masih mengandung residu padat, yaitu abu. Residu abu ditampung pada *hopper and discharge consultation* untuk diangkut ke *residue storage*.



Gambar 2.18 Skema energy recovery
 Sumber: The Heart of America, 2011

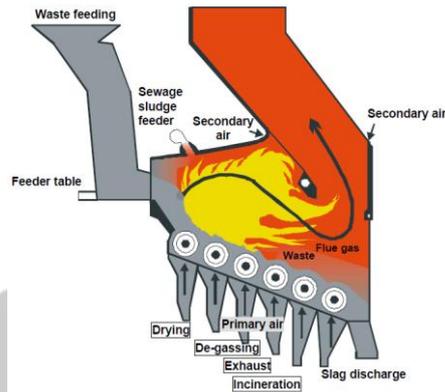
Gas buang yang telah dikontrol kadar polusinya dialirkan ke cerobong asap. Ketinggian cerobong dapat disesuaikan berdasar pertimbangan topografi dan kondisi meteorologikal yang berlaku.



Gambar 2.19 Potongan cerobong asap
 Sumber: Omari, Njau, John, & Mtui, 2015

D. Residue Handling (Penanganan Residu Padat)

Penanganan residu padat terdapat pada rangkaian instalasi mesin boiler pada bagian akhir *moving grate*, yaitu *slag discharge*, setelah melewati proses pembakaran.



Gambar 2.20 Pembakaran limbah menjadi residu padat
 Sumber: European Commision, 2006



Gambar 2.21 Detail slag discharge
 Sumber: European Commision, 2006

Residu padat pada *slag discharge* ditampung untuk kemudian diangkut ke *storage residue*. Residu padat dapat dimanfaatkan sebagai material konstruksi jalan.

2.6 Studi Preseden

2.6.1 Fasilitas Waste to Energy di Roskilde, Denmark

A. Deskripsi Proyek

Denmark merupakan negara di Eropa dengan pengolahan limbah terbaik di dunia, salah satunya adalah fasilitas *waste to energy* di Roskilde. Fasilitas dengan luas bangunan sebesar 7.400 m² ini dirancang oleh Erick van Egeraat dan Ramboll Studio. Fasilitas ini ada sejak tahun 2002 dan diperbaharui kembali pada tahun 2013.

Limbah yang masuk ke fasilitas ini berasal dari 9 kota yang berada di sekitar Roskilde dan beberapa daerah di luar Denmark yang diolah dengan teknologi insinerasi. Pengolahan limbah di fasilitas ini menghasilkan energi listrik dan panas untuk seluruh daerah Roskilde.



Gambar 2.22 Fasilitas *waste to energy* di Roskilde, Denmark

Sumber: Archdaily, 2014

Fasilitas WtE di Roskilde memproses limbah sejumlah 200,000 ton per annum (\pm 550 ton per hari) dengan sumber daya utama berupa MSW. Proses pengolahan limbah ini dapat menghasilkan energi listrik dengan daya sebesar 20 MWe¹⁹ dan 60 MWth²⁰ serta uap sebesar 50 bars dengan suhu 425°C.

¹⁹ MWe = Megawatt electrical, yaitu satuan daya listrik yang biasa digunakan pada fasilitas pembangkit energi.

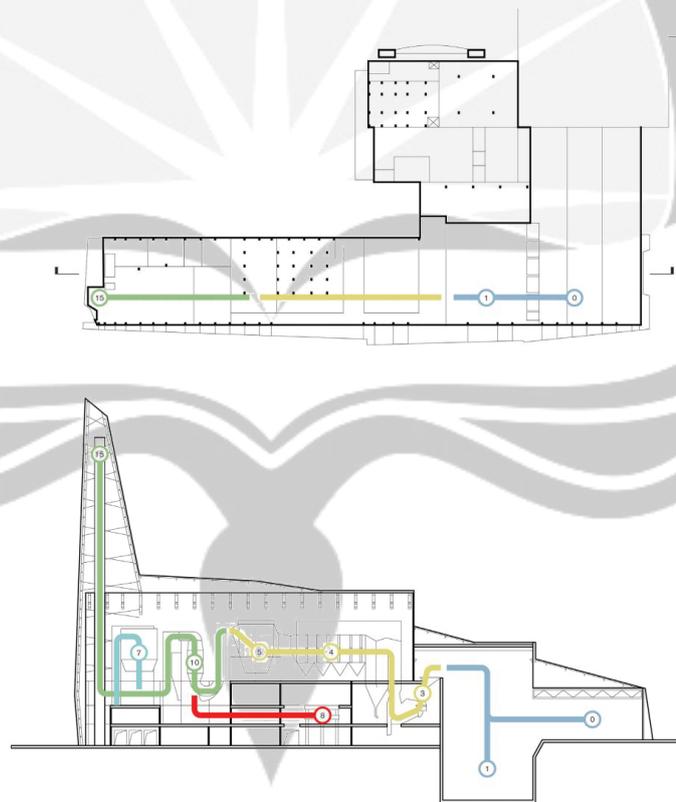
²⁰ MWth = Megawatt thermal, yaitu satuan daya thermal yang biasa digunakan pada fasilitas pembangkit energi.

B. Tata Letak



Gambar 2.23 Situasi fasilitas waste to energy di Roskilde
Sumber: Google Maps 2014 dengan editing penulis

Fasilitas waste to energy di Roskilde terletak di daerah industri perkotaan. Fasilitas ini dapat diakses melalui jalan arteri di Roskilde. Fasilitas ini juga berada dekat dengan area pembuangan sampah di wilayah Roskilde.



Gambar 2.24 Layout ruang pada Roskilde WtE
Sumber: Kara, Villoria, & Georgoulas, 2016

Tata letak ruang dalam pada fasilitas WtE di Roskilde disusun secara linear memanjang ke belakang dari tipping point hingga ke cerobong.

