

Simulasi Pembakaran Sampah Kota pada Tungku Insinerator Mini *Traveling Grate* dengan metode Computational Fluid Dynamics

Isnain 'Aliman^{1,*}, Ari Darmawan Pasek²

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara,

²Laboratorium Termodinamika PRI ITB, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara,

*Isnainaliman@yahoo.com

Abstrak

Makalah ini membahas simulasi untuk menentukan karakteristik pembakaran sampah Kota Bandung dengan pemodelan tungku insinerator milik Laboratorium Termodinamika PRI ITB menggunakan metode computational fluid dynamics. Sampah kota merupakan salah satu biomassa yang memiliki nilai kalor yang cukup potensial sebagai bahan bakar. Karakteristik utama sampah kota berupa kandungan air, nilai kalor, dan komposisi kimia sangat mempengaruhi proses pembakaran sampah di dalam tungku.. Parameter utama yang diamati adalah kandungan air, kecepatan *grate*, excess air, dan feedrate sampah terhadap distribusi temperatur dan efisiensi pembakaran. Simulasi ini menggunakan perangkat lunak Flic (Fluid Dynamic Incinerator Code) dan Ansys-Fluent. Flic digunakan untuk menyimulasikan proses gasifikasi pembakaran sampah kota sepanjang bed, sedangkan Ansys-Fluent untuk menyimulasikan distribusi temperatur, reaksi pembakaran, dan aliran gas hasil pembakaran di dalam tungku. Berdasarkan hasil simulasi, sampah yang baik untuk dibakar memiliki kandungan air dibawah 40 % dengan nilai kalor bahan bakar di atas 6.000 kJ/kg. Jumlah *excess air* optimum yang dibutuhkan sebesar 80 %. Kecepatan *grate* optimum adalah sebesar 0,6 m/jam dengan feedrate sampah 8,4 kg/jam sedangkan dengan letak saluran *outlet* dibelakang tungku adalah sebesar 0,8 m/jam.

Kata Kunci: Sampah Kota Bandung, Flic, Fluent, Traveling Chain Grate

Pendahuluan

Definisi sampah menurut UU N0.18/2008 tentang pengolahan sampah pasal 1 ayat 1 adalah sisa konsumsi dari kegiatan sehari-hari dalam bentuk padat [1]. Sampah merupakan konsekuensi dari aktifitas manusia. Keberadaan sampah ini akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kepadatan dan kesejahteraan penduduk. Penyelesaian permasalahan sampah ini tentunya tidaklah mudah terutama di kota-kota besar yang menjadi pusat industri dan perdagangan seperti Jakarta, Surabaya, Bandung, Tangerang, dan Bekasi dimana jumlah penduduk semakin padat seiring dengan bertambahnya para pendatang serta angka kelahiran.

Sebagai implementasi UU N0.18/2008 tentang pengolahan sampah bahwa setahun setelah diundangkannya UU No.18 tersebut (Mei 2009) sudah ada kebijakan dan strategi pengolahan sampah di tingkat kabupaten dan

kota. Lima tahun setelah UU Sampah itu diundangkan, diamanatkan tidak boleh lagi ada pembuangan sampah terbuka. Dengan demikian perlu kebijakan pengolahan yang lebih jitu dari pemerintah dalam mengelola keberadaan sampah. Di Negara-negara maju yang sudah berhasil menangani masalah sampah ini telah menerapkan sistem hirarki pengolahan sampah dengan baik.

Hirarki pengelolaan sampah [2] bertujuan untuk mendorong produk kebijakan, teknologi, dan karakter masyarakat yang dapat meminimumkan jumlah timbunan sampah dengan cara-cara yang ramah lingkungan seminimal mungkin menghasilkan dampak negatif terhadap lingkungan. Hirarki tersebut meliputi beberapa hal, yang pertama adalah meminimalisasi bahan-bahan yang akhirnya hanya terbuang menjadi sampah (reduction). Kedua yaitu menggunakan kembali (reuse) bahan-bahan yang sedianya mau dibuang tetapi sebenarnya masih bisa dimanfaatkan kembali. Ketiga adalah melakukan daur ulang

(recycling). Alternatif berikutnya adalah mengolah sampah menjadi energi berguna dengan memanfaatkan sejumlah teknologi yaitu dengan mengembangkan teknologi alat pembakaran sampah (insinerator) yang ramah terhadap lingkungan. Tahap terakhir adalah dengan metode penimbunan (Land filling) yaitu melakukan pembuangan secara terkontrol dimana limbah yang dihasilkan ditimbun dalam tempat dengan lapisan khusus sehingga tidak menimbulkan pencemaran bagi air tanah dan udara.

