

Metode Pengeringan Non-termal untuk Meminimalisasi Kebutuhan Panas Proses Torefaksi Sampah Kota menjadi Bahan Bakar Padat

Budi Herwanto^{a*}, Adrian R Irhamna^b, Pandji Prawisudha^c, Toto Hardianto^d

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Indonesia
Jalan Ganesa 10, Bandung, Indonesia
email: budi.herwanto@ymail.com, ar.irhamna@gmail.com, pandji@termo.pauir.itb.ac.id,
toto@termo.pauir.itb.ac.id

Abstrak

Konversi sampah kota menjadi bahan bakar padat ramah lingkungan melalui proses torefaksi tengah dikembangkan oleh tim peneliti Laboratorium Termodinamika ITB. Selama proses torefaksi, sampah kota akan mengalami pengeringan dan devolatilisasi sehingga densitas energinya meningkat. Dalam perkembangannya, proses torefaksi kontinu dipilih sebagai teknologi yang diujicobakan hingga skala industri. Balans energi proses torefaksi kontinu sampah kota, yang dihitung melalui simulasi, menunjukkan bahwa kalor yang dibutuhkan proses akan sama dengan nilai kalor bahan bakar produk jika kadar air umpan sebesar 75 %. Sayangnya, sampah kota kebanyakan memiliki kadar air sekitar 80 %, sehingga diperlukan suatu metode pengeringan khusus untuk mengurangi kadar air agar proses torefaksi ini menguntungkan secara keenergian. Dalam penelitian ini, beberapa metode pengeringan khusus dikaji dan diterapkan untuk mengurangi kadar air sampah kota dengan target di bawah 75% wb, yaitu pengeringan yang tidak menggunakan panas tambahan atau menggunakan panas yang gratis agar kebutuhan panas pada keseluruhan proses dapat diminimalkan, yang disebut “*pengeringan non-termal*”. Enam jenis metode pengeringan non-termal akan dikaji, yaitu metode tekan, metode sentrifugal, pengeringan udara, *biodrying*, *solar drying* dan pemanfaatan panas sisa (*heat recovery*). Aspek-aspek proses, karakteristik produk, dan kepraktisan dalam penerapannya menjadi pertimbangan dalam menentukan metode yang terbaik, sedangkan tahap verifikasi secara eksperimental akan dilakukan pada penelitian selanjutnya.

Kata Kunci: bahan bakar padat, sampah kota, torefaksi, pengurangan kadar air, pengeringan khusus

Pendahuluan

Penggunaan energi primer dunia didominasi oleh minyak bumi, gas alam, batubara, nuklir dan hidroelektrik [1]. Bahan bakar fosil yang menjadi tiga urutan terbesar dari konsumsi energi primer dunia akan habis dalam waktu singkat [2]. Di Indonesia, porsi penggunaan energi hidroelektrik masih kecil [2] dan diperparah dengan belum adanya penggunaan energi nuklir. Dengan kata lain Indonesia hanya bertumpu pada minyak bumi, gas alam, dan batubara. Data tahun 2007 menunjukkan bahwa konsumsi energi primer Indonesia pertahunnya mencapai 114,6 juta toe (*tonnes oil equivalent* atau ton setara minyak)[2].

Keadaan tersebut memicu pencarian sumber energi alternatif yang bersifat terbarukan dan berdampak positif ganda dalam arti tidak hanya menyelesaikan masalah kebutuhan energi saja. Mendapatkan energi baru pengganti bahan bakar

fosil sangat diperlukan untuk memenuhi kebutuhan energi dalam negeri dan mencegah laju pemanasan global akibat produksi CO₂.

Di sisi lain, produksi sampah yang besar dan terus meningkat menyebabkan sampah lebih dikenal sebagai sumber permasalahan, khususnya di daerah perkotaan. Padahal sebenarnya sampah kota bisa menjadi potensi sebagai sumber energi alternatif yang ramah lingkungan. Hasil analisis menunjukkan komponen sampah kota yang terdiri dari bahan organik yang lebih sering dibuat kompos, berpotensi memiliki nilai kalor yang cukup tinggi bila digunakan sebagai bahan bakar. Tabel 1 menunjukkan produksi sampah dan energi ekivalennya dari berbagai kota besar di Indonesia. Di kota Bandung, potensi sampah sebagai sumber energi panas sebesar 202 MW, setara dengan daya listrik 60,6 MWe jika efisiensi pembangkit listrik diasumsikan sekitar 30 %. Dengan besarnya energi yang dihasilkan, maka sampah kota adalah alternatif yang cukup menjanjikan.