C. Gubahan Massa dan Tampilan Fasad

Fasad dari fasilitas ini terdiri dari 2 lapisan, yaitu: lapisan dalam berupa selubung yang berfungsi sebagai *climatic barrier* yang memungkinkan pemilihan material pada lapisan terluar dapat lebih leluasa untuk menciptakan citra dengan material alumunium berwarna kecoklatan yang berpola irreguler dengan potongan lubang-lubang lingkaran. Kulit terluar ini dirancang untuk memberikan warna natural saat siang hari. Sementara pada malam hari, pencahayaan dirancang di antara kedua fasad sehingga menimbulkan tambahan pencahayaan yang dramatis.



Gambar 2.25 Fasad fasilitas waste to energy di Roskilde, Denmark
Sumber: ARCHDAILY, 2014

D. Fungsi Penunjang dan Pendukung

Fasilitas ini tidak memiliki fungsi penunjang dan pendukung, namun fasad fasilitas ini menciptakan landmark baru di Roskilde, yaitu menara energi. Pada malam hari, lapisan depan berlubang lampu latar mengubah menara energi bercahaya dengan lembut, yang menjadi simbol produksi energi fasilitas pengolahan limbah. Beberapa kali dalam satu jam, percikan cahaya secara bertahap akan tumbuh bermetafora bagaikan nyala api yang membakar seluruh bangunan. Ketika api metafora berhenti, menara energi itu kembali ke memunculkan cahaya yang lembut.

2.6.2 Amager Resource Center, Copenhagen, Denmark



Gambar 2.26 Aerial view Amager Resource Center
Sumber: BIG, 2010

A. Deskripsi Proyek

Amager Resource Center merupakan fasilitas *waste to energy* baru yang menggantikan fasilitas lama yang sudah berumur 45 tahun dengan empat tungku pembakaran. Pada 2017, Amager Resource Center akan menjadi pabrik yang mampu membakar limbah rumah tangga (MSW) dengan kapasitas 2×35 ton per jam.

Amager Resource Center akan dapat memproses limbah rumah tangga sebesar 435.000 ton per tahun yang bersumber dari 500.000-700.000 rumah dan sedikitnya 46.000 pabrik yang ada di Denmark. Fasilitas ini diproyeksikan dapat menghasilkan energi yang cukup untuk memenuhi kebutuhan listrik dan panas untuk 140.000 rumah.

Teknologi yang digunakan pada fasilitas ini adalah teknologi insinerasi. Selain dapat menghasilkan energi listrik dan panas untuk 140.000 rumah, fasilitas ini mampu menghasilkan 100.000.0000 air dari proses kondensasi uap, 90% logam yang dapat dipergunakan kembali yaitu sebanyak 10.000 ton per tahun, serta 100.000 ton abu sisa pembakaran yang dapat digunakan untuk material jalan yang dapat menghemat penggunaan kerikil.

B. Tata Letak

1. Siteplan

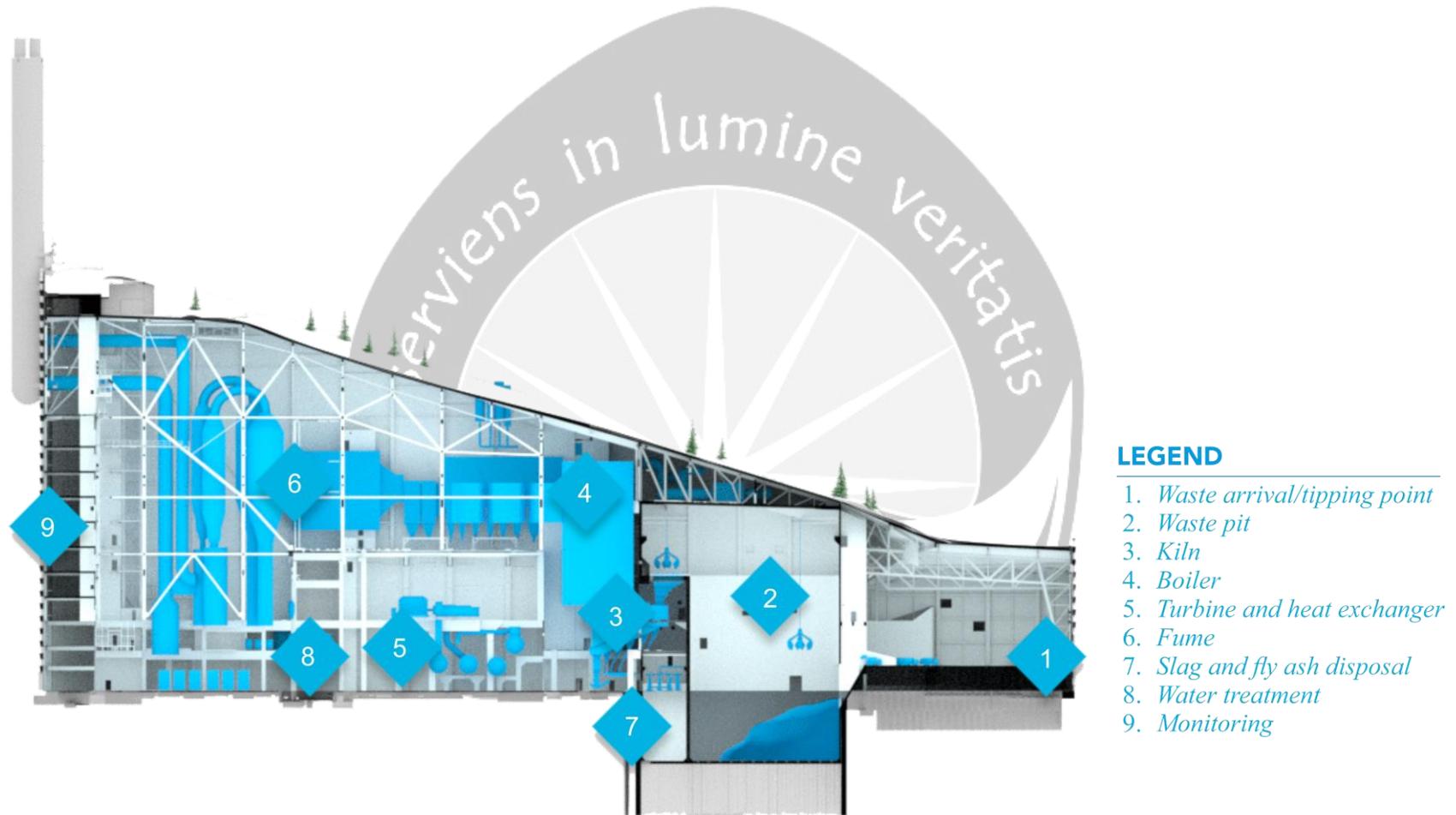


Gambar 2.27 Perspektif situasi Amager Resource Center
Sumber: BIG, 2010

Amager Resource Center terletak di area industrial di Copenhagen, Denmark.