Oleh karena itu, penelitian mengenai karakteristik pembakaran sampah kota sebagai bahan bakar sedang dilakukan oleh Laboratorium Termodinamika ITB. Proses pembakaran sampah kota sebagai bahan bakar perlu diteliti lebih lanjut, karena proses pembakaran sampah sangat dipengaruhi oleh berbagai aspek mulai dari kandungan air, komposisi bahan bakar, udara pembakaran, dan jenis alat untuk membakar sampah. Hal ini dimaksudkan agar dapat ditarik kesimpulan bagaimana proses pengambilan energi dari pembakaran sampah dapat dimanfaatkan semaksimal mungkin.

Perumusan Masalah

Laboratorium Termodinamika PRI ITB memiliki tungku pembakar sampah yang dimaksudkan untuk penelitian mengenai karakteristik pembakaran sampah kota. Tungku tersebut belum pernah diuji dan belum diketahui kapasitas pembakaran optimumnya. Sebelum pengujian, analisis yang dapat dilakukan yaitu menyimulasikan proses pembakaran sampah pada tungku tersebut menggunakan metode computational fluid dynamics. Berdasarkan hasil simulasi, dapat diketahui seberapa besar kapasitas pembakaran dan kondisi optimum pembakaran sampah pada tungku tersebut.

Parameter yang menjadi parameter kinerja tungku tersebut adalah kecepatan grate, jumlah excess air, dan kandungan sampah. Kecepatan bed mempengaruhi seberapa lama sampah tersebut dibakar di dalam tungku dan besarnya laju aliran massa sampah yang dibakar. Banyaknya jumlah excess air mempengaruhi seberapa besar kualitas dan efisiensi pembakaran yang terjadi. Kandungan sampah berupa kandungan air, zat terbang, dan karbon

tetap menentukan seberapa besar energi yang dapat dibangkitkan dari pembakaran sampah.

Tujuan dan Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa tujuan dan manfaat yang ingin dicapai sebagai berikut:

1. Mengetahui karakteristik sampah Kota Bandung untuk digunakan sebagai bahan bakar.
2. Mengetahui pengaruh karakteristik pembakaran sampah Kota Bandung pada tungku pembakar sampah terhadap kandungan air, excess air, grate speed, dan feedrate sampah.
3. Mendapatkan nilai optimum grate speed dan feedrate tungku pembakaran sampah.
4. Mendapatkan distribusi temperatur tungku pembakaran sampah.

Deskripsi Tungku Insinerator

Tungku insinerator Laboratorium Termodinamika PRI ITB memiliki sistem traveling chain grate dengan satu unit motor listrik, dua unit blower, satu unit induce draft, dan penukar kalor untuk mengambil panas dari flue gas.



Gambar 1. Tungku Insinerator Laboratorium Termodinamika PRI ITB

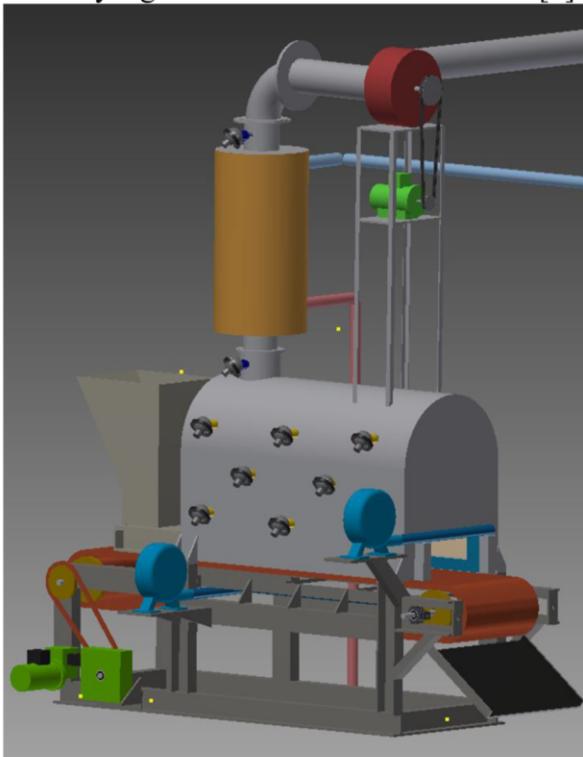
Motor listrik untuk menggerakan traveling chain grate memiliki sistem konverter sehingga kecepatannya dapat diatur sesuai frekuensi listrik AC yang dapat diatur menggunakan konverter listrik.

Metodologi Penelitian

Simulasi pembakaran sampah dilakukan menggunakan perangkat lunak Flic dan Fluent.

Simulasi Flic dilakukan untuk mendapatkan kondisi profil pembakaran sampah di atas bed, kemudian data profil tersebut digunakan sebagai masukan untuk perangkat lunak Fluent.

