

Perancangan ID Fan dan Cerobong pada Unit Pembangkit Listrik Tenaga Sampah

ID Fan and Chimney Design on Waste to Energy Power Plant

WAHYU PURWANTA DAN FEDDY SURYANTO

Pusat Teknologi Lingkungan (PTL), Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT)
wahyu.purwanta@bppt.go.id

ABSTRACT

The problem for big cities in implementing the MSW disposal method is the land availability. Hierarchically, a suitable method for solving this condition is not to dispose the MSW into the landfill but to treat it in the thermal processing, such as incineration. The bonus of this incineration is the heat dissipation that can be utilized to generate electricity. Burning MSW through incinerator that converts into energy is often called a Waste to Energy (WtE) or PLTSa. Beside the benefit of the high temperature flue gas that can produce electricity, PLTSa also emits major pollutants in the flue gas such as particulates, SO₂, NO_x, CO, HCl, dioxins and furans. In order to meet the emission standards, the PLTSa design has to be equipped with APCD's such as cyclone, semi-dry scrubber and bag filter. ID fan withdraws the flue gas into the chimney before discharging it into the ambient air through the top exit of chimney. The main parameters in the design of the ID fan and chimney are the quantity, quality and temperature of the flue gas as well as the environmental parameters, such as air temperature, atmospheric stability, wind speed and direction. The design of the chimney was carried out with a technical calculation approach, simulation of Gaussian dispersion model and the compliance of related regulations from the MoEF. In the design of PLTSa with a waste capacity of 350 tons/day, specification of the stack is 2.02 m diameter and the 70 m height whereas ID fan is 70,000 cfm flue gas flowrate, 400 BHP power, 80% mechanical efficiency and 25 inch H₂O pressure pump.

Keywords: Waste-to-energy, flue gas, ID fan, chimney

ABSTRAK

Salah satu masalah bagi kota-kota besar dalam menerapkan metode pengolahan sampah adalah ketersediaan lahan. Secara hierarkis metode yang mampu memenuhi kondisi ini adalah pengolahan dengan metode termal sekaligus memanfaatkan buangan panas yang ada untuk membangkitkan energi listrik. Pembakaran sampah dengan insinerator yang merubah sampah menjadi energi ini sering juga disebut Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa). Salah satu hasil samping PLTSa adalah *flue gas* yang temperaturnya tinggi serta mengandung polutan utama seperti partikulat, SO₂, NO_x dan CO. Agar memenuhi baku mutu emisi, rancangan PLTSa dalam studi ini dilengkapi dengan unit *cyclone*, *semi dry scrubber*, *bag filter* dan *ID fan* serta cerobong sebagai unit pembuangan akhir *flue gas*. Sebagai unit akhir pembuang *flue gas* ke lingkungan, peran cerobong sangat penting sehingga perlu beberapa pendekatan dalam perancangan. Parameter desain utama dalam perancangan cerobong adalah kuantitas, kualitas dan suhu dari *flue gas* serta parameter meteorologis lingkungan seperti suhu udara, stabilitas atmosfer, kecepatan dan arah angin. Dalam perancangan cerobong pada studi ini dilakukan dengan pendekatan perhitungangan teknis, simulasi model dispersi Gaussian serta peraturan terkait dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Dalam rancangan PLTSa dengan kapasitas olah sampah 350 ton/hari ditetapkan diameter cerobong 2,05 m dengan tinggi 70 m, serta diperlukan *ID fan* sebagai pendorong *flue gas* dengan spesifikasi Q = 70.000 cfm, BHP = 400, *mechanical efficiency* 80% dan *static pressure* pompa = 25 inch H₂O.

Kata kunci: Sampah menjadi energi, gas buang, ID fan, cerobong

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu masalah lingkungan yang masih menjadi persoalan di kota-kota di Indonesia adalah sampah kota. Aktivitas perkotaan menghasilkan sampah yang jika tidak dikelola secara benar akan berdampak pada lingkungan seperti pencemaran tanah dan perairan oleh limbah maupun pencemaran udara oleh gas rumah kaca dan gas-gas berbahaya lainnya. Pengelolaan sampah di Indonesia mengacu kepada Undang-Undang No.18 tahun 2008 tentang pengelolaan sampah, dimana metode pengolahan sampah terdapat beberapa pilihan yang secara umum dikenal dengan sistem pengelolaan sampah terpadu⁽¹⁾.

Pilihan ini membentuk suatu piramida hierarki mulai dari yang paling disukai untuk diterapkan (di puncak) serta yang paling tidak disukai di dasar piramida. Ukuran bangun piramida juga menunjukkan besarnya sampah yang dikelola dengan metode tersebut⁽²⁾. Porsi sampah yang dikelola melalui pencegahan (*prevention*), pengurangan (*reduction*), guna ulang (*reuse*) dan daur ulang (*recycle*) saat ini relatif masih sedikit, di bawah 2% dari total sampah yang dikelola di Indonesia.

Dalam prakteknya hierarki tersebut tidak perlu dilaksanakan secara kaku. Suatu metode penanganan sampah dapat dilaksanakan terlebih dahulu tanpa menunggu metode level sebelumnya terlaksana. Dalam banyak kasus termasuk Indonesia, opsi pembuangan ke TPA (*final disposal*) dipilih terlebih dahulu dan diusahakan melayani semua jumlah sampah yang ada, dan bilamana kondisinya memungkinkan (khususnya biaya) digantikan oleh hierarki di atasnya, dengan demikian tidak ada bagian sampah yang tidak terkelola^(1,2).