2. Potongan

Tata letak ruang dalam Amager Resource Center dibagi menjadi dua bagian: bawah dan atas. Massa bagian bawah digunakan untuk proses pengolahan *waste to energy*, sementara pada massa atas digunakan untuk fasilitas kantor dan kafe. Secara lebih teknis, fasilitas insinerasi pada Amager Resource Center dapat dijelaskan sebagai berikut:

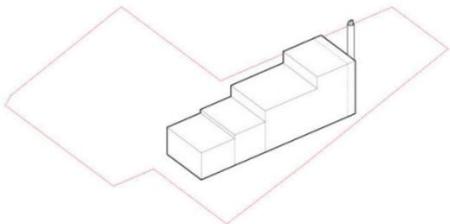
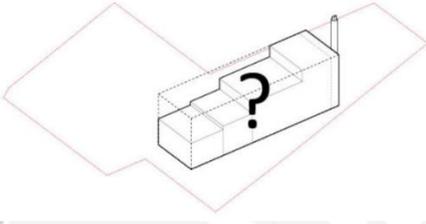
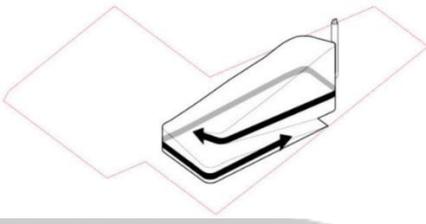
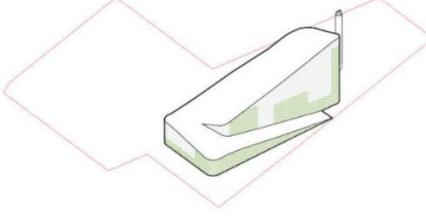
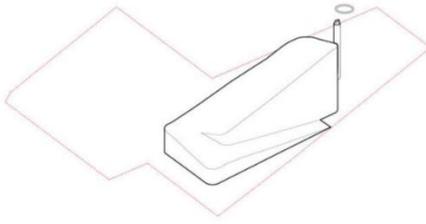


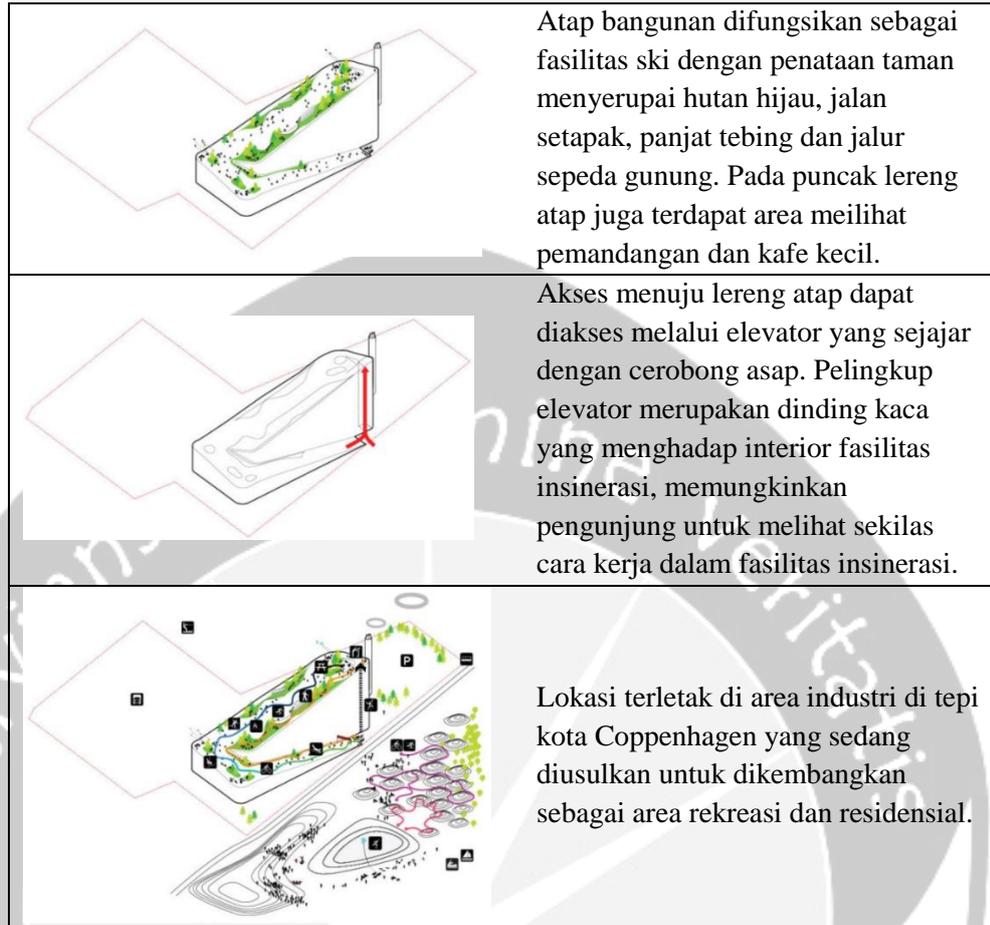
Gambar 2.28 Anatomi Amager Resource Center secara Teknikal
 Sumber: (Amager Ressource Center, n.d.) dengan editing Penulis