Simulasi gabungan ini menyediakan kondisi masukan (input) yakni gas yang dilepaskan dari sampah yang dibakar untuk Fluent dari Flic, serta fluks panas radiasi dari tungku hasil simulasi Fluent untuk Flic. Setelah beberapa pembaharuan masukan pada kedua model, interaksi panas dan massa akan mencapai keadaan tunak. Titik nyala pembakaran sampah pada hasil simulasi akhir dapat berbeda dibandingkan dengan simulasi awal yang menggunakan nilai fluks panas radiasi yang diasumsikan bernilai konstan [3].



Gambar 2. 3D model tungku insinerator dengan konfigurasi termokopel untuk mengukur distribusi temperatur pembakaran sampah.

Hasil perkiraan pembakaran sampah dari simulasi kemudian dapat dibandingkan dengan data yang terukur di dalam peralatan sesungguhnya menggunakan beberapa termokopel dengan konfigurasi seperti pada Gambar 2. Simulasi ini diharapkan mampu memperkirakan batas atas dan bawah temperatur dan prediksi hasil pembakaran secara baik.

Data karakteristik sampah yang digunakan dalam penelitian ini didapat dari penelitian Kilbergern [4], yakni sampah yang diambil dari Kota Bandung. Data ini berupa hasil pengujian proximate dan pengujian ultimate sampah Kota Bandung, yang kemudian akan digunakan untuk simulasi menggunakan aplikasi FLIC dan Fluent. Pengambilan sampel dilakukan dengan terlebih dahulu mengadakan survei sampah Kota Bandung. Komponen sampah Kota Bandung umumnya terdiri dari sampah makanan, daun, kayu, kertas, kaca, plastic dan beberapa komponen sampah yang lain. Masing-masing komponen sampah tersebut kemudian dikelompokkan ke dalam beberapa kelompok komponen sampah berdasarkan jenis fisiknya, hal ini dilakukan untuk memudahkan dalam proses pengklasifikasian jenis sampah, dimana sampah yang dihasilkan oleh masyarakat Kota Bandung sangat bervariasi.

Tabel 1. Komposisi sampah Kota Bandung [4]

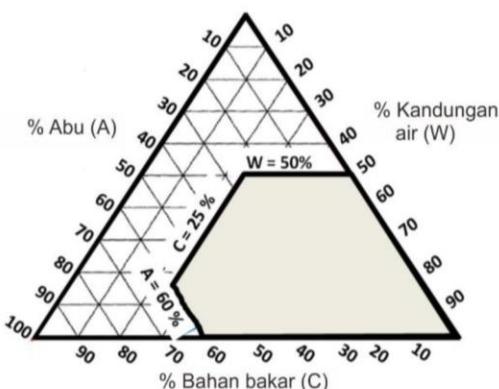
Komponen	Fraksi Massa (%)	Fraksi Volume (%)
Organik	35.58	44.51
Sampah Makanan	22.58	11.75
Kertas	13.67	14.24
Plastik daur ulang	7.06	15.30
Plastik bukan daur ulang	5.69	4.91
Kaca	3.19	2.58
Besi	3.31	1.61
Tekstil	1.94	0.92
Karet	0.68	0.36
Styrofoam	0.25	0.83
Sampah elektronik	0.56	0.4
Lainnya	5.49	2.59

Sampel yang telah dikelompokkan kemudian diuji di Laboratorium Teknologi Mineral dan Batubara (TekMira) dalam kondisi Air dry bases (Adb). Hasil pengujian dilaboratorium berupa komposisi hasil uji proximate dan ultimate diperlihatkan pada Tabel 3.2. Untuk prediksi komposisi bahan bakar dan nilai kalor *as received* maka dari data hasil pengujian tersebut harus diolah dahulu menjadi komposisi bahan bakar kondisi bebas kandungan air dan abu.

Tabel 2. Komposisi ultimate dan proximate pada kondisi adb [4]

Proximate		Ultimate	
Komponen	%	Komponen	%
Volatil	71.19	Karbon	48.46
Karbon tetap	15.41	Oksigen	41.98
Air	8.04	Hidrogen	6.58
Abu	5.36	Nitrogen	1.49
		Klorin	1.23
		Sulfur	0.26

Pada kondisi as received fraksi massa abu diperkirakan sebesar 20%, harga ini diambil berdasarkan fraksi massa abu yang umumnya dihasilkan dari proses pembakaran sampah. Komposisi sampah kondisi as received sangat beragam, biasanya antara 40% sampai dengan 60%. Menurut referensi dari penelitian sebelumnya [5], komposisi kimia sampah berdasarkan diagram tanner maksimum kandungan air pada sampah adalah 50%, akan tetapi yang layak secara ekonomi adalah 40%. Oleh karena itu, simulasi yang dilakukan mengacu pada komposisi sampah dengan kandungan air 40%.



Gambar 3. Uji kelayakan bahan bakar sampah dengan diagram Tanner [5].