Bagi kota metropolitan maupun kota besar masalah metode pengolahan sampah juga menjadi problem tersendiri khususnya terkait semakin sulitnya mendapatkan lahan. Secara hierarkis metode yang mampu memenuhi kondisi ini adalah pengolahan dengan metode termal sekaligus memanfaatkan buangan panas yang ada untuk membangkitkan energi listrik yang dikenal dengan *waste-to-energy (WtE)*. Pemanfaatan panas gas buang atau *recovery* ini akan melengkapi konsep 3R menjadi 4R ($3R+Recovery$) yang saat ini juga banyak diterapkan di kota-kota besar dunia yang kemudian dikenal dengan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA)⁽¹⁾. Selain memanfaatkan panas gas buang (*flue gas*) untuk membangkitkan listrik, sisa gas buang suatu PLTSA harus memenuhi baku mutu yang ditetapkan sehingga

perlu diolah terlebih dahulu dengan alat pengendalian pencemaran udara seperti *cyclone*, *scrubber* dan *bag filter* sebelum dibuang melalui cerobong (*chimney*) ke udara bebas.

Walau cerobong berada pada posisi akhir suatu unit alat pengolahan (*treatment*) gas buang namun memegang peranan penting dalam mentransportasikan dan mendispersikan gas buang ke atmosfer. Setiap negara memiliki regulasi dalam dimensi cerobong. Tulisan ini memaparkan hasil perhitungan dan perancangan *ID fan* dan cerobong suatu unit pengolah sampah proses termal khususnya tipe *stoker grate* insinerator dengan kapasitas 350 ton/hari yang selanjutnya disebut secara singkat sebagai PLTSA.

1.2 Tujuan Penelitian

Perancangan suatu *ID fan* dan cerobong memerlukan perhitungan sejak tahap awal proses pembakaran sampah khususnya dalam menentukan kehilangan tekanan (*pressure losses*) dan laju volume gas buang. Selanjutnya dengan dimensi yang dipilih akan diuji dengan model dispersi Gaussian serta kesesuaiannya dengan peraturan yang ada.

2. BAHAN DAN METODE

Perancangan *ID fan* didasarkan pada perhitungan matematis dengan data utama adalah laju volume gas buang yang dihasilkan, kehilangan tekanan aliran gas buang dalam peralatan dan *ducting* serta kebutuhan tekanan kerja dari gas buang. Sedangkan penentuan dimensi cerobong mempertimbangkan hasil perhitungan matematis, pemodelan dengan dispersi Gaussian serta peraturan yang berlaku di Indonesia. Perhitungan dimensi secara matematis memerlukan variabel laju volume dan kecepatan aliran gas buang, suhu dan tekanan gas buang. Adapun pemodelan dispersi Gaussian dilakukan terhadap partikulat dengan variabel meteorologi daerah Tangerang Selatan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

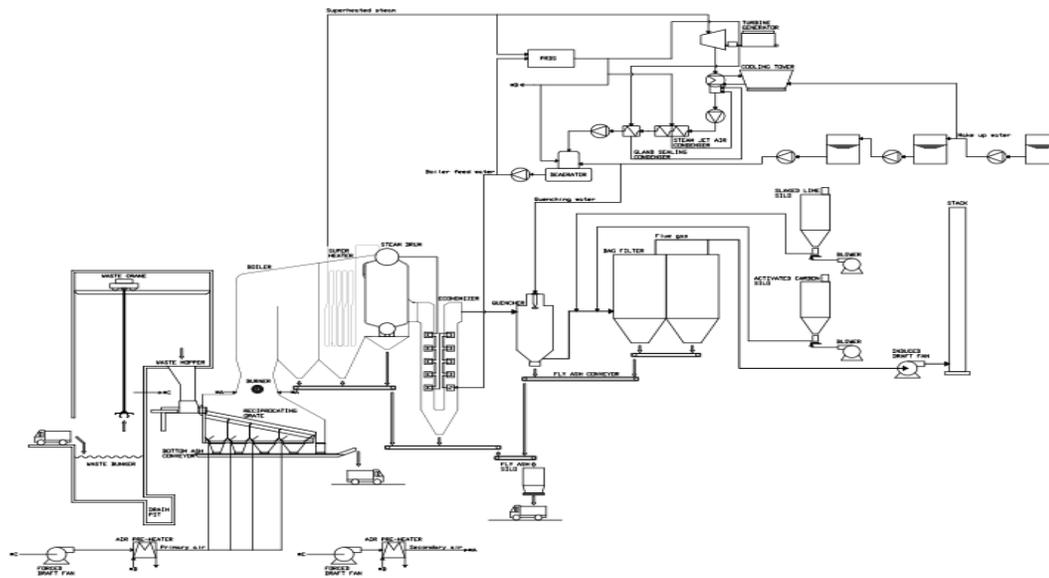
3.1 Insinerator Pembangkit Listrik

Sistem Pembakaran dan Konversi Energi

Teknologi yang digunakan dalam pembakaran sampah untuk menghasilkan panas dipilih insinerator jenis *stoker reciprocating grate* dan termasuk dalam kelompok proses termal. Tujuan utama penggunaan insinerator adalah untuk memusnahkan sampah secara cepat dalam suhu tinggi baik untuk limbah padat, *sludge* maupun limbah cair yang sulit terdegradasi. Kemampuan