Tabel 1. Produksi Sampah dan Potensi Energinya dari Beberapa Kota Utama di Indonesia [2]

Kota	Produksi Sampah		Daya Panas Ekuivalen (MW)*
	(m ³ /hari)	(ton/hari)	
Jakarta	27.966	6.236	755
Surabaya	8.700	1.940	235
Bandung	7.500	1.673	202
Medan	3.973	886	107

* anggapan nilai kalor terendah (sekitar 2.500 kcal/kg)

Penggunaan sampah kota sebagai bahan bakar dapat menjadi solusi yang cepat bagi masyarakat perkotaan dibandingkan bila dibuat kompos yang membutuhkan proses yang lama, tetapi pemanfaatan sampah secara langsung sebagai bahan bakar mempunyai banyak kendala. Kadar air yang tinggi, densitas energi yang rendah serta komponen yang heterogen dengan bentuk beragam menyebabkan penggunaan sampah sebagai bahan bakar secara langsung menjadi tidak layak. Untuk memperbaiki sifat sampah sebagai bahan bakar padat, berbagai proses termal yang mendekomposisi komponen sampah sehingga dapat menaikkan densitas energinya dapat dilakukan, salah satunya dengan proses torefaksi.

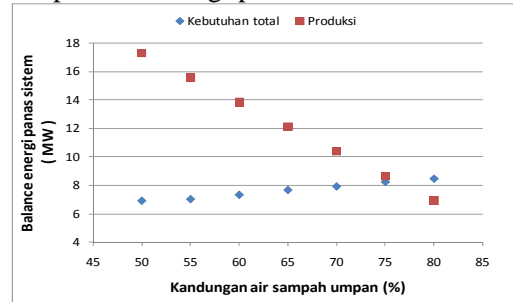
Kelayakan Ke-energian pada Proses Torefaksi Sampah

Jumlah produksi sampah kota Bandung yang mampu ditangani PD. Kebersihan mencapai 7.500 m³/hari dengan densitas rata-rata 223 kg/m³, dan didominasi oleh komponen organik yang mencapai 85 % berat [2]. Pada kenyataannya terdapat beberapa komponen organik seperti kertas yang diambil oleh pemulung. Walaupun demikian, jumlah komponen organik yang bisa dimanfaatkan sebagai sumber energi tetap mendominasi, yaitu sekitar 73,87% berat total [2], sehingga total sampah organik kota Bandung yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar adalah 1.236 ton/hari.

Penelitian tentang torefaksi sampah yang dilakukan secara kontinu oleh tim Laboratorium Termodinamika ITB telah berhasil mengubah material sampah menjadi bahan bakar padat dengan kualitas batubara subbituminus [3]. Torefaksi tersebut memberi perlakuan panas pada 200 - 300°C dan tekanan atmosfer tanpa kehadiran oksigen, serta telah diterapkan pada beberapa material homogen dan multi komponen heterogen sampah kota [3]. Peningkatan nilai kalor sampah kota terjadi akibat dekomposisi fraksi

lignocellulose dan *amylum* secara simultan melalui proses torefaksi tersebut.

Dalam rangka penerapan teknologi ini, telah dikembangkan pemodelan sistem torefaksi kontinu sampah perkotaan berupa sebuah model pabrik skala industri kecil berkapasitas 10 ton/h yang akan memproduksi bahan bakar padat dari sampah kota melalui proses torefaksi. Hasilnya, keuntungan energi akan diperoleh jika kandungan air sampah umpan berada di bawah 75 %. Gambar 1 menunjukkan pengaruh kadar air sampah terhadap balans energi panas sistem torefaksi.



Gambar 1. Pengaruh kadar air sampah umpan terhadap kesetimbangan energi panas sistem [4]

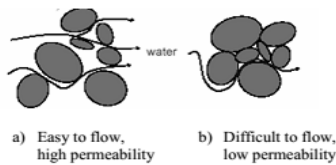
Fakta di lapangan kebanyakan sampah kota memiliki kadar air yang tinggi sekitar 80% wb [5]. Hal ini menjadi kendala dari sisi kelayakan ke-energian. Oleh karena itu diperlukan suatu metode pengeringan khusus untuk memperoleh keuntungan energi tanpa menggunakan panas tambahan. Kalaupun menggunakan panas, sumber panasnya harus sudah tersedia (gratis) agar tidak menambah beban ke-energian torefaksi. metode ini disebut *pengeringan non-termal*.