Gas dioksin adalah gas yang terbentuk akibat kandungan chlor pada sampah yang bereaksi dengan senyawa hidrokarbon pada temperatur pembakaran rendah berkisar antara 350°C hingga 500°C . Pembentukan gas ini sangat dihindari karena merupakan gas beracun yang dapat menyebabkan kanker pada manusia. Gas dioksin akan secara signifikan berkurang jika temperatur pembakaran dapat mencapai di atas 600°C . Diharapkan temperatur pembakaran dari

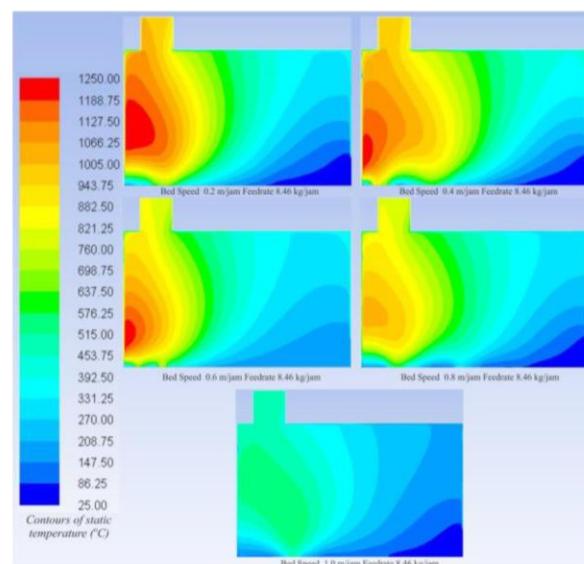
sampah di dalam insinerator dapat diatas 600°C .

Hasil dan Pembahasan

Simulasi dibagi menjadi empat bagian, yaitu variasi kecepatan grate, variasi posisi outlet tungku, variasi *excess air*, dan variasi moisture content.

Variasi Kecepatan Grate

Simulasi variasi kecepatan dilakukan dengan asumsi jumlah laju massa sampah dari setiap kecepatan dianggap sama, tetapi tinggi tumpukan sampah di atas bed diabaikan dan tidak ada modifikasi dimensi pada tungku. Simulasi dilakukan untuk mengetahui bagaimana pengaruh kecepatan grate terhadap distribusi temperatur hasil pembakaran MSW. Berikut Gambar 4 adalah distribusi temperatur yang dipengaruhi oleh kecepatan grate.



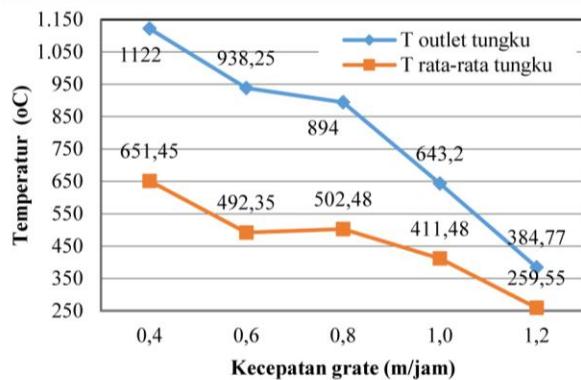
Gambar 4. Distribusi temperatur hasil simulasi Fluent dalam variasi kecepatan

Dengan meletakan posisi outlet berada di depan, hal tersebut mengakibatkan posisi bola api tepat berada di bawah saluran outlet. Hal ini menyebabkan temperatur outlet dari tungku menjadi tinggi, tetapi temperatur rata-rata tungku menjadi rendah. Hubungan antara kecepatan grate dengan temperatur outlet dan temperatur rata-rata tungku dapat dilihat pada Gambar 5.

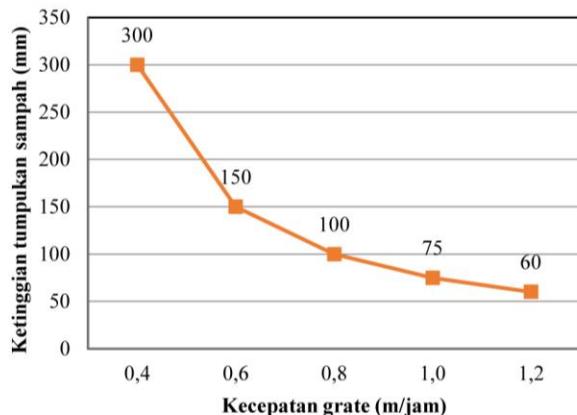
Berdasarkan Gambar 6, dengan mengasumsi jumlah sampah yang masuk ke dalam tungku sama, semakin lambat kecepatan

grate, maka tinggi tumpukan sampah yang masuk ke dalam grate akan semakin meninggi.

Kecepatan grate dalam proses pembakaran sampah sangat mempengaruhi efisiensi pembakaran. Semakin lambat kecepatan grate dalam membakar sampah, semakin tinggi efisiensi pembakaran yang didapat Gambar 7. Jika semakin cepat kecepatan grate dalam membakar sampah, maka efisiensi pembakaran akan semakin kecil dikarenakan akan ada sampah yang tidak sempat terbakar di dalam insinerator.