insinerator dalam mereduksi sampah sekitar 80% volume atau 90% beratnya menjadi kelebihan metode termal ini⁽³⁾. Salah satu alternatif memusnahkan sampah perkotaan adalah dengan insinerator skala kota. Metode insinerasi skala kota telah berkembang dengan memanfaatkan panas yang ditimbulkan sebagai energi yang dikonversikan menjadi energi listrik sehingga dikenal sebagai *Waste-to-Energy* (WtE). Di Indonesia WtE dikenal sebagai pembangkit listrik

tenaga sampah (PLTSa). Komponen-komponen utama dalam PLTSa antara lain; (1) bunker sampah (*pit storage*), (2) tungku bakar, (3) sistem boiler dan unit konversi energi, (4) sistem pengendalian gas buang⁽⁴⁾. Diagram alir proses dalam PLTSa kapasitas 350 ton/hari ditampilkan dalam Gambar 1. Dalam studi ini plant PLTSa direncanakan berlokasi di TPA Cipeucang, Kota Tangerang Selatan.



Gambar 1. Diagram alir proses PLTSa kapasitas 350 ton/hari

Suatu bunker penampungan didesain untuk menampung 2 – 3 hari, namun untuk kondisi ketidakpastian akibat gangguan transportasi sampah yang sering terjadi seperti di Indonesia disarankan untuk didesain 3 – 5 hari⁽⁵⁾. Dalam rancangan ini, densitas sampah ditetapkan 0,350 ton/m³, serta cadangan sampah untuk 3 hari, sehingga kapasitas bunker sebesar 3000 m³. Ruang penyimpanan sampah dilengkapi *feed crane* yang berfungsi mengaduk dan mengangkat sampah untuk dibawa ke ruang umpan insinerator (*charging hopper*). Tingginya kandungan sampah organik dan kandungan airnya yang sekitar 50% membuat ruang penyimpanan akan menghasilkan lindi yang harus dikelola⁽⁶⁾.

Tungku bakar (*furnace*) sebagai komponen utama dalam metode termal umumnya dilengkapi dengan sistem penghantar sampahnya (*grate*) dan pengapian (*hearth*). *Grate* berfungsi untuk mendorong dan membalikkan sampah agar terjadi pembakaran sempurna. Jenis *grate* dalam rancangan ini adalah *reciprocating grate* atau gerakan ganda. Sistem tungku ini memungkinkan

sampah yang masuk sambil bergerak akan dikeringkan kemudian dibakar secara sempurna dengan pasokan udara dari bawah *grate*⁽⁷⁾. Untuk tetap mempertahankan terjadinya proses pembakaran, perlu ada pasokan oksigen ke tungku. Sistem konversi energi panas gas buang menjadi energi listrik dilakukan melalui perantara *steam boiler* untuk menggerakkan turbin pembangkit. Pembakaran 350 ton sampah per hari (kapasitas rancangan) dengan nilai kalor (LHV) sebesar 1300 kkal/kg diperkirakan akan menghasilkan 5 MW listrik. Beberapa parameter desain dasar PLTSa dtampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan simulasi desain PLTSa⁽¹⁾

Parameter	Nilai
Steam generated, kg/jam	28.954
Steam pressure, bar	13
Excess air, %	80
Boiler efficiency	78
FGR, %	20
LHV sampah, kkal/kg	1.300
Boiler heat load, kW	4.450

Pengendalian Polutan Gas Buang

Salah satu sisa proses dari PLTSA selain listrik adalah dihasilkan gas buang sisa pembakaran ke lingkungan. Dalam perancangan alat pengendalian gas buang insinerator sangat penting dengan keberadaan data kualitas serta kuantitas gas buang itu sendiri. Perancangan plant kapasitas 350 ton/hari ini menggunakan asumsi bahwa kandungan gas buang secara umum akan mengandung partikulat, gas asam, logam berat, NO_x, CO₂, SO₂, dan dioksin/ furans⁽⁸⁾. Berbagai polutan dalam gas buang inilah yang harus direduksi melalui serangkaian alat pengendali polutan agar memenuhi baku mutu emisi (BME) sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan no.70 tahun 2016 tentang Baku Mutu Emisi Usaha dan/atau Kegiatan Pengolahan Sampah Secara Termal. Berdasarkan material polutan yang ingin dihilangkan, maka peralatan yang akan dirancang antara lain⁽⁹⁾;