Makalah ini akan membahas metode pengeringan non-termal yang ada dan menentukan metode yang terbaik untuk mendukung penerapan proses torefaksi dalam rangka konversi sampah kota sebagai bahan bakar padat. Hal yang menjadi fokus utama adalah bagaimana cara mengurangi kadar air semaksimal mungkin dengan waktu proses yang cepat, minim konsumsi energi dan mudah diterapkan. Dalam bab selanjutnya dikaji beberapa metode pengeringan non-termal, yaitu metode tekan, metode sentrifugal, pengeringan udara, *biodrying*, *solar drying* dan pemanfaatan panas sisa (*heat recovery*) dari proses torefaksi.

Metode Pengeringan “Non-termal”

Metode pengeringan non-termal yang dikaji tercantum di bawah ini. Pembahasan yang dilakukan meliputi konsep metode, pola pemisahan air, alat metode, prinsip kerja alat, karakteristik alat dan karakteristik produk.

Metode Tekan. Prinsip metode tekan adalah menggunakan efek penekanan agar terjadi penyempitan ruang (*shrinkage*) dan terjadi perbedaan tekanan (*pressure gradient*) sehingga air akan mengalir keluar. Pada dasarnya, air yang terjebak dalam pori-pori diakibatkan oleh efek adhesi air yang dominan sehingga air tertahan oleh tegangan permukaannya. Semakin kecil radius jari-jari maka semakin sulit untuk mengalirkan air tersebut. Faktor ini disebut permeabilitas. Permeabilitas menggambarkan semudah apa fluida bisa melewati media berpori seperti yang terlihat pada Gambar 2.

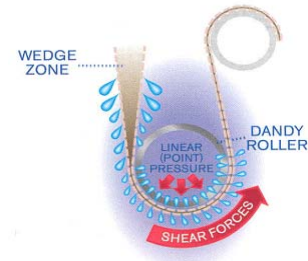


Gambar 2. Ilustrasi skematik Permeabilitas [6]

Persamaan teoretik permeabilitas terdapat pada hukum *Darcy* satu dimensi mengenai aliran melewati media berpori saat laju aliran fluida sebanding dengan viskositas, koefisien permeabilitas dan *hydraulic gradient* [6].

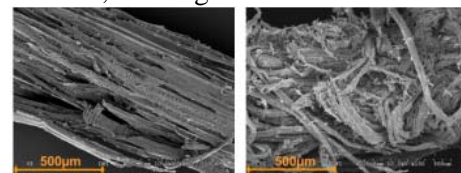
Metode tekan banyak diaplikasikan pada alat-alat pengurangan kadar air (*dewatering*). Alat ini digunakan untuk memisahkan padatan dengan cairan pada *sludge* (lumpur). Walaupun sampah kota tidak didefinisikan sebagai *sludge*, terdapat alat *dewatering* yang digunakan untuk material padatan besar (*bulk*). Proses *dewatering* mampu mengurangi kadar air komponen organik hingga mencapai 50 % (basis basah) [7]. Efisiensi proses secara keseluruhan dapat ditingkatkan dengan menggunakan *dewatering* umpan yang sangat basah sebelum dilakukan pengeringan termal [7].

Alat-alat *dewatering* yang menggunakan prinsip tekan di antaranya adalah *belt filter press*, *rotary press*, dan *screw press*. Pada aplikasi untuk komponen organik yang berjenis material *bulk*, alat metode tekan yang bisa digunakan adalah *belt filter press* dan *screw press*. Pada *belt filter press*, umpan terletak di antara dua buah sabuk (*belt*) berpori. Efek penekanan dihasilkan dari tegangan *belt* melewati *roller*. Selain itu juga terdapat efek gaya geser akibat kontak *belt* dengan *roller* saat *belt* bergerak seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Mekanisme pelepasan air pada Belt Filter Press [8]

Pada *screw press*, efek penekanan diakibatkan dari penyempitan ruang yang terjadi pada ruang antar-ulir. Selain itu terjadi ekstrusi pada aliran keluaran produk yang menyebabkan tekanan meningkat. Sama halnya dengan *belt filter press*, terdapat efek gaya geser (gesekan) antara umpan dengan permukaan ulir *screw press*. Pada kasus khusus, penggunaan *screw press* digunakan untuk menghancurkan struktur *lignocellulose* (Gambar 4) dengan tujuan memperbesar permeabilitas sehingga air mudah keluar dan hasilnya mampu mengurangi kandungan air material 50 % menjadi 16,6 % (basis basah) pada *wood spruce*, *wood beech*, *reed* (alang-alang) dan *perennial ryegrass* berukuran 6 mm dengan kebutuhan energi proses 439,2 kJ/kg umpan basah [9]. Angka ini setara dengan 1.096,68 kJ/kg air.