Gambar 5. Grafik kecepatan grate terhadap temperatur rata-rata tungku dan temperatur outlet tungku – simulasi variasi kecepatan

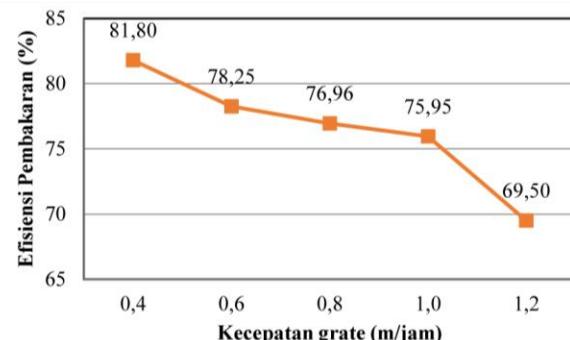


Gambar 6. Grafik kecepatan grate terhadap tinggi tumpukan sampah di atas grate – simulasi variasi kecepatan

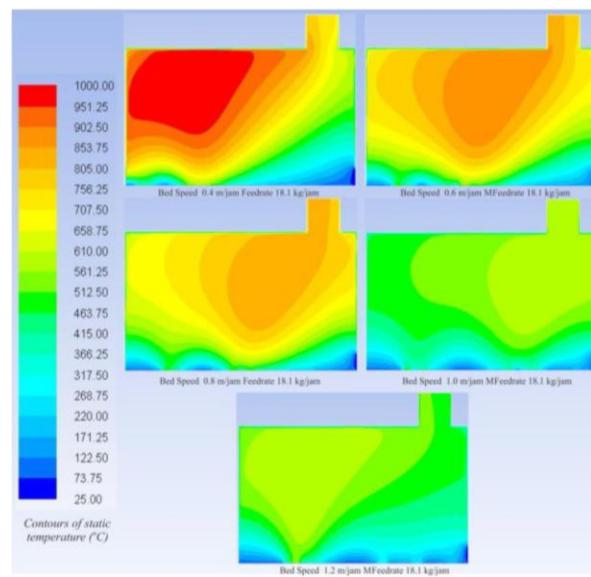
Variasi Letak Saluran Outlet

Simulasi letak saluran *outlet* dilakukan dengan asumsi sama dengan simulasi variasi kecepatan grate, hanya saja letak saluran outlet diletakan di bagian belakang tungku. Simulasi dilakukan untuk mengetahui bagaimana pengaruh kecepatan grate dan letak saluran

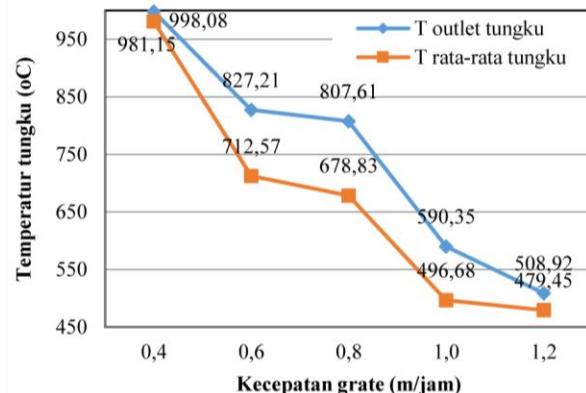
outlet terhadap distribusi temperatur hasil pembakaran MSW.



Gambar 7. Grafik kecepatan grate terhadap efisiensi pembakaran – simulasi variasi kecepatan



Gambar 8. Distribusi temperatur hasil simulasi Fluent dalam variasi kecepatan dengan letak outlet tungku di bagian belakang.

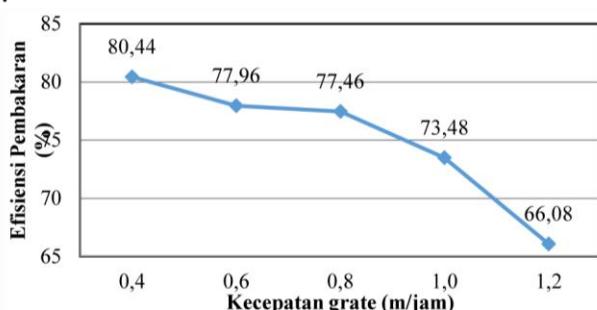


Gambar 9. Grafik kecepatan grate terhadap temperatur rata-rata tungku dan temperatur outlet tungku dengan letak outlet tungku di bagian belakang.

Dengan meletakan posisi outlet berada di belakang, hal tersebut mengakibatkan posisi

bola api berada di bagian tengah tungku. Hal ini menyebabkan temperatur rata-rata tungku menjadi lebih seragam, tetapi temperatur outlet dari tungku menjadi turun jika dibandingkan dengan letak posisi di depan. Temperatur tungku yang seragam sangat diharapkan agar tidak terbentuk gas dioksin.