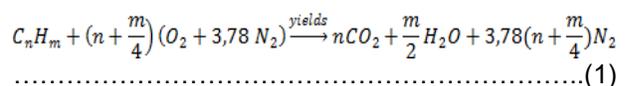
- Partikulat, dapat direduksi dengan *cyclone* atau *multi-cyclone* namun alat ini menjadi tidak efektif untuk mengurangi partikulat di bawah 5 microns.
- Gas asam dapat dinetralkan dengan *wet scrubber* yang menyemprotkan larutan kapur serta dilengkapi dengan penangkapan merkuri (Hg) sehingga berfungsi sebagai absorber, proses ini dikenal sebagai de-SO_x. Sedangkan merkuri bisa dijerab lewat *carbon injection* yang juga bisa mengontrol dioksin.
- Gas NO_x, umumnya disisihkan dengan SNCR (*selective-non catalytic reduction*). SNCR mengkonversi NO_x menjadi Nitrogen yang lebih tidak berbahaya dengan menghembuskan ammonia atau urea ke tungku panas. Peralatan de-NO_x ini tidak termasuk dalam rencana rancangan.
- Gas CO₂, dilakukan penyisihan dengan proses absorpsi alkaline dan sejauh ini yang tergolong sukses adalah amine-solvent.
- Gas SO₂, umumnya disisihkan dengan proses desulfurisasi dengan limestone-gypsum.
- Dioksin, umumnya bersumber pada pembakaran sampah yang tidak terkontrol, akibat kegagalan insinerator mempertahankan suhu tinggi. Akan tetapi dioksin juga bisa terbentuk ketika gas melewati APCD yang dikenal *de novo process* Pada WtE incinerator yang bekerja pada suhu 850°C (sangat dianjurkan 1000°C) atau lebih dapat mencegah munculnya dioksin.

Dalam upaya memenuhi kriteria BME yang berlaku, maka unit awal yang harus ada adalah *cyclone* untuk menyisihkan 98% partikulat ukuran

> 5 microns serta secara rutin dapat menyisihkan 90% partikulat ukuran 15-20 microns⁽¹⁰⁾. *Cyclone* belum bisa menurunkan kadar partikulat dalam BME, oleh karena itu harus disertai *baghouse filter* yang mampu menyisihkan partikulat hingga ukuran 0,3 microns. Pembakaran sampah kota akan menghasilkan emisi SO₂ yang berbahaya ke lingkungan. Penyisihan SO₂ akan dilakukan dengan sistem basah dengan menyemprotkan bahan kimia lainnya. Dalam perancangan ini dibuat tanki dengan penyemprotan Ca(OH)₂ dan karbon aktif (sebagai *adsorben*). Penggunaan karbon aktif akan turut mereduksi gas-gas dalam konsentrasi rendah seperti VOCs. Sebelum *flue gas* dibuang melalui cerobong akan dirancang suatu *bagfilter* dan *wet scrubber*. Serangkaian alat pengendali polutan gas buang (*Air Pollution Control Devices/APCD*) dalam rancangan ini meliputi *cyclone*, *semi dry scrubber*, *bag filter* serta *chimney* (cerobong). Desain APCD tersebut meliputi penentuan dimensi alat, kapasitas penyisihan (*removal efficiency*), material serta harga *pressure loss* yang terjadi di dalam pengaliran gas buang melalui alat tersebut. *Pressure losses* keseluruhan dari peralatan dalam plant akan menentukan desain *ID fan* dan juga cerobong⁽¹¹⁾.

Perhitungan Laju Volume Gas Buang dan Pressure Losses

Jumlah dan komposisi gas buang yang dihasilkan dari pembakaran sampah akan bergantung kepada jumlah sampah yang dibakar serta komposisi sampahnya itu sendiri. Dalam perancangan ini digunakan data komposisi dan karakteristik sampah Kota Tangerang Selatan yang bersumber dari kawasan perumahan dan non-perumahan serta pada dua musim baik penghujan dan kemarau⁽¹²⁾. Secara stoikiometrik, pembakaran sampah akan menghasilkan hasil reaksi sebagai berikut⁽¹³⁾.



Melalui perhitungan stoikiometri dengan memperhatikan mol reaktan dan hasil reaksi pembakaran maka diperoleh hasil kebutuhan udara untuk pembakaran sebesar 72.089 kg/jam serta menghasilkan gas buang sebesar 84.723 kg/jam, dimana laju volume gas buang merupakan fungsi suhu dan densitasnya. Data dan hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Laju volume gas buang dan sumbernya

Kebutuhan udara bakar dan laju gas buang		
Laju sampah (fuel)	14.583 kg/jam	
Laju udara (inlet)	72.089 kg/jam	
Laju gas buang	84.723 kg/jam	
Suhu, densitas dan sumber gas buang		
ρ gas buang (900°C)	0,3010 kg/m ³	Boiler
ρ gas buang (220°C)	0,7218 kg/m ³	Cyclone
ρ gas buang (200°C)	0,7480 kg/m ³	Scrubber
ρ gas buang (160°C)	0,8288 kg/m ³	Bag filter
ρ gas buang (150°C)	0,8490 kg/m ³	Cerobong

Hasil perhitungan laju volume gas buang digunakan untuk perancangan unit APCD dengan mempertimbangkan suhu di titik inlet setiap APCD yang akan mempengaruhi kuantitas gas buang yang diolah, hal ini mengingat densitas gas akan sangat mempengaruhi laju volume gas buang. Dengan laju volume gas buang sebesar 84.723 kg/jam, bila mempertimbangkan kemungkinan adanya tambahan volume akibat *treatment* dalam bentuk udara tambahan, maka margin desain ditambahkan 15% sehingga kapasitas *ID fan* dalam rancangan ini diperoleh sebesar 120.286 kg/jam (70.797 cfm). Hasil perhitungan kehilangan tekanan dari tiap alat serta sepanjang *duct* ditampilkan dalam Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 3. Perhitungan *pressure losses* pada alat