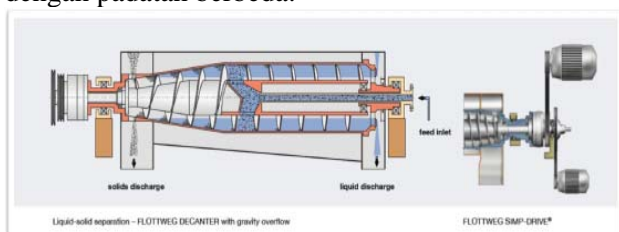
Gambar 4. SEM micrograph dari partikel kayu (*spruce*) sebelum (kiri) dan sesudah (kanan) proses *screw press* [9]

Tabel 2. Perbandingan Karakteristik Alat Dewatering Metode Tekan [8]

Parameter	Belt Filter Press	Screw Press
Tekanan operasi (bar)	4 - 8	40 - 350
Kapasitas (kg/h)	50 - 1.000	10 - 10.000
kecepatan putar (rpm)	-	0,3 - 10

Metode Sentrifugal. Prinsip metode sentrifugal adalah memanfaatkan gaya sentrifugal akibat putaran untuk melepaskan air. Pada metode ini minim sekali fenomena penghancuran struktur dan perubahan radius pori-pori padatan. Dengan kata lain faktor permeabilitas padatan akan cenderung konstan.

Sama halnya dengan metode tekan, metode ini juga banyak diaplikasikan pada alat *dewatering* dan biasa disebut *centrifuge decanter*. Skema *centrifuge decanter* dapat dilihat pada Gambar 5. Mangkuk (Bowl) *centrifuge* memiliki kecepatan putar mencapai 2.500 rpm bahkan lebih tinggi lagi dan menghasilkan gaya sentrifugal hingga 3.000 kali gaya gravitasi [10]. Padatan menabrak permukaan *bowl* kemudian diarahkan keluar oleh *screw conveyor* yang memiliki kecepatan putar lebih rendah dari *bowl*, sehingga diperlukan dua buah motor. Air yang sudah keluar dari padatan akan terpisah dengan padatan akibat perbedaan densitas, kemudian bergerak keluar akibat efek sentrifugal ke sisi area permukaan *bowl* yang lebih luas sehingga tempat keluaran air dengan padatan berbeda.



Gambar 5. Skema Alat *Centrifuge decanter* [10]

Kapasitas *centrifuge decanter* mencapai 430 kg/h, dengan daya 40 hp [8]. Dengan demikian kebutuhan energi *centrifuge decanter* adalah 249 kJ/kg umpan basah. Metode ini memiliki batas nilai akhir kadar air produk 50% (basis basah) [7]. Umpan harus dalam kondisi *slurry* agar mampu dialirkan kedalam *centrifuge decanter* menggunakan pompa. Selain itu kecepatan putar yang tinggi akan berdampak dapat menimbulkan kebisingan.

Metode Pengeringan Udara. Pengeringan udara dilakukan dengan memanfaatkan udara yang memiliki kelembaban tertentu yang kemudian berkontak dengan padatan basah sehingga kelembaban udara meningkat akibat menyerap air padatan. Fenomena yang terjadi pada pengeringan udara adalah vaporisasi. Vaporisasi terjadi akibat tekanan parsial uap air dipermukaan padatan lebih kecil dari tekanan uap jenuh atmosfer. Metode ini sangat bergantung pada kondisi temperatur lingkungan, kelembaban udara dan area kontak udara dengan padatan. Kadar air produk yang mampu dicapai antara 15 - 35 % (basis basah) [7] tergantung dari nilai kandungan air *equilibrium* padatan.

Pengeringan udara dapat dilakukan dengan mengalirkan udara secara alami (*natural*) maupun dengan bantuan alat (*forced*) seperti kipas (*fan*) atau *blower*. Pengeringan dapat dilakukan selama

proses penyimpanan maupun proses transportasi menuju reaktor torefaksi.