C. Gubahan Massa dan Tampilan Fasad

Berikut ini adalah proses transformasi gubahan massa bangunan Amager Resource Center, yaitu sebagai berikut:

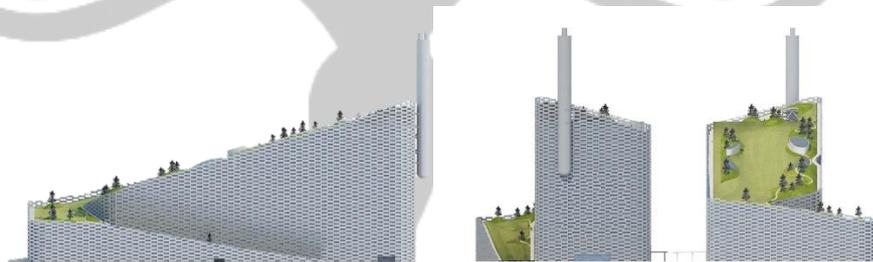
Tabel 2.6 Proses transformasi bentuk ARC

Proses Transformasi	
	<p>Volume internal fasilitas insinerasi ditentukan berdasarkan aspek engineering dan teknis. Karena ukuran dan persyaratan yang ketat untuk penentuan posisi yang tepat, struktur utama bangunan harus diintegrasikan dengan ketentuan mesin yang diperlukan.</p>
	<p>Menciptakan fasilitas insinerasi yang menguntungkan dari aspek ekonomi, lingkungan dan sosial. Alih-alih menganggapnya sebagai objek arsitektur yang terisolasi, kami menganggap tugas merancang fasad sebagai kesempatan untuk konteks lokal.</p>
	<p>Bangunan utama dilingkupi fasad menerus dari material bata aluminium yang disusun saling silang. Bukaan di antara bata menjadi celah untuk pencahayaan alami untuk ruang proses insinerasi dan kantor administrasi.</p>
	<p>Bata pada fasad juga berfungsi sebagai area tanam vertikal yang menciptakan fasad hijau dan menjadikan bangunan seperti pegunungan yang rindang dari kejauhan.</p>
	<p>Modifikasi sederhana pada cerobong asap yang dapat mengepulkan asap berbentuk cincin per pembakaran 1 ton fosil CO₂. Hal ini berfungsi komunikatif sebagai pengingat lembut dampak konsumsi.</p>



Sumber: BIG, 2010

Gubahan massa Amager Resource Center menyesuaikan dengan lingkungan sekitar yang berupa bangunan industrial dan mengadaptasi bentuk Gunung Alpine pada massa atap untuk menambah fungsi sebagai fasilitas rekreasi ski.



Gambar 2.29 Massa Amager Resource Center
Sumber: Mountainworks, n.d.

D. Fungsi Penunjang dan Pendukung

Fungsi pendukung fasilitas *waste to energy* ini adalah fasilitas rekreasi yang berada di massa atap dan fasad bangunan. Atap bangunan dapat diakses

oleh publik sebagai sarana rekreasi ski. Sementara pada fasad bangunan didesain wall climbing untuk rekreasi olahraga panjat tebing.



Gambar 2.30 Climbing wall pada Amager Resource Center
Sumber: BIG, 2010



Gambar 2.31 Area ski pada atap Amager Resource Center
Sumber: BIG, 2010

2.6.3 Shenzen East Waste to Energy Plant, Shenzen, China

A. Deskripsi Proyek

Rencana Shenzen East Waste to Energy Plant yang akan mampu membakar 5.000 ton limbah per hari, sepertiga dari limbah yang dihasilkan oleh 20 juta penduduk Shenzhen setiap tahun. Selain membakar limbah dan pembangkit listrik, tanaman tersebut akan dijadikan tempat mengajar warga tentang tujuannya.

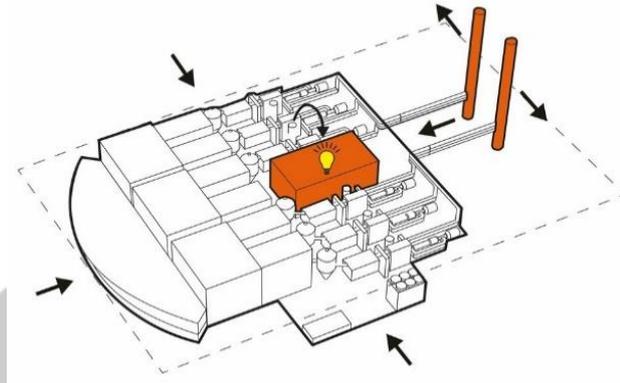


Gambar 2.32 Shenzen East Waste to Energy Plant

Sumber: Architizer, n.d.

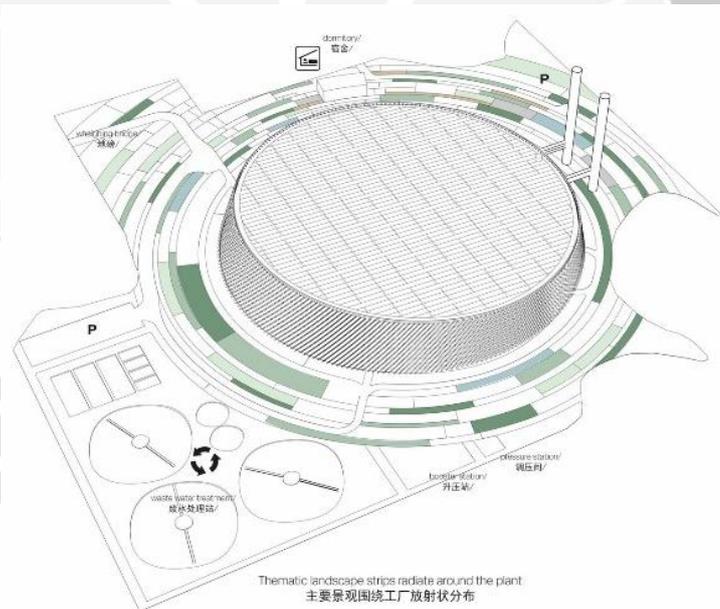
Sejak awal, tujuannya adalah merancang pabrik limbah-ke-energi yang sederhana, bersih, ikonik dan indikator yang patut dipikirkan perkembangan pemikiran ke depan yang sedang dibuat di sektor limbah-ke-energi di China, dan bagaimana ini dapat digambarkan tidak hanya untuk penduduk sekitar Shenzhen tetapi untuk dunia. Dengan mengusulkan bentuk lingkaran yang bersih, jejak tanaman dikendalikan dan mengurangi jumlah penggalian yang dibutuhkan untuk membangun di lokasi. Saat selesai, pabrik Waste-to-Energy akan menjadi yang terbesar dari jenisnya di dunia.