Unit	Pressure drop (inch.H ₂ O)	
	Teoritis	Rancangan
Boiler/HE	10 – 15 ⁽⁷⁾	12
Cyclone	1 – 16 ⁽⁹⁾	1,17
Semi Dry Scrubber	1 – 4 ⁽⁹⁾	2,00
Bag filter	5 – 10 ⁽¹⁴⁾	3,17
Duct work + minor losses	-	0,01 ^(*)
Static pressure	1,1	1,10 ^(**)
Total		19,45

⁷⁾ Lihat Tabel 3

^{**)} untuk $H_{stack} = 70$ m

Tabel 4. *Friction losses* dalam *ductwork*

Segmen	Q (cfm)	Panjang (m)	Dia. (in.)	Friction loss (in.H ₂ O)
Boiler-Cyclone	69.085	10	12	0,00095
Cyclone-Scrub.	76.665	10	16	0,00025
Scrub.-B.Filter	69.191	10	10	0,00236
B.Filter-ID fan	67.545	10	10	0,00231
ID fan-Stack	67.545	10	10	0,00231
Minor losses [*])	-	-	-	0,0016

Total	0,010
-------	-------

^{*)} ditetapkan 20%

Dari data yang dihitung tersebut di atas, maka spesifikasi ID fan dalam rancangan ini dengan menggunakan kurva fan referensi didapatkan angka-angka, kapasitas (Q) = 70.000 cfm, BHP = 400, *mechanical efficiency* 80% serta *static pressure* pompa = 25 inch H₂O.

3.2 Penentuan Dimensi Cerobong

Pendekatan perhitungan

Langkah awal perhitungan dimensi cerobong adalah dengan simulasi untuk laju volume gas yang telah diperoleh sebelumnya serta penetapan suhu rata-rata gas buang dalam cerobong serta suhu rata-rata di luar cerobong. Dengan mengasumsikan molar massa dari gas dan udara luar sama, maka hambatan gesek dan *heat losses* diabaikan. Adapun persamaan yang digunakan adalah^(15,16);

$$Q = C \cdot A \sqrt{2gh \frac{T_i - T_o}{T_i}} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan

- Q : flue-gas flow-rate, m³/detik
- A : luas penampang melintang cerobong, m² (diasumsikan konstan)
- C : koefisien 'discharge' (0,65 – 0,70)
- g : 9,807 percepatan gravitasional, m/s²
- h : tinggi cerobong, m
- T_i : suhu fluegas dalam cerobong, K
- T_o : suhu udara luar, K

Adapun perbedaan tekanan udara antara di dasar cerobong dengan di bagian atas cerobong yang tercipta akibat draft dapat diformulasikan sebagai berikut^(15,16).

$$\Delta P = C \cdot a \cdot h \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i} \right) \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan

- ΔP : Perbedaan tekanan, P_a
- C : 0,0342
- a : tekanan atmosfer, P_a
- h : tinggi cerobong, m
- T_o : suhu rerata udara luar, K
- T_i : suhu rerata flue gas dalam cerobong, K

Dengan persamaan (1) dan (2) tersebut di atas dilakukan simulasi dengan menentukan beberapa ukuran diameter dan ketinggian cerobong dengan kontrol pada kecepatan gas buang dalam cerobong yang setidaknya 15 m/detik (harus lebih tinggi dari kecepatan angin yang 4 - 7 m/detik di lokasi PLTSa). Hasil simulasi ditampilkan dalam tabel 5.

Tabel 5. Simulasi dimensi cerobong

Tinggi H (m)	Diameter d (m)	Kecepatan gas V (m/detik)
40	2,20	15,63
70	2,05	18,89
90	1,90	20,63
100	1,75	26,62

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa kecepatan gas buang dalam cerobong akan meningkat sebanding dengan menurunnya diameter, serta berbanding terbalik dengan kuadrat diameternya. Walau seluruh hasil perhitungan dimensi ini memenuhi persamaan yang ada, namun pertimbangan aspek rasionalitas dan stabilitas konstruksi maka pilihan pada dimensi cerobong berdiameter 2,05 m serta tinggi 70 m menjadi pilihan.

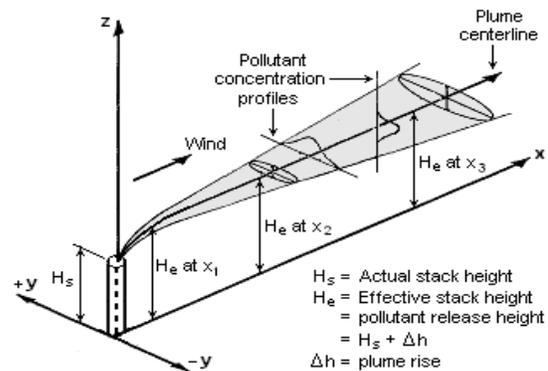
Pendekatan model dispersi Gaussian

Perancangan cerobong selain didasarkan pada hasil perhitungan dan regulasi juga dilakukan dengan mempertimbangkan hasil pemodelan atas perilaku sebaran polutan di atmosfer. Model yang digunakan dalam melihat dispersi konsentrasi adalah Model Gaussian atau distribusi normal yang sering didapat dari proses random. Dalam studi ini model dispersi Gaussian dilakukan sederhana hanya untuk melihat besaran konsentrasi gas pada beberapa jarak horisontal dari sumber polutan pada ketinggian 10 meter. Beberapa profil dispersi gas buang dibangun oleh Pasquill (1961) dengan persamaan Gauss ganda sebagai berikut⁽¹⁷⁾.