Kebutuhan energi pengeringan udara bersumber dari pemakaian *fan* atau *blower*. Perhitungan *blower* dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan kesetimbangan energi pengeringan. kondisi lingkungan rata-rata kota Bandung di siang hari adalah temperatur 30 °C dan RH (*relative humidity*) 60 %. *Blower* diasumsikan digunakan untuk mengeringkan 10 ton padatan basah dengan kandungan air 80% menjadi 50 %. Dengan asumsi *blower* adiabatik, *steady state*, sistem volum atur, temperatur keluar *blower* 35°C dan kelembaban udara setelah pengeringan mencapai 90 %, diperoleh kebutuhan energi *blower* sebesar 1.006,6 kJ/kg umpan basah, yang Setara dengan 1.677,7 kJ/kg air.

Terlihat dari perhitungan bahwa laju pengeringan udara sangat lambat. Biasanya waktu yang dibutuhkan umpan pada proses pengeringan udara memiliki orde jam hingga hari. Faktor yang mempengaruhi laju pengeringan udara adalah massa air yang dilepas, area kontak, koefisien konveksi, psikrometri udara dan difusivitas padatan.

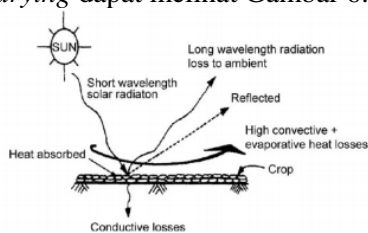
Metode *Biodrying*. Prinsip kerja *biodrying* adalah dengan penguapan secara konveksi menggunakan panas eksotermis hasil proses degradasi aerobik komponen organik yang dikombinasikan dengan menambahkan aliran udara untuk aerasi [11]. Teknologi pengeringan ini banyak diterapkan pada industri makanan, farmasi, pulp dan kertas. Proses dekomposisi bahan organik menggunakan mikroorganisme merupakan reaksi biokimia eksotermis yang dapat menaikkan temperatur bahan pada rentang 50 – 62 °C untuk reaktor ukuran kecil dan dapat mencapai 70 °C pada ukuran yang besar.

Mekanisme utama perpindahan massa pada *biodrying* adalah konveksi udara dan difusi molekuler uap air melewati struktur pori bahan [11]. Kadar air produk mampu mencapai 35 %, dengan lama proses yang bervariasi antara 3 – 15 hari [11]. Diperlukan pengaturan aerasi yang tepat dan isolasi reaktor agar tidak terjadi banyak *losses* energi panas yang dihasilkan dari panas eksotermis mikroorganisme. Pengaturan aerasi biasanya dilakukan secara otomatis dengan bantuan sensor dan komputer [11].

Energi yang diperlukan untuk *biodrying* bersumber dari *fan* yang digunakan untuk aerasi, sedangkan energi panas yang dibutuhkan untuk menguapkan air tidak diperhitungkan karena bersumber dari dalam komponen organik. Pada

proses *biodrying* yang pernah dilakukan untuk mengeringkan komponen organik sebanyak 13 kg berkadar air awal 86 % menjadi 53 %. aerasi udara bertemperatur 23 °C menggunakan fan, proses aerasi memiliki debit 162 m³/hari selama 11 hari [12]. Jika diasumsikan proses menggunakan fan 3 hp, 3.500 rpm dengan kapasitas debit 56,64 – 113,28 m³/min akan menghasilkan kebutuhan energi sekitar 648,83 kJ/kg umpan basah, setara dengan 924 kJ/kg air.

Metode Solar Drying. *Solar drying* adalah pengeringan dengan memanfaatkan panas dari matahari. Panas matahari yang mampu dimanfaatkan adalah sekitar 50 – 150 W/m² pada saat mendung dan 600 – 1.000 W/m² pada saat cerah [13]. *Solar drying* dapat dilakukan hanya dengan menyimpan padatan dibawah sinar matahari langsung, disebut *open-sun drying*. Selama proses *open-sun drying* panas berpindah secara konveksi dari lingkungan dan oleh absorpsi langsung serta difusi radiasi pada permukaan luar timbunan padatan. Panas yang diserap kemudian sebagian digunakan untuk menguapkan air yang terdapat pada permukaan padatan dan terlepas ke lingkungan secara konveksi dan radiasi, panas yang lain terkonduksi ke dalam timbunan padatan dan meningkatkan temperaturnya dan sisa panas yang lain ada yang mengakibatkan air dan uap berpindah dari dalam timbunan ke luar permukaan timbunan [13]. Untuk lebih memahami proses *open-sun drying* dapat melihat Gambar 6.

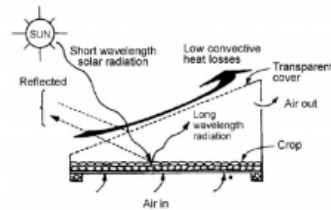


Gambar 6. Prinsip Kerja Proses *Open-sun Drying* [14].

