

Pengeringan Sampah Organik Rumah Tangga

Eko Naryono^{1,2}, Soemarno^{1,3}

¹Program Doktor Kajian Lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Brawijaya

²Laboratorium Termodinamika, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang

³Jurusan Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya, Malang

Abstrak

Pengeringan sampah padat merupakan tahapan proses yang penting sebelum dibakar pada insinerator. Tujuan pengeringan untuk mengurangi volume, menstabilkan dan, meningkatkan nilai panas sampah. Berdasarkan referensi yang ada tiga jenis metode yang biasa digunakan pada pengeringan sampah yaitu konveksi, konduksi dan kombinasi keduanya. Pada makalah ini dipaparkan tinjauan teoritis mekanisme pengeringan ketiga metode di atas. Selain itu juga dijelaskan berbagai dampak gas buang yang ditimbulkan ketiga jenis pengeringan berdasarkan hasil penelitian terdahulu yang dimuat pada beberapa jurnal. Paparan ini diharapkan dapat digunakan sebagai dasar untuk merencanakan sistem pengeringan pada sampah organik rumah tangga.

Kata kunci : Pengeringan, Bio-drying, Termal drying, Fry-drying, Emisi

Abstract

Organic solid waste drying is the important process before burned to incinerator. The purpose of drying is to decrease volume, to stabilize and to increase the heating value of waste. The three heat transfer mechanisms which are usually used in waste drying are convection, conduction and combination of both. This paper discussed about drying process theory of that three methods. Also explained of the release gas effect which caused by those drying methods based on past published research on some journal. This paper hoped can be used to plan drying sistem of solid waste basically.

Keywords: Drying, Bio-drying, Thermal drying, Fry-drying, Emission

PENDAHULUAN

Pengeringan sampah merupakan salah satu tahapan proses yang penting pada pengolahan sampah. Tujuan pengeringan adalah mengurangi volume, menstabilkan dari mikroorganisme patogen dan meningkatkan nilai panas sampah sehingga memenuhi persyaratan untuk dibakar. Pengeringan sampah sebelum dibakar dapat meningkatkan kesempurnaan reaksi pembakaran. Sampah yang mengandung nilai panas minimal 11600 J/g (Lee dan Lin, 2007) dapat terbakar secara menerus dan setabil sedangkan yang mempunyai nilai panas lebih kecil memerlukan bahan bakar tambahan. Sebaliknya sampah yang mempunyai kandungan air yang tinggi menyebabkan temperatur ruang bakar rendah, karena sebagian energi panas dipakai untuk menguapkan air. Hal ini menyebabkan terjadinya reaksi pembakaran yang tidak sempurna (*incomplete combustion*).

Berdasarkan beberapa referensi ada tiga mekanisme perpindahan panas pada proses pengeringan (Chen, Yue dan Mujumdar, 2002)

yaitu pengeringan secara konveksi, konduksi dan kombinasi keduanya. Pada sistem konveksi gas panas hasil pembakaran bahan bakar atau sampah kering dikontakkan secara langsung dengan sampah basah untuk menguapkan air. Mekanisme pengeringan didominasi konveksi gas panas bercampur dengan uap air yang berasal dari sampah. Sistem pengeringan konduksi perpindahan panas melalui dinding alat pengering. Sebagai media pemanas dapat dipakai gas panas atau minyak panas. Sampah yang dikeringkan terpisah dari media pemanas dan uap air tidak bercampur dengan media pemanas. Pengeringan yang menggunakan sistem gabungan menerapkan kedua sistem ini pada satu proses.

Kandungan air pada sampah diklasifikasikan sebagai berikut, air bebas dan air permukaan, dan air yang terikat. Air bebas dan air permukaan dapat menguap pada kisaran temperatur 100° C, tetapi pada penguapan air terikat membutuhkan temperatur sampai dengan 400° C (Ohm *et al.*, 2009). Proses penguapan air yang terikat ini juga membutuhkan waktu yang relatif lama sekitar 40 sampai 60 menit untuk menurunkan kadar air sampai 40%. Pada saat permukaan mulai mengering kecepatan pengeringan semakin lambat (Shin *et al.*, 2008).