$$C = \frac{Q}{2\pi\mu\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(z+H)^2}{\sigma_z^2}\right) \right\} \dots(4)$$

Keterangan

- C : konsentrasi pencemar di titik (x, y, z), mg/Nm³
- Q : laju emisi pencemar, mg/detik
- σ_y, σ_z : koefisien dispersi vertikal dan horizontal, m (merupakan fungsi jarak x, stabilitas atmosfer)
- u : kecepatan angin rata-rata pada ketinggian stack, m/detik
- x : jarak titik pada sumbu x, m
- y : jarak titik pada sumbu y, m
- z : jarak titik pada sumbu z, m
- H : Tinggi efektif stack (H = h + Δh, dimana h=tinggi fisik stack, Δh=tinggi plume)



Gambar 2. Model dispersi Gaussian

Data yang digunakan dalam analisis sebaran antara lain, dimensi cerobong ($h=70$ m, diameter = 2,05 m), kecepatan gas dalam stack ($V=18,89$ m/detik) sedang pencemar yang diuji adalah partikulat dengan konsentrasi 500 mg/dtk, 750 mg/dtk dan 1000 mg/dtk. Adapun parameter meteorologis didasarkan pada data BMKG Tangerang pada bulan Februari 2018 dengan stabilitas udara kelas A (*very unstable*), B (*moderately unstable*), C (*slightly unstable*) dan D (netral), kecepatan angin pada ketinggian 10 m ($u_{10} = 5$ m/detik) dari arah timur. Pemilihan stabilitas kelas A, B, C dan D menunjukkan simulasi dispersi diterapkan pada kondisi siang hari. Kecepatan angin (u) pada ketinggian cerobong efektif (H) digunakan persamaan^(9,18):

$$U = U_{10} \left(\frac{H}{10}\right)^p \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan

- U : kecepatan angin di puncak stack, m/detik
- U_{10} : kecepatan angin pada level 10 m, m/detik
- H : tinggi stack efektif, m

Nilai eksponen (p) bergantung atas kelas stabilitas atmosfer. Adapun tinggi *plume* sangat bergantung pada momentum dan *buoyancy* dari fluks gas buang. Dalam studi ini perhitungan tinggi *plume* digunakan persamaan Holland yang telah diekstrapolasi untuk semua kelas stabilitas atmosfer^(17,20):

$$\Delta h = \left(4,21 \frac{V_s d}{U} + 2,92 \frac{(Q_h)^{\frac{1}{2}}}{U} \right) \dots\dots\dots(6)$$

Keterangan

- Δh : tinggi *plume*, m
- V_s : kecepatan keluar fluegas, m/detik
- D : diameter stack, m
- Q_h : laju kalori emisi, kkal/detik

U : kecepatan angin rata-rata, m/detik

Model Gaussian digunakan untuk memperkirakan konsentrasi partikulat pada permukaan tanah sesuai arah angin. Jarak yang diuji adalah 5 hingga 10 kali tinggi cerobong serta 1 kilometer dari cerobong, yakni 350 m, 700 m dan 1 km dari sumber polutan. Hal ini juga diverifikasi terhadap kondisi lapangan dimana permukiman terdekat dari lokasi PLTSa adalah 300 – 700 meter. Tabel 5 merupakan data dasar yang dipergunakan dalam uji simulasi model Gaussian termasuk penggunaan persamaan (4) dan persamaan (5). Sedangkan Tabel 6 memperlihatkan hasil simulasi Gaussian dengan menggunakan persamaan (3).

Tabel 6. Variabel dan besaran uji model

Variabel	Besaran
Laju emisi partikulat	$Q_1 = 500 \text{ mg/dtk}$
	$Q_2 = 750 \text{ mg/dtk}$
	$Q_3 = 1000 \text{ mg/dtk}$
Tinggi fisik stack	$h = 70 \text{ m}$
Tinggi plume	$\Delta h = 116,8 \text{ m}$
Koefisien dispersi vertikal	$\sigma_{y(1)} = 25 \text{ m}$
	$\sigma_{y(2)} = 50 \text{ m}$
	$\sigma_{y(3)} = 70 \text{ m}$
Koefisien dispersi horisontal	$\sigma_{z(1)} = 15 \text{ m}$
	$\sigma_{z(2)} = 25 \text{ m}$
	$\sigma_{z(3)} = 30 \text{ m}$
Kecepatan angin atas stack	$U = 8,133 \text{ m/s}$
Kecepatan aliran gas	$V_s = 20 \text{ m/s}$

Tabel 7. Konsentrasi polutan terhadap jarak

Kelas Stabilitas	Laju emisi	$C \text{ (mg/m}^3\text{)}$		
		x: 350 m	x: 750 m	x: 1 km
A	Q_1	65,1	64,5	61,3
	Q_2	83,3	73,5	71,4
	Q_3	97,4	82,6	76,5
B	Q_1	54,5	45,7	43,6
	Q_2	63,6	61,8	48,7
	Q_3	72,7	71,9	54,8
C	Q_1	39,6	34,3	33,9
	Q_2	55,5	51,4	32,0
	Q_3	69,7	56,2	31,2
D	Q_1	34,8	20,7	14,4
	Q_2	51,2	38,7	21,6
	Q_3	68,4	50,7	28,7