Seperti halnya simulasi kecepatan grate, dengan posisi outlet di bagian belakang tungku, kecepatan grate juga mempengaruhi efisiensi pembakaran. Semakin lambat kecepatan grate dalam membakar sampah, semakin tinggi efisiensi pembakaran yang didapat. Jika semakin cepat kecepatan grate dalam membakar sampah, maka efisiensi pembakaran akan semakin kecil. Begitu pula dengan tinggi tumpukan di atas bed akan sama, baik posisi outlet di depan ataupun di depan .



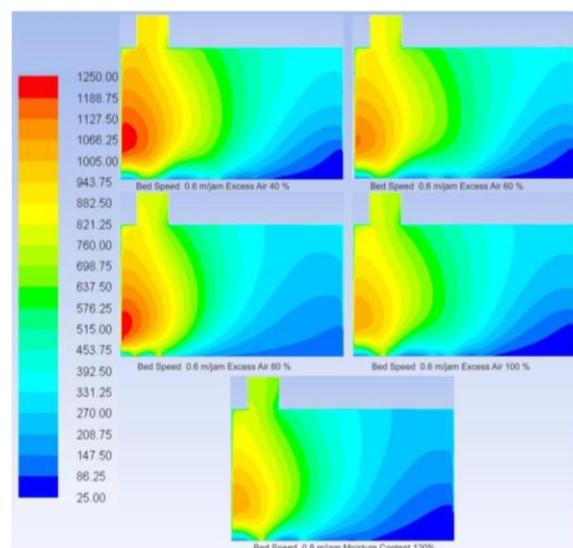
Gambar 10. Grafik kecepatan grate terhadap efisiensi pembakaran dengan letak outlet tungku di bagian belakang.

Variasi Excess Air

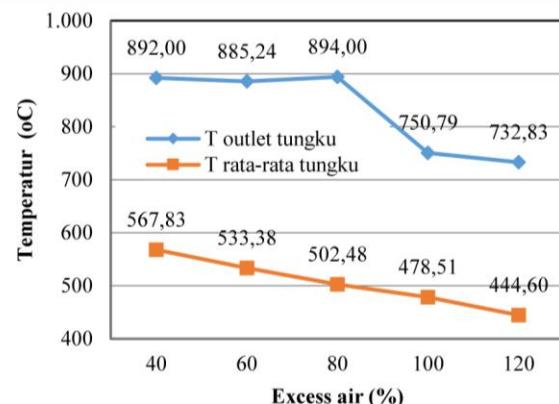
Jumlah *excess air* yang masuk ke dalam tungku terlalu banyak dapat menurunkan temperatur pembakaran. Jika jumlah *excess air* terlalu sedikit, maka proses pembakaran bahan bakar padat akan menjadi tidak efektif. Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh besarnya *excess air* terhadap proses pembakaran sampah di dalam tungku. Simulasi dilakukan dengan memvariasikan besarnya *excess air* mulai dari 40 %, 60 %, 80 %, 100 %, dan 120 %. Gambar 11 adalah hasil simulasi distribusi temperatur pengaruh dari kecepatan grate dan letak saluran outlet.

Jika ditinjau dari temperatur rata-rata outlet, semakin sedikit udara berlebih yang masuk ke dalam tungku tidak secara signifikan menambah temperatur rata-rata outlet. Tetapi ketika jumlah udara yang masuk ke dalam tungku di atas 80 % dari kebutuhan pembakaran stoikiometrik, temperatur rata-

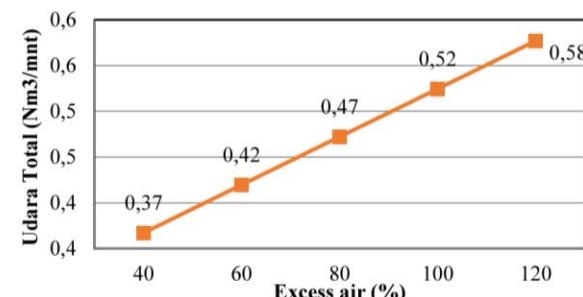
rata outlet akan turun seiring semakin banyaknya udara berlebih yang masuk ke dalam tungku.