Alamat Korespondensi

Eko Naryono

Email : eko_naryono@yahoo.com

Alamat : Jl. Bantaran Barat I/30 Malang, 65141

Hal ini menyebabkan pada beberapa jenis sampah misalnya sisa makanan pemakaian energi dan waktu untuk mengeringkan menjadi tidak efisien.

Pada proses pembakaran yang sempurna, kadar air sampah harus diturunkan menjadi sekitar 10% sehingga nilai panas mencapai sekitar 11600 J/g. Untuk mencapai kondisi ini diperlukan metode pengeringan yang tepat. Berikut ini dipaparkan tiga macam metode teknis pengeringan sampah yang pernah diteliti dan dipublikasikan pada beberapa jurnal. Metode ini diharapkan dapat menjadi dasar acuan dalam merancang sistem pengeringan yang tepat sehingga dapat mengkondisikan sampah sebelum dibakar sesuai persyaratan di atas.

Metode Biodrying

Biodrying (*biological drying*) merupakan salah satu teknik pengeringan dengan perlakuan secara biologi. Penerapan pada pengolahan sampah adalah untuk proses pengeringan pada reaktor biokonversi yang diintegrasikan dengan proses mekanik misalkan proses penghancuran dan klasifikasi menggunakan screen. Proses ini biasanya dikenal dengan sistem *mechanical-biological treatment* (MBT). Istilah *biodrying* menurut Jewell *et al.* (1984) merupakan (1) bioreaktor yang digunakan untuk mengolah sampah, (2) gabungan proses fisik dan biokimia (*physiobiochemical*) yang berlangsung dalam reaktor, (3) pengolahan MBT menggunakan reaktor *biodrying*. Pada sistem reaktor *biodrying* terjadi pelepasan energi panas selama proses dekomposisi bahan organik secara aerobik. Pengeringan terjadi karena panas reaksi eksotermis yang dilepaskan selama proses dekomposisi digunakan untuk menguapkan air yang terkandung pada sampah dan dengan adanya aliran udara untuk aerasi maka uap air tersebut akan terbawa ke atmosfer.

Produk hasil pengolahan MBT disebut *solid recovered fuel* (SRF). Keuntungan proses produksi SRF menggunakan *biodrying* adalah dapat menurunkan kadar air sampai < 20% dan CO₂ mencapai 20-30% (Velis *et al.*, 2009). Metode ini dapat dipakai untuk pengelolaan sampah yang ramah lingkungan. Proses *biodrying* berlangsung pada temperatur lingkungan seperti pada proses komposting. Perbedaan kedua proses ini pada tujuan kegunaan masing masing produk yang dihasilkan. Komposting menghasilkan produk kompos seperti humus yang dapat dipakai sebagai pupuk. Proses ini juga diterapkan untuk menstabilkan bahan organik pada sampah yang mudah mengalami degradasi

sebelum ditimbun sehingga meminimalkan terbentuknya lindi (*leachate*) dan gas pada lokasi *landfill*.

Berbeda dengan komposting yang pada pembuatannya memerlukan tambahan mineral untuk menghasilkan pupuk dengan persyaratan tertentu. Pada *biodrying* tanpa perlu menambahkan mineral karena bertujuan menghasilkan SRF yang tidak membutuhkan persyaratan khusus seperti pada pupuk misalnya persyaratan kandungan nutrisi dan mineral. Pada pembuatan SRF persyaratan utama adalah nilai panas dan kemudahan untuk diproses secara mekanik. Hal ini dicapai dengan (1) meningkatkan kandungan energi dengan cara menurunkan kadar air sampah dan menjaga tingkat nilai panas bahan organik dengan meminimalkan terjadinya biodegradasi, dan (2) mengkondisikan produk *biodrying* agar mudah diproses secara mekanik dengan mengurangi sifat adhesive. Produk *biodrying* tidak perlu memenuhi standart kesehatan yang tinggi seperti pada kompos karena sebagian besar digunakan sebagai bahan bakar.

Prinsip Operasi Biodrying

Prinsip operasi *biodrying* adalah menurunkan kadar air bahan dengan cara penguapan menggunakan panas eksotermis hasil dekomposisi sampah sehingga dihasilkan produk kering sesuai karakteristik yang diinginkan (Dofour, 2006). Walaupun telah banyak dilakukan riset tentang *phenomena drying*, namun mekanisme yang sebenarnya belum banyak diketahui. Teknologi pengeringan ini banyak diterapkan pada industri makanan, farmasi, pulp dan kertas dan banyak industri lain.