B. Tata Letak



Gambar 2.33 Tata Letak Mesin
Sumber: Architizer, n.d.

Perletakan linear penataan fasilitas insinerasi pada umumnya ditransformasikan menjadi susunan kompak yang terpadu secara sentral/terpusat.



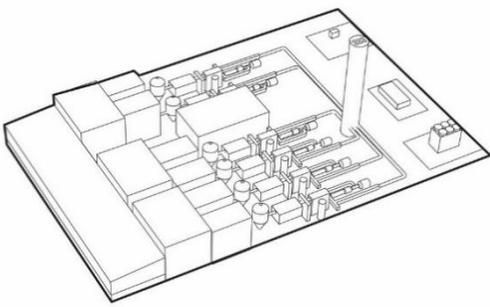
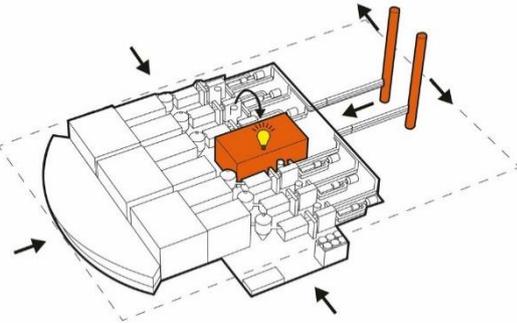
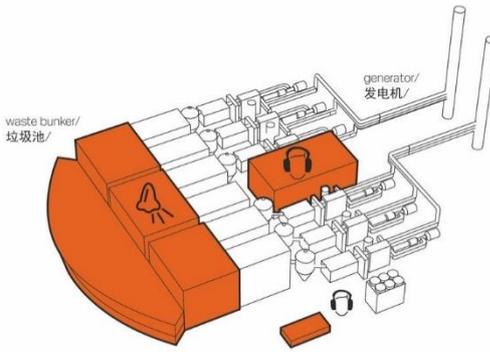
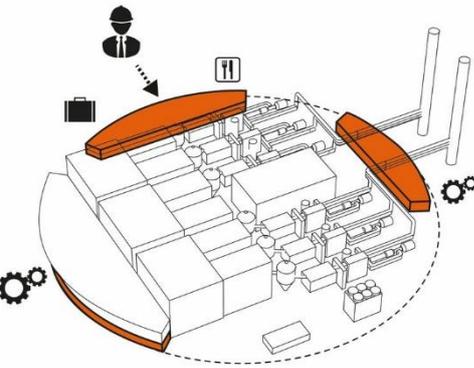
Gambar 2.34 Tata letak lansekap
Sumber: Architizer, n.d.

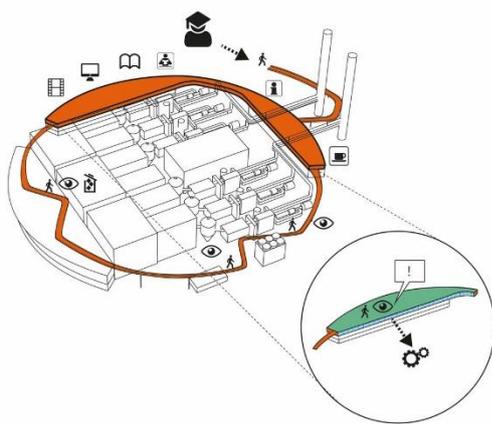
Tata letak lansekap tematik yang berada di sekeliling bangunan utama yang menambah akses view panorama dari dalam bangunan menuju lingkungan lansekap alami sekitar.

C. Gubahan Massa dan Tampak

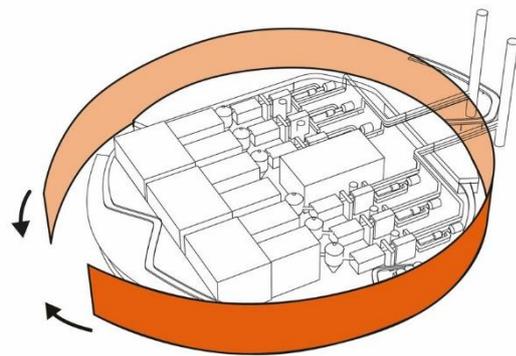
Berikut ini adalah proses transformasi gubahan massa bangunan Shenzhen East Waste to Energy Plant, yaitu sebagai berikut:

Tabel 2.7 Proses transformasi bentuk Shenzhen East WTE

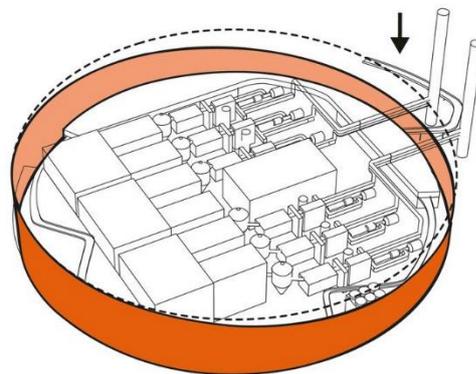
Proses Transformasi	
	Perletakan mesin pada site secara standar, yaitu dengan susunan linear.
	Perletakan linear ditransformasikan menjadi susunan kompak yang terpadu secara sentral.
	Pembagian zona utama berdasarkan pertimbangan kebisingan dan bau diletakkan secara berjauhan namun masih dapat dikontrol dengan terjangkau.
	Perletakan area penunjang yang diletakkan mengelilingi fasilitas utama agar mudah dalam aksesibilitas.