Gambar 11. Distribusi temperatur hasil simulasi Fluent dengan variasi *excess air*



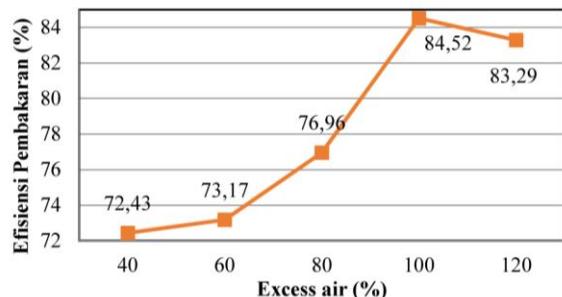
Gambar 12. Grafik jumlah *excess air* terhadap temperatur rata-rata tungku dan temperatur outlet tungku – simulasi variasi *excess air*



Gambar 13. Grafik *excess air* terhadap udara total masuk ke dalam tungku – simulasi variasi *excess air*

Kurangnya jumlah *excess air* yang masuk ke dalam tungku akan membuat pembakaran tidak efektif, sehingga tidak semua sampah yang ada di dalam tungku dapat habis terbakar. Sedangkan ketika jumlah udara berlebih

dinaikkan, maka efisiensi pembakaran sampah di dalam tungku menjadi meningkat.

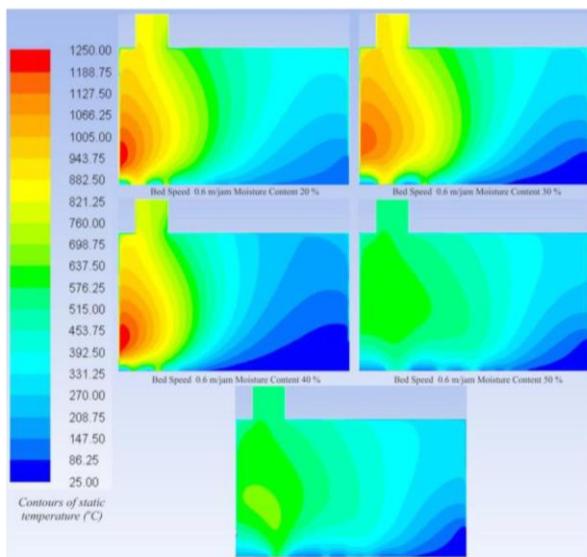


Gambar 14. Grafik *excess air* terhadap efisiensi pembakaran – simulasi variasi *excess air*

Variasi Moisture Content

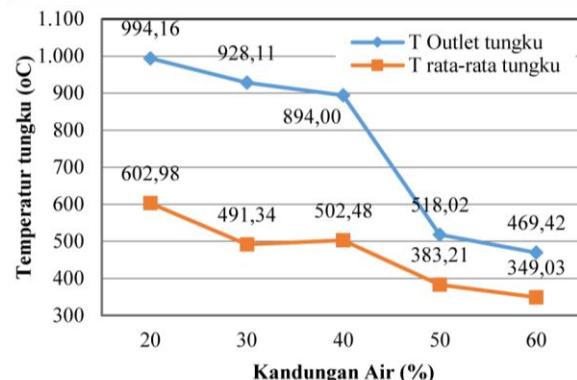
Semakin tinggi kandungan air pada sampah akan menurunkan besarnya nilai *heating value*. Tetapi semakin rendah kandungan air pada sampah, maka nilai heating value dari sampah akan semakin tinggi. Nilai kalor maksimal yang dapat dicapai dari sampah dengan kandungan air 10 % adalah 12.748 kJ/kg. Simulasi yang dilakukan ini hanya memiliki rentang kandungan air dari 20 % hingga 60 %.

Pada keadaaan *as receive*, kandungan air sampah kota berkisar antara 40-60 % [12], tetapi kandungan air sampah sebelum masuk ke tungku dapat *ditreatment* agar dapat berkurang dengan cara mengeringkannya terlebih dahulu. Sebaiknya proses pengeringan ini memanfaatkan gas buang yang tidak terpakai dari hasil pembakaran sampah

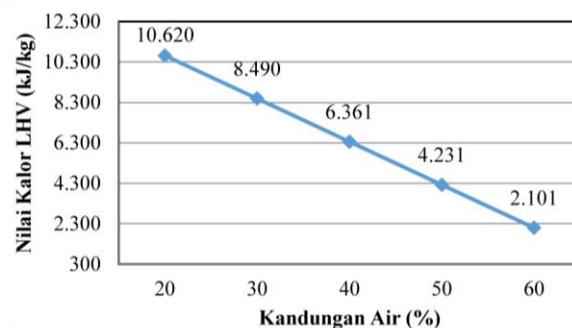


Gambar 15. Distribusi temperatur hasil simulasi Fluent dalam variasi kandungan air

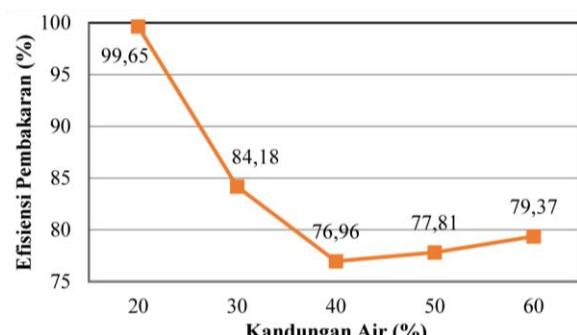
Berdasarkan Gambar 15 hasil simulasi berupa distribusi temperatur, dapat dilihat semakin tinggi kandungan air maka temperatur pembakaran sampah dalam tungku akan semakin rendah. Berdasarkan grafik efisiensi, semakin rendah kandungan air, maka besarnya efisiensi pembakaran sampah pun akan semakin tinggi.