Pada *biodrying* mekanisme utama pengeringan adalah penguapan secara konveksi menggunakan panas eksotermis hasil proses degradasi aerobik sampah yang dikombinasikan dengan menambahkan aliran udara untuk aerasi. Kandungan air pada bahan dapat berkurang dengan tahapan, (1) molekul air menguap dari permukaan sampah ke udara karena terjadi perubahan fase dari cair ke uap, (2) air yang menguap dipindahkan dari bahan ke udara luar karena dibawa oleh aliran udara aerasi dan (3) seebagian kecil air meresap lewat tumpukan bahan dan ditampung pada bagian bawah reaktor *biodrying* sebagai lindi (*leachate*).

Mekanisme utama perpindahan massa pada *biodrying* adalah konveksi udara dan difusi molekuler uap air melewati struktur pori bahan (Frei, Stuart dan Cameron, 2004). Konveksi udara yang dialirkan pada tumpukan bahan akan

membawa uap air yang menguap dari permukaan bahan. Kecepatan perpindahan air dari permukaan bahan tergantung dari kesetimbangan termodinamika antara bahan padat basah (fase padat) dan aliran udara pada permukaan (fase gas).

Kebutuhan Energi Proses Biodrying

Energi yang dibutuhkan untuk proses penguapan (panas laten penguapan atau entalpi penguapan) diperoleh dari proses biodegradasi aerobik. Hal ini berbeda dengan pengeringan konvensional yang menggunakan panas dari luar untuk mengeringkan bahan. 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.

Sistem Peralatan dan Pengoperasian

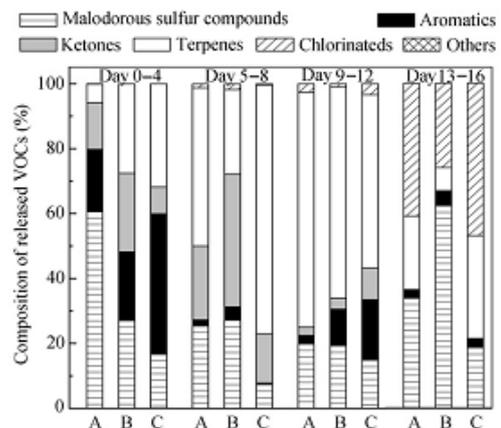
Efektifitas penerapan proses *biodrying* tergantung pada peralatan, pengoperasian dan kontrol kondisi operasi proses dan pengkondisian awal bahan yang dikeringkan. Beberapa permasalahan teknis yang dihadapi pada penerapan proses ini untuk mengeringkan sampah adalah : (1) diperlukan perlakuan awal untuk mengkondisikan umpan misalnya penghancuran dan pencampuran; (2) pemilihan reaktor yang tepat, misalnya sistem box tertutup rapat, silinder yang berlobang karena hal ini berpengaruh terhadap mekanisme perpindahan panas; (3) diperlukan pengadukan, pencampuran dengan agitasi atau rotasi untuk menjamin homogenitas bahan; (4) perancangan sistem aerasi yang tepat untuk menjamin sirkulasi udara sehingga terjadi proses perpindahan massa dan panas yang optimal; (5) kontrol kondisi operasi yang ketat laju alir udara pada tumpukan bahan untuk menjamin kecukupan oksigen substrat dan kecepatan pengeringan; (6) diperlukan kontrol sifat sifat *psychometric* udara yang masuk dengan cara pendinginan atau dehumidifikasi untuk mempertahankan kapasitas udara menguapkan air; (7) kontrol waktu tinggal bahan dalam reaktor, sehingga diperoleh waktu yang efektif proses reaksi biokimia dan fisik.

Tingkat kesulitan yang utama adalah bagaimana mengkondisikan proses agar dapat diperoleh produk dengan tingkat kekeringan tertentu dan mempertahankan kehidupan substrat. Untuk itu diperlukan sistem kontrol yang ketat terhadap semua parameter yang berpengaruh terhadap proses.