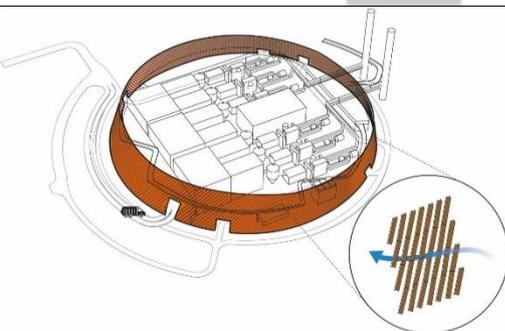
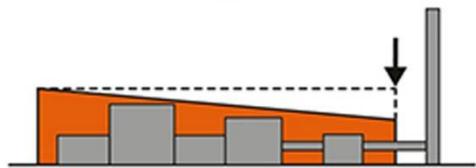
Terdapat area pengunjung yang berpusat pada salah satu sisi massa lingkaran fasilitas insinerasi serta area akses yang mengelilingi fasilitas insinerasi.



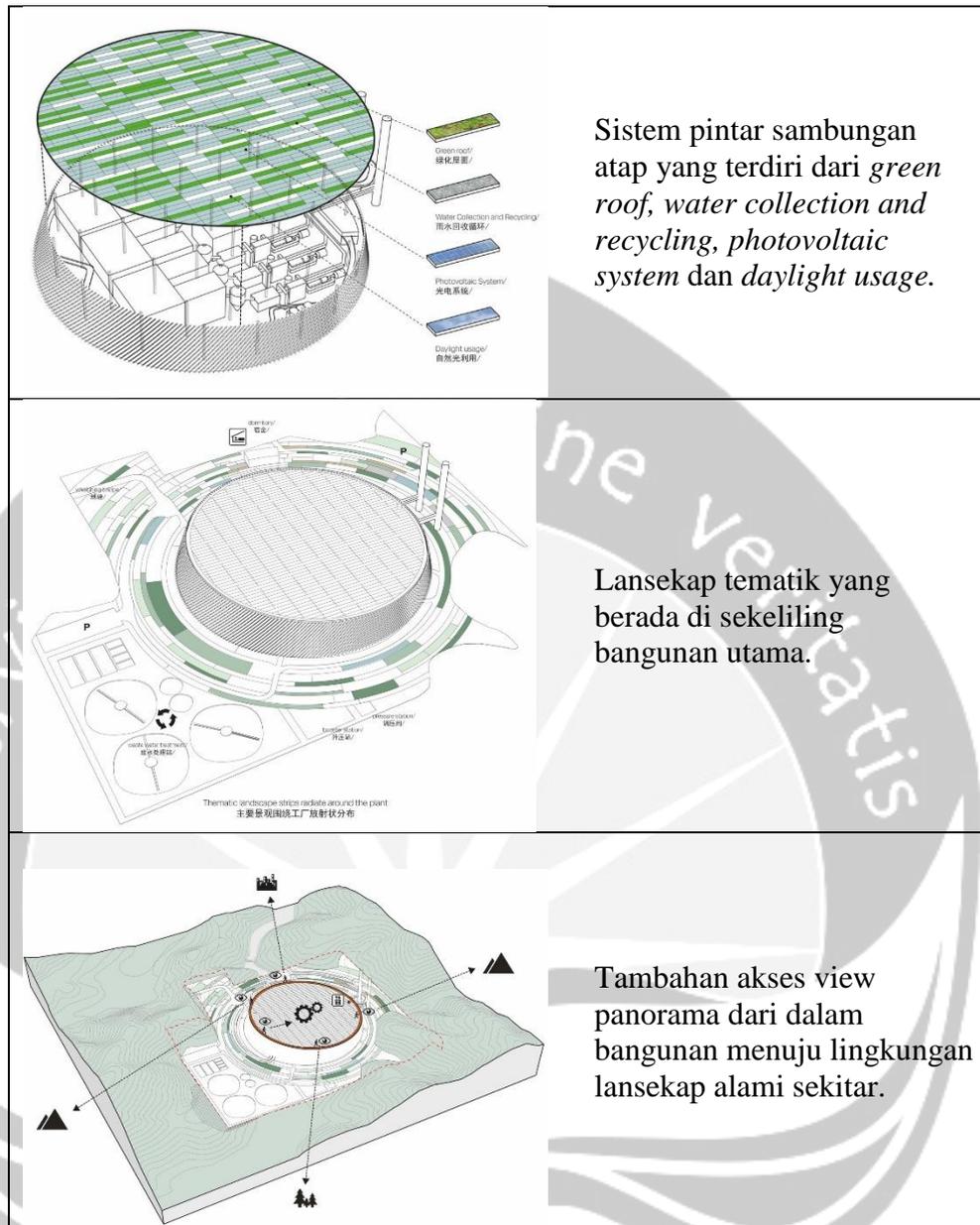
Selubung fasad dirancang mengelilingi dan menutupi seluruh bagian fasilitas insinerasi secara sirkular.



Penyesuaian ketinggian pada selubung fasad untuk mengoptimalkan volume bangunan.



Pola bukaan pada fasad untuk penghawaan alami fasilitas insinerasi.



Sistem pintar sambungan atap yang terdiri dari *green roof*, *water collection and recycling*, *photovoltaic system* dan *daylight usage*.

Lansekap tematik yang berada di sekeliling bangunan utama.

Tambahan akses view panorama dari dalam bangunan menuju lingkungan lansekap alami sekitar.

Sumber: Architizer, n.d.