Gambar 16. Grafik kandungan air terhadap temperatur rata-rata tungku dan temperatur outlet tungku - variasi kandungan air



Gambar 17. Grafik kandungan air terhadap nilai kalor sampah kota - variasi kandungan air



Gambar 18. Grafik kandungan air terhadap efisiensi pembakaran variasi kandungan air - variasi kandungan air

Kesimpulan

Kandungan air pada sampah Kota Bandung sebagai bahan bakar pada kondisi *as receive*

berkisar antara 40 sampai 60 %. Besarnya kandungan air sampah yang layak dibakar dibawah 40 % dengan nilai LHV di atas 6.000 kJ/kg.

Kecepatan grate optimum adalah sebesar 0,6 m/jam dengan feedrate sampah 8,4 kg/jam sedangkan dengan letak saluran *outlet* dibelakang tungku adalah sebesar 0,8 m/jam.

Distribusi temperatur pembakaran sampah dengan letak outlet dibelakang tungku lebih merata dibandingkan letak *outlet* di depan. Temperatur rata-rata tungkunya pun lebih tinggi daripada letak *outlet* di depan. Tetapi temperatur rata-rata outlet letak *outlet* di depan lebih tinggi daripada letak *outlet* di belakang. Distribusi temperatur yang merata sangat diinginkan didalam tungku untuk mencegah terbentuknya gas dioksin.

Semakin cepat kecepatan grate, maka waktu tinggal bahan bakar di dalam tungku semakin sedikit dengan asumsi jumlah laju massa sampah yang konstan sehingga sampah tidak sempat habis terbakar.

Semakin besar kandungan air, maka nilai kalor bahan bakar dari sampah semakin kecil. Hal tersebut mempengaruhi besarnya temperatur gas serta efisiensi hasil pembakaran. Besarnya kandungan air MSW yang layak untuk dijadikan bahan bakar adalah lebih kecil dari 40 %. Jika kandungan air pada sampah memiliki kadar lebih besar dari 40 %, sebaiknya sampah tersebut dikeringkan terlebih dahulu baik dengan cara dijemur ataupun dialirkan udara panas sisanya hasil pembakaran sampah yang tidak terpakai lagi.

Semakin banyak *excess air* yang dimasukan ke dalam tungku, maka nilai temperatur rata-rata tungku menjadi menurun. Tetapi jika udara berlebih kurang dari nilai optimum, maka efisiensi pembakaran sampah di dalam tungku akan turun. Berdasarkan hasil simulasi, jumlah udara berlebih yang optimum adalah 80 % dari total udara pembakaran reaksi stoikiometri.

Referensi

- [1] Pasek, A.D., MSW Aspek Lingkungan, ITB Bandung, 2009.
- [2] Information on :
<http://earth911.com/news/2009/03/09/waste-hierarchy-whos-on-top-in-the-game-of-trash>, (diakses tanggal 12 Juli 2015).
- [3] Simanjuntak ,M E., Perancangan Awal Dan Simulasi Pembakaran Tungku Berbahan Bakar Tandan Kosong Kelapa Sawit Untuk PLTU Berkapasitas 3 MW, Tesis Magister, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2010.
- [4] Pasek, A.D., Kilbergern, Feasibility of Recovering Energy from Municipal Solid Waste to Generate Electricity, Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- [5] Babcock and Wilcox, Steam Its Generation and Use, 40th edition, The Babcock and Wilcox Company, USA, 1992.
- [6] Prakasa, Y., Analisis Karakteristik Sampah Kota Bandung untuk PLTSa Babakan, Tugas Sarjana, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2009.
- [7] Yang, Y.B. et al., Modelling Waste Combustion in Grate Furnace, Trans IChemE, Part B, Process Safety and Environment Protection, 82 (B3): 208-222, 2004.
- [8] Rosliadi, Imron, Perancangan Pembangkit Uap untuk Pembangkit Listrik Tenaga Sampah dengan Kapasitas Daya 160 KW, Tesis Magister, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2012.
- [9] Rand, T., Haukohl, J. & Marxen, U., Municipal Solid Waste Incineration, Requirements for a Successful Project, World Bank Technical Paper No.462, The International Bank for Reconstruction and Development, Washington D.C., 2000.
- [10] Anderson,S.R et al. , Multi-Objective Optimization Of Operational Variables In Waste Incinerator Plat, Sheffield University Waste Incenerator Centre (SUWIC), UK.