Dari hasil simulasi pada Tabel 6 terlihat pada semua jarak serta pada laju partikulat $Q_1=500 \text{ mg/dtk}$, $Q_2=750 \text{ mg/dtk}$ dan $Q_3=1000 \text{ mg/dtk}$, konsentrasi partikulat berada di bawah BME 120 mg/Nm^3 . Konsentrasi tertinggi didapati pada jarak 350 m, laju partikulat 1000 mg/dtk dengan kelas stabilitas atmosfer A, yakni sebesar $97,4 \text{ mg/m}^3$. Stabilitas atmosfer mempengaruhi tingkat

konsentrasi polutan pada suatu titik tinjau, stabilitas A akan menyebabkan konsentrasi polutan yang lebih tinggi dibanding B, C maupun D.

Pendekatan Peraturan

Regulasi yang dirujuk dalam perancangan cerobong adalah Lampiran III dalam Keputusan Kepala BAPEDAL no: KEP-205/Bapedal/07/1996 tanggal 10 Juli 1996 tentang Pedoman Teknis Pengendalian Udara Sumber Tidak Bergerak. Dalam peraturan tersebut persyaratan perencanaan cerobong secara umum seperti berikut:

1. Tinggi cerobong sebaiknya 2 – 2,5 kali tinggi bangunan sekitarnya sehingga lingkungan sekitarnya tidak terkena turbulensi.
2. Kecepatan aliran gas dari cerobong sebaiknya lebih besar dari 20 m/detik sehingga gas-gas yang keluar dari cerobong akan terhindar dari turbulensi.
3. Gas-gas dari cerobong dengan diameter lebih kecil dari 5 feet dan tinggi kurang dari 200 feet akan mengakibatkan konsentrasi di bagian bawah akan menjadi tinggi.
4. Konsentrasi maksimum bagian permukaan tanah dari cerobong gas-gas (agar terjadi difusi) biasanya terjadi pada jarak 5 - 10 kali tinggi cerobong downwind.
5. Konsentrasi maksimum zat pencemar berkisar antara 0,001 - 1% dari konsentrasi zat pencemar dalam cerobong.
6. Konsentrasi di permukaan dapat dikurangi dengan menggunakan cerobong yang tinggi. Variasi konsentrasi pencemar pada permukaan akan berbanding terbalik dengan kuadrat tinggi cerobong efektif.
7. Warna cerobong harus mencolok sehingga mudah terlihat.
8. Cerobong dilengkapi dengan pelat penahan angin yang melingkari cerobong secara memanjang ke arah ujung atas.
9. Puncak cerobong sebaiknya terbuka, jika pihak industri menganggap perlu untuk memberi penutup (biasanya cerobong kecil/rendah) maka penutup berbentuk segitiga terbalik (terbuka ke atas).
10. Setiap cerobong diberi nomor dan dicantumkan dalam denah industri.
11. Disamping itu di sekitar cerobong sebaiknya dilengkapi dengan tempat parkir sehingga kendaraan sampling dapat sedekat mungkin dengan lubang sampling. Apabila cerobong tidak sesuai dengan ketentuan di atas (untuk industri yang beroperasi sebelum dan sejak tahun 1995), maka perlu dilakukan modifikasi perlakuan gas buang. Hal tersebut dilakukan

dengan mengubah kecepatan serta temperatur gas, sehingga akan diperoleh tinggi cerobong efektif yang lebih tinggi.

Berdasar hasil perhitungan untuk perancangan didapatkan dimensi cerobong dengan diameter 2,05 m dan tinggi 70 m. Ukuran ini masih di atas yang dipersyaratkan agar konsentrasi polutan tidak besar di bagian bawah yakni diameter kurang dari 5 kaki dan tinggi kurang dari 200 kaki. Dimensi hasil perhitungan tersebut jika dilakukan uji simulasi model Gaussian dengan varian laju volume polutan ternyata hasilnya semua di bawah BME yang dipersyaratkan baik pada jarak 350 m, 750 m dan 1 km. Penentuan jarak uji didasarkan pada ketentuan SK Ka.Bapedal no.205/1996 bahwa konsentrasi maksimum umumnya terjadi pada jarak 5 – 10 kali tinggi cerobong *downwind*.

Selain itu dalam regulasi tersebut juga dipersyaratkan tinggi cerobong sebaiknya 2 – 2,5 kali tinggi bangunan sekitarnya. Di lokasi PLTSa Cipeucang, bangunan pada jarak 1 km dari titik lokasi cerobong paling tinggi adalah 3 lantai, sehingga ketinggian 70 dianggap memenuhi syarat. Selain itu dari sisi konsentrasi pencemar tertinggi pada jarak 350 m adalah $9,74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ atau hanya 0,0009% dari konsentrasi pencemar dalam cerobong, dalam regulasi Kepala Bapedal dipersyaratkan maksimum 0,001 – 1 % dari konsentrasi pencemar dalam cerobong. Penetapan dimensi cerobong dalam studi ini didasarkan pada kesimpulan dari ketiga pendekatan tersebut yakni perhitungan, model Gaussian dan regulasi yang ada.