Selain *open-sun drying*, metode pemanfaatan panas matahari dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu cara langsung (*direct*) dan cara tidak langsung (*indirect*). Cara langsung dilakukan dengan menyimpan padatan di bawah sinar matahari dan mengalirkan udara untuk aerasi. Sedangkan cara tidak langsung dilakukan dengan mengalirkan udara yang dipanaskan oleh matahari ke padatan. Terdapat juga cara gabungan (*mixed*) antara cara langsung dan tidak langsung.

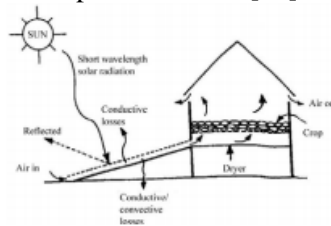
Prinsip kerja *direct solar drying* dapat dilihat pada Gambar 7. Pada proses ini air yang menguap akan dibawa keluar oleh udara yang mengalir

melewati *cabinet* atau ruang pengering baik secara alami (pasif) maupun dibantu *fan* (aktif). Radiasi sinar matahari akan melewati penutup transparan dan akan terjadi fenomena efek rumah kaca karena pantulan radiasi tidak sepenuhnya keluar *cabinet* sehingga temperatur didalam *cabinet* akan lebih tinggi. Proses ini juga minim rugi-rugi panas akibat konveksi dengan lingkungan, sehingga panas dari matahari mampu dimanfaatkan lebih banyak untuk menguapkan air di padatan.



Gambar 7. Prinsip Kerja *Direct Solar Drying* [14].

Pada *Indirect Solar Drying* padatan dikeringkan dengan cara melewatkan udara panas hasil pemanasan dari radiasi matahari. Gambar 8 menunjukkan prinsip kerja proses ini. Udara dapat dipanaskan hingga bertemperatur 60 °C sebelum dialirkan melewati padatan basah [13].



Gambar 8. Prinsip Kerja *Indirect Solar Drying* [14].

Solar drying mampu mengeringkan padatan hingga kadar air 15 % [12]. Waktu pengeringan solar drying cukup lama, biasanya memiliki orde waktu jam hingga orde hari, tergantung kondisi lingkungan. Konsumsi energi solar drying didekati oleh konsumsi energi pengeringan konvensional sebesar 3.240 kJ/kg air [9].

Pemanfaatan Panas Sisa (*Heat Recovery*). Sistem torefaksi kontinu yang dimodelkan oleh tim Laboratorium Termodinamika ITB dengan kapasitas 10 ton/h memiliki panas sisa dari gas buang. Gas buang berupa udara panas bertemperatur 90°C dengan laju massa 2.624,4 kg/h serta air panas bersumber dari uap yang telah terkondensasi bertemperatur 90°C dengan laju massa 9.800 kg/h [4]. Jika temperatur akhir kedua sumber panas tersebut menjadi 40°C maka panas sisa yang mampu dimanfaatkan sebesar 610 kW.

Panas sisa tersebut dapat dimanfaatkan kembali sebagai sumber panas alat pengering.

Pemilihan alat pengering dapat dilakukan dengan menyesuaikan karakteristik alat dengan kondisi operasi dan kebutuhan pengeringan. Perbandingan karakteristik alat pengering terdapat pada Tabel 3. Dari tabel tersebut dapat dilihat alat pengering yang dapat beroperasi pada temperatur dibawah 90°C adalah *belt conveyor dryer*. Jenis pengeringan ini juga tidak memiliki batasan atau syarat yang rumit seperti kondisi tertentu dari material umpan, sehingga alat ini cocok dan mudah diterapkan untuk pengeringan dengan sumber panas sisa reaktor torefaksi.

Tabel 3. Perbandingan Karakteristik Alat Pengering [15].

Parameter	Tipe Alat Pengering		
	<i>Rotary</i>	<i>Flash</i>	<i>Belt</i>
Laju evaporasi (ton/h)	3 - 23	4,8 - 17	0,5 - 40
Temperatur Pengeringan (°C)	200 - 600	150 - 280	30 - 200
Pengurangan Kadar air (% wb)	10 - 45	10 - 45	15 - 25
<i>Pressure Drop</i> (kPa)	2,5 - 3,7	7,5	0,5
ukuran maksimum umpan (mm)	25 - 125	0,5 - 50	-
Kapasitas (ton/jam)	3 - 45	4,4 - 16	1 - 10
waktu tinggal umpan	10 - 60 min	0 - 10 s	10 - 60 min

Belt conveyor dryer mampu mengeringkan padatan basah hingga kadar air 25 % [15]. Namun dengan daya panas sisa yang tersedia dari sistem torefaksi kontinu yang dikembangkan sebesar 610 kW, energi ini hanya mampu menurunkan kadar air sebesar 2 % untuk kapasitas umpan 10 ton/h. Berarti hanya bisa turun dari 80 % menjadi 78 %, dan nilai kandungan air ini masih belum layak secara keenergian.