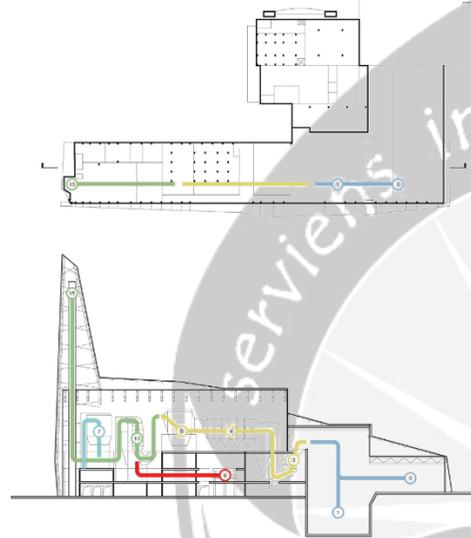
D. Fungsi Penunjang dan Pendukung

Shenzen East Waste to Energy Plant didukung dengan fasilitas visitor centre sebagai area edukasi bagi pengunjung yang ingin melihat proses pengolahan limbah di fasilitas ini.

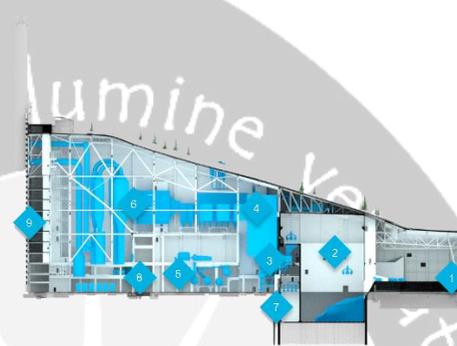
2.6.4 Komparasi Preseden

Parameter	Roskilde Waste to Energy	Amager Resource Center	Shenzen East Waste to Energy
Lokasi	Roskilde, Denmark	Copenhagen, Denmark Terletak di area industrial	Shenzen, China
Luas bangunan	7.400 m ²	41.000 m ²	112.645 m ²
Tata letak situasi	 <p>Terletak di area industri perkotaan wilayah Roskilde</p>	 <p>Terletak di area industri pinggiran kota, dekat dengan perairan di Copenhagen</p>	 <p>Terletak di area hutan dengan akses lalu lintas regional</p>

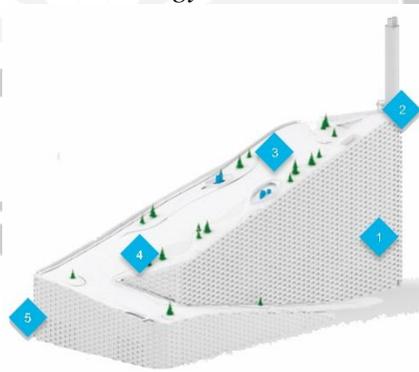
Tata letak ruang



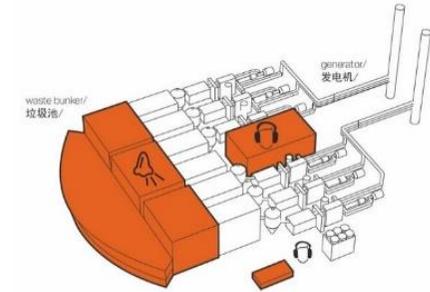
Tata letak ruang dalam disusun secara linear sesuai dengan proses teknologi *waste to energy*.



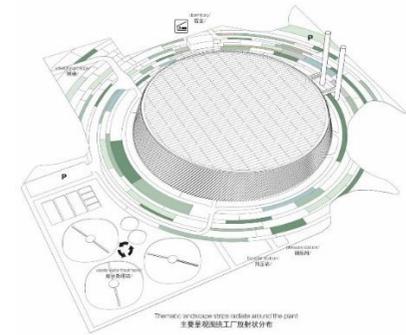
Tata letak ruang dalam disusun secara linear sesuai dengan proses teknologi *waste to energy*.



Ruang luar pada eksterior dan atap bangunan ditata dan dimanfaatkan sebagai fasilitas rekreasi yang dapat diakses oleh kalangan umum.



Tata letak ruang dalam disusun secara linear sesuai dengan proses teknologi *waste to energy*.

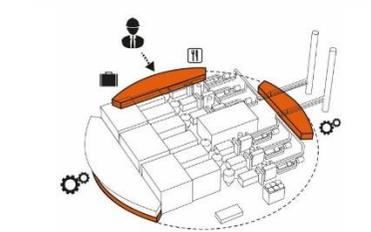
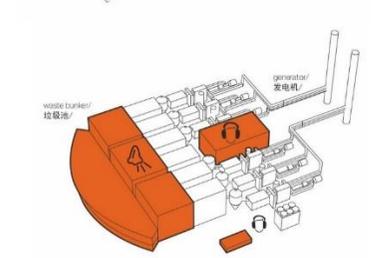
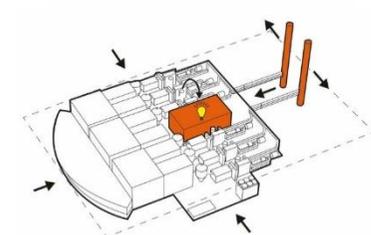
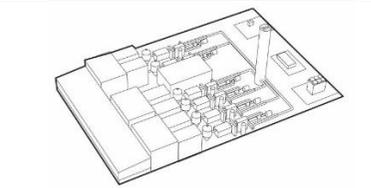
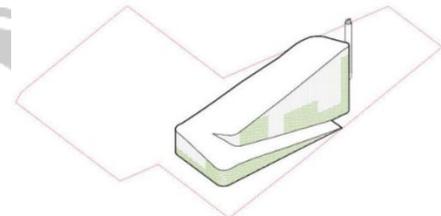
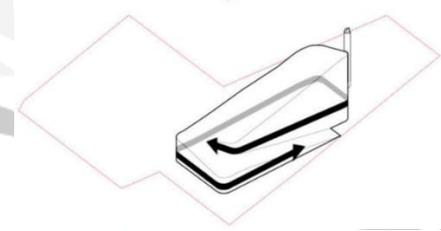
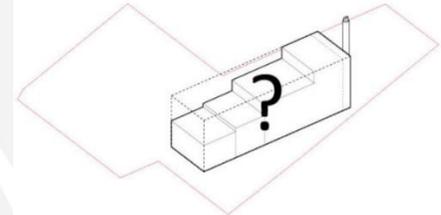
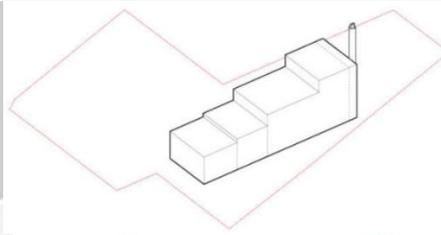