4. KESIMPULAN

Berdasar hasil studi ini dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut;

1. Pembangunan unit PLTSa harus dilengkapi dengan peralatan pengendalian gas pencemar agar memenuhi BME, dengan cerobong sebagai ujung akhir pembuangan harus dirancang secara tepat.
2. Perancangan PLTSa kapasitas 350 ton sampah per hari menghasilkan laju gas buang 84.723 kg/jam yang akan diolah melalui unit *cyclone*, *semi dry scrubber*, *bag filter* serta *chimney* (cerobong).
3. Perancangan dimensi cerobong dan ID fan sebagai pendorong laju gas buang ke atmosfer harus didasarkan pada hasil perhitungan, simulasi model dispersi serta peraturan yang berlaku.
4. Berdasar hasil perhitungan, uji model dispersi dan akomodasi peraturan, dalam rancangan ini ditetapkan diameter cerobong 2,05 m dengan

tinggi 70 m, serta diperlukan *ID fan* sebagai pendorong *flue gas* dengan spesifikasi $Q = 70.000 \text{ cfm}$, $\text{BHP} = 400$, *mechanical efficiency* 80% dan *static pressure* pompa = 25 inch H_2O

PERSANTUNAN

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan Kota Tangerang Selatan atas dukungan informasi dan data dalam perancangan PLTSa skala pilot yang sangat bermanfaat dalam penyusunan tulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Purwanta, W. 2017. Kajian Kebutuhan Kualitas Dan Kuantitas Air Pada Unit Pengolah Sampah Proses Termal (*Waste to Energy Incinerator*). *Jurnal Hidrosfir Indonesia*, Vol.13 No.2, p 91-98.
2. McDougall, F.R., P.R. White, M. Franke, & P.Hindle. 2001. *Integrated Solid Waste Management: a Life Cycle Inventory*, Black Well Science Publishing, Oxford, UK.
3. Damanhuri, E., & Tri Padmi. 2016. *Pengelolaan Sampah Terpadu*. Penerbit ITB. Bandung.
4. Martin, E.J. & J.H. Johnson. 1987. *Hazardous Waste Management*. Van Nostrand Reinhold, New York.
5. European Commission. 2006. Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration
6. Niessen, W. R. 2002. *Combustion and Incineration Processes*. Marcel-Dekker, Inc. New York
7. Mahanta, P. 2017. *Energy Conservation and Waste Heat Recovery*. Indian Institute of Technology, Guwahati, India
8. World Bank. 1999. *Technical Guidance Report, Municipal Solid Waste Incineration*, Washington, D.C. 20433, U.S.A.
9. Cooper, C., D., & F.C. Alley. 1986. *Air Pollution Control: A Design Approach*. PWS Engineering, Boston.
10. Teir, S., & Antto Kulla. 2002. *Boiler Calculations*. Helsinki University of Technology Department of Mechanical Engineering Energy Engineering and Environmental Protection Publications
11. Adel, A., & Abdel-Rahman. 2008. On The Atmospheric Dispersion and Gaussian Plume Model. 2nd International Conference on Waste Management, Water Pollution, Air Pollution,

- Indoor Climate (WWAI'08), Corfu, Greece, October 26-28, 2008
12. Dinas Lingkungan Hidup Tangsel. 2015. Kajian kelayakan pengelolaan sampah terintegrasi di kota Tangerang Selatan – Laporan Akhir
 13. Kikkawa, H., H. Ishizaka, K. Kai, & T. Nakamoto. 2008. DeNOx, DeSOx, and CO2 Removal Technology for Power Plant. *Hitachi Review*. Vol 57, No.5.
 14. Turner, J.H., & A. S. Viner. 2017. Sizing and Costing of Fabric Filters. *Air and Waste Management Association*.
 15. Bureau of Energy Efficiency (BEE), Government of India. *Energy Efficiency Guide Book, Chapter 5, p 93-112. 2004.*
 16. Sherlock, R.H. & E.J. Leshner. 2017. Role of Chimney Design in Dispersion of Waste Gases. *Journal of the Air & Waste Management Association*. Vol.4 no. 2, Agustus 1954.
 17. Carson, J. E., & Harry Moses. 1969. The Validity of Several Plume Rise Formulas. *Journal of Air Pollution*, 19:11, 862-866.
 18. Liandy, M.K.G., E. Suswanto, & H. Yulinawati. 2015. Analisis Sebaran Total Suspended Particulate (TSP), Sulfur Dioksida (NO₂), Dan Nitrogen Dioksida (NO₂) di Udara Ambien Dari Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Banten 3 Lontar Dengan Model Gaussian. *Jurnal Teknik Lingkungan*. Vol.7 No.2 Des 2015, 47-56.
 19. Awasthi, S., M. Khare, & P. Gargava. 2006. General plume dispersion model (GPDM) for point source emission. *Environmental Modeling and Assessment* (2006) 11: 267-276.
 20. Bassiouny, M. K., A. A. Hussien, & Mostafa El Shafie. 2014. Calculations of Temperature Decay for Industrial Chimney by Using Modified Analytical Model. *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, Vol. 11, Issue 1, Jan. 2014, PP 13-24.