Penerapan Metode Pengeringan Non-termal pada Sistem Torefaksi Sampah Kontinu

Penerapan metode pengeringan non-termal didapat dari hasil perbandingan yang berdasarkan kepada sisi proses, karakteristik produk dan kepraktisan penerapan.

Sisi proses dibagi menjadi kapasitas alat, waktu tinggal, konsumsi energi dan reliabilitas. Kapasitas alat dikaji untuk melihat apakah alat atau metode mampu mendukung sistem torefaksi kontinu skala industri. Reliabilitas merupakan faktor konsistensi performa setiap metode seiring berjalannya waktu, jika metode tersebut memiliki banyak faktor yang membuat konsistensi

performa berubah-ubah maka ditenggarai akan memiliki reliabilitas yang rendah. Konsumsi energi menunjukkan penggunaan energi untuk setiap kilogram air yang dilepas.

Sisi karakteristik produk dilihat dari batasan nilai akhir kadar air produk, sementara sisi kepraktisan penerapan akan dilihat dari kemudahan penggunaan metode dan jenis peralatan yang digunakan.

Dalam analisis ini, sisi proses memiliki bobot yang paling besar dalam penilaian mengingat metode yang terpilih akan diterapkan pada skala industri karena memiliki performa proses yang mampu mendukung proses skala industri. Hampir setiap metode mampu mengurangi kadar air dibawah 75 % sehingga sisi karakteristik produk tidak menjadi perhatian utama. Tabel 4 menunjukkan perbandingan relatif antar metode. Positif (+) artinya lebih baik dari datum, negatif (-) berarti lebih buruk dan sama dengan (=) berarti tidak jauh berbeda dari datum.

Tabel 4. Perbandingan relatif antar metode pengeringan non-termal

Parameter	Metode Tekan	Metode Sentrifugal	Pengeringan Udara	<i>Biodrying</i>	<i>Solar drying</i>	<i>heat recovery</i>
Kapasitas alat	datum	=	-	-	-	+
waktu tinggal umpan	datum	=	-	-	-	=
reliabilitas	datum	=	-	-	-	=
Kebutuhan energi per massa air	datum	-	+	+	+	-
Batasan nilai akhir kadar air umpan	datum	=	+	+	+	-
kemudahan penggunaan	datum	-	+	-	+	-
	datum	-2	0	-2	0	-2

Dari parameter waktu tinggal umpan dan reliabilitas, metode tekan, sentrifugal dan *heat recovery* lebih unggul dari metode lain karena alat yang digunakan bermode operasi kontinu dan memiliki performa alat yang tidak banyak dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti kondisi lingkungan yang sulit dikendalikan.

Proses pengeringan secara mekanik seperti metode tekan dan sentrifugal akan lebih efisien diterapkan pada umpan yang sangat basah bila dibandingkan dengan pengeringan panas biasa. Akan tetapi pengeringan mekanik memiliki batasan kadar air yang bisa dilepas. Air yang mudah dilepas biasanya terletak pada permukaan padatan dan pada pori-pori yang besar (makro), sedangkan air yang sulit dilepas terletak pada pori-pori yang kecil (mikro) yang terikat secara fisik maupun kimiawi. Oleh karena itu, air yang dapat dilepas oleh metode tekan dan sentrifugal utamanya adalah air yang terletak dipermukaan padatan dan pada pori-pori yang besar.

Hasil perbandingan relatif antar metode, menunjukkan metode tekan lebih unggul sesuai parameter yang ditentukan. Nilai yang didapat metode tekan sama seperti metode *solar drying* tetapi dari sisi yang dititik-beratkan pemilihan yaitu sisi proses, *solar drying* tidak lebih baik dari metode tekan.