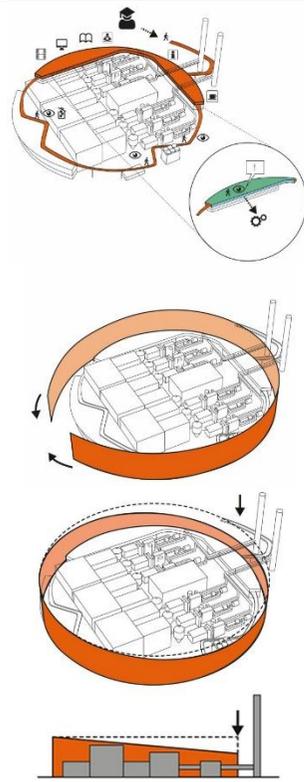
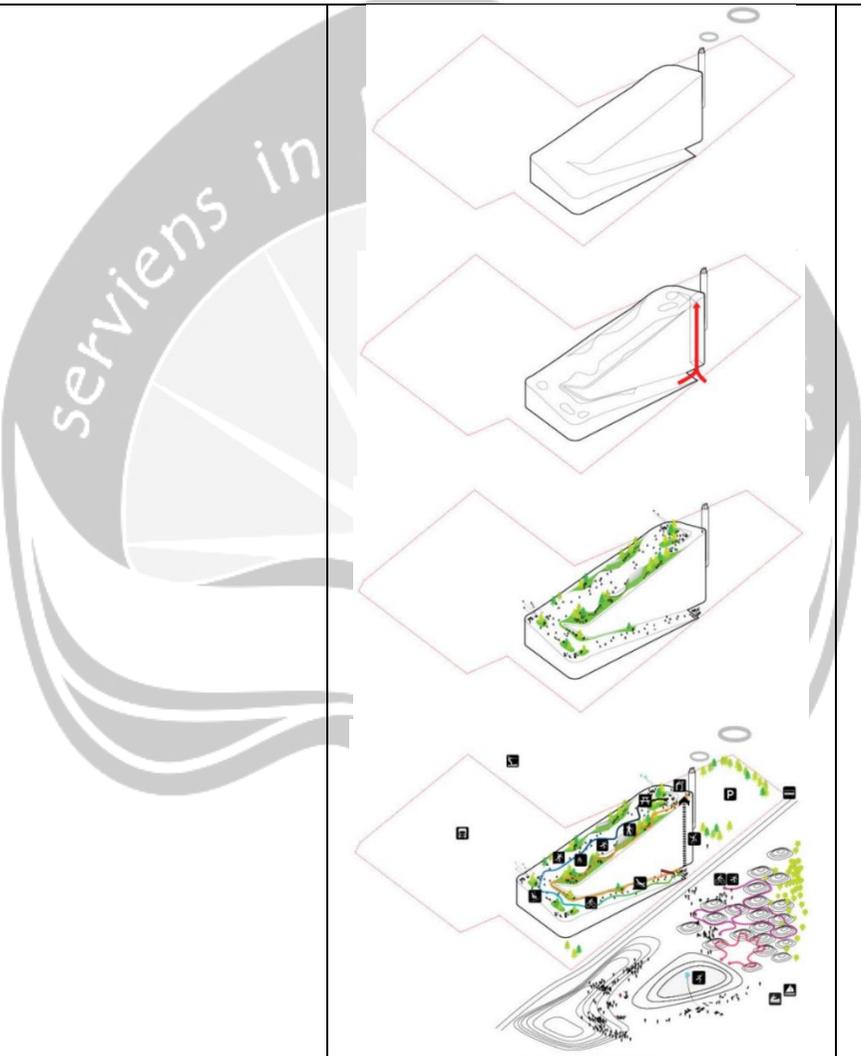
Tata letak lansekap tematik yang berada di sekeliling bangunan utama yang menambah akses view panorama dari dalam bangunan menuju lingkungan lansekap alami sekitar.

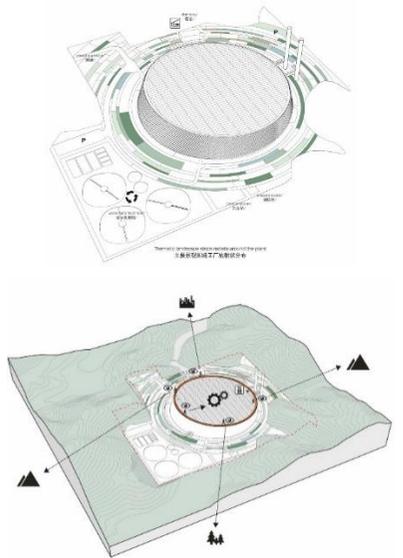
Gubahan massa



Menara energi (*tower energy*) dengan selubung fasad.





			
Material Fasad	Alumunium dengan finishing warna coklat yang mengadaptasi warisan sejarah dan industri Roskilde.	Dinding beton berkisi-kisi untuk pencahayaan alami.	Beton
Fasilitas	Insinerasi	Insinerasi	Insinerasi
	<i>Tower façade lighting</i>	Ski Wall climbing	Visitor centre

Kapasitas penerimaan limbah	350.000 ton per annum atau ±959 ton per hari	435.000 ton per annum atau ±1.191 ton per hari	5.000 ton per hari
Energi yang dibarukan	Listrik = 20 MWe = 60 MWth Uap = 50 bars	Listrik = 0,8 MWh/ton Uap = 2,7 MWh/ton Air = 100.000 liter Logam = 10.000 ton Abu dasar = 100.000 ton	Listrik = 168 MW
Pelayanan energi	150.000 rumah	Listrik = 62.500 rumah Uap = 160.000 rumah	(belum terprediksi)