Meskipun unggul, metode tekan memiliki beberapa kelemahan sehingga diperlukan modifikasi atau kombinasi dengan metode lain dalam penerapannya. Salah satu kelemahannya adalah batasan nilai akhir kadar air yang tinggi. Hal tersebut dikarenakan banyak air yang terjebak berada pada struktur mikro sehingga sulit terlepas hanya dengan diberi gaya mekanik, selain itu faktor permeabilitas yang semakin rendah akibat penyusutan ruang membuat air sulit terlepas.

Modifikasi metode tekan dapat dilakukan dengan cara memperbesar area padatan dan merusak struktur sehingga struktur yang menjebak air menjadi terbuka dan permeabilitas material meningkat sehingga air mudah terlepas dan mengalir keluar. Untuk mempermudah penerapan, sebaiknya umpan diolah dengan memperkecil ukuran dan memperbesar gaya geser untuk merusak struktur sebelum dilakukan proses tekan.

Kombinasi metode tekan dengan metode lain dapat dilakukan dengan *solar drying* dan pengeringan udara, karena keduanya merupakan metode yang mudah diterapkan, walaupun waktu yang diperlukan cukup lama.

Kesimpulan

1. Metode non-termal yang terbaik untuk diterapkan pada model sistem torefaksi kontinu adalah metode tekan dengan alasan energi yang diperlukan lebih sedikit untuk melepas sejumlah air yang sama dan kemampuannya untuk mendukung sistem torefaksi kontinu.
2. Peningkatan performa metode tekan dalam penerapannya dapat dilakukan dengan dua cara. Pertama, modifikasi metode tekan, yaitu dengan merusak struktur dan memperluas area padatan. Kedua dengan mengkombinasikan dengan metode lain.

Hasil dari kajian ini akan ditindaklanjuti dengan langkah eksperimen sebagai pembuktian dan dasar pengembangan selanjutnya.

Referensi

- [1] Ari Darmawan Pasek, Toto Hardianto, Willy Adriansyah, dll., 2007, *Laporan Akhir Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Dengan Bahan Bakar Sampah Di Kota Bandung*, LPPM ITB, Bandung.
- [2] Toto Hardianto, Amrul, Aryadi Suwono, and Ari Darmawan Pasek, *Upgrading of Municipal Solid Waste as Solid Fuel to Subbituminous Coal Grade by Torrefaction Process*, Proceedings of Regional Conference on Mechanical and Aerospace Technology 2010, Bali, Indonesia, February 9-10, 2010.
- [3] Toto Hardianto, Aryadi Suwono, Ari Darmawan Pasek, dan Amrul, *Balance Energi pada Proses Torefaksi Sampah Kota Menjadi Bahan Bakar Padat Ramah Lingkungan Setara Batubara untuk Memperhitungkan Tingkat Kelayakannya*, Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin X (SNTTM X), kota, Indonesia, 2011
- [4] Enri Damanhuri, 2010, *Diktat Kuliah TL-3104 Pengelolaan Sampah*, ITB, Bandung
- [5] Pelin Sari, 2006, *Thesis: Preliminary Design and Construction of A Prototype Canola Seed Oil Extraction Machine*, Middle East Technical University,
- [6] Carolyn J. Roos, 2013, *Biomass Drying and Dewatering for Clean Heat & Power*, U.S Department of Energy, Washington
- [7] Qingqi Yan and Michael Modigel, *Mechanical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass Using a Screw Press as an Essential Step in the Biofuel Production*,

- Publication of AIDIC, Germany, 2012
- [8] Solids Dewatering Evaluation, 2013, HDR
- [9] Edward T and John M, Evaluation of Dewatering Technologies for 4 WWTP Nutrient Reduction Projects: BFP, Centrifuge, Rotary Fan Press, and Inclined Screw Press, Presentation on 2012 Ohio WEA Conference, Aurora, 2011
- [10] Velis C.A, P.J.Longhurst, G.H.Drew, R.Smith and S.T.J.Pollard, 2009, *Biodrying for Mechanical-biological Treatment of Wastes: A Review*, Biosources Technology 103
- [11] Agnieszka Z., Liliana K. and Stanislaw L., *Autothermal Drying of Organic Fraction of Municipal Solid Waste*, Technical University of Lodz, Poland, 2009
- [12] Wermer Weiss and Josef Buchinger, , *Solar Drying*, AEE INTEC, Institute for Sustainable Technologies, Austria
- [13] Ching Lik Hii, et. al., 2012, *Solar Drying: Fundamentals, Applications and innovations*,
- [14] Hanning Li, et al., *Evaluation of A Biomass Drying Process Using Waste Heat from Process Industries: A Case Study*, Sheffield University Waste Incineration Centre (SUWIC), United Kingdom