Karakteristik Produk dan Bahan Volatil pada Proses Biodrying

Proses *biodrying* sampah dapat menghasilkan SRF yang stabil dengan nilai panas yang tinggi. Kandungan air produk proses ini < 20% dengan lama proses 7-15 hari. Selama proses berlangsung terjadi penurunan CO₂ dan H₂O sebesar 25-30%. Selain H₂O dan CO₂, hasil samping proses ini adalah *volatile organic compound* (VOC) yaitu bahan volatil yang terbentuk selama proses dekomposisi secara biologi seperti dimetil disulfid, dimetil sulfida, benzena, 2-butanon, limonen dan metilen chlorida. Komponen ini sebagian besar terbentuk pada 4 hari pertama proses bio-drying berlangsung. Berdasarkan hasil penelitian He *et al.* (2010) yang melakukan identifikasi komponen VOC menggunakan analisa gas chromatography dapat diberikan gambaran perilaku terbentuknya bahan volatil dalam bentuk diagram hubungan antara jenis perlakuan dan konsentrasi VOC pada rentang waktu 0 sampai 16 hari perti terlihat pada Gambar 1.

Berdasarkan gambar 1, jenis komponen bervariasi tergantung pada jenis perlakuan dan lama proses. Pada empat hari pertama proses, komponen sulfur (penyebab bau tidak enak), terpen, aromatis dan keton merupakan senyawa paling dominan pada ketiga jenis perlakuan. Mulai hari 5 sampai 12, didominasi senyawa sulfur, keton dan terpen sedangkan pada 4 hari terakhir yang paling dominan adalah senyawa sulfur dan chlor.



Gambar 1. Komposisi VOC selama proses *bio-drying* A, B, C jenis perlakuan (He *et al.*, 2010).

Senyawa sulfur yang menyebabkan bau tidak enak hampir 80% adalah dimetil sulfida, sedang senyawa aromatik didominasi benzena dan butanon merupakan penyusun senyawa keton. Senyawa khlor yang terbentuk berasal dari

bahan aerosol, solven cat, sabun dan cat, dan bahan untuk *dry cleaning*. Metilen diklorid dan 2- dikloro ethan merupakan penyusun senyawa chlor yang dominan.

Potensi Emisi Gas Buang Hasil Pembakaran Produk *Biodrying*

Emisi gas buang hasil pembakaran sampah hasil pengeringan *biodrying* bervariasi tergantung bahan organik yang mengalami degradasi. Hasil pengeringan *biodrying* mempunyai potensi menaikkan emisi HCl dan SO₂ yang dapat menyebabkan terbentuknya dioksin selama proses pembakaran tetapi dapat menurunkan NO_x. Secara keseluruhan, emisi gas total hasil pembakaran dapat diminimalisasi dengan pengeringan *biodrying*. Sampah yang telah dikeringkan dengan proses *biodrying* lebih ramah lingkungan apabila dibakar dibandingkan sampah basah (Zhang, He dan Shao (2009).

Pengeringan Menggunakan Metode *Frying*

Sistem *frying* banyak diterapkan pada pengolahan makanan dengan cara memanaskan pada minyak goreng. Pengeringan metode *frying* dapat juga diterapkan pada bermacam macam produk selain makanan. Salah satu penerapannya adalah pada pengolahan untuk mengeringkan sludge hasil pengolahan limbah cair. Salah satu paper yang menjelaskan pertama kali tentang cara kerja *frying* pada sludge dipaparkan Silva, Rudolf dan Taranto (2005). Paper tersebut menjelaskan tentang eksperimen *frying sludge* menggunakan minyak kedelai pada temperatur 168-213° C. Sludge dimasukkan dalam peralatan penggorengan yang diisi minyak dan dipanaskan pada rentang temperatur di atas. Pada saat terjadi kontak antara sludge dan minyak panas, akan terjadi perpindahan panas dari minyak ke sludge yang menyebabkan terjadi penguapan uap air dari sludge. Temperatur yang tinggi dan interaksi antara minyak dan air dalam sludge menaikkan temperatur kandungan air dalam sludge sehingga menaikkan tekanan dalam sludge karena terjadi penguapan steam yang mengakibatkan terjadi proses pengeringan. Berdasarkan percobaan diperoleh produk sludge kering dengan kandungan air < 5% selama kira kira 10 menit. Selain itu terjadi kenaikan *lower heating value* (LHV) karena terjadinya penyerapan minyak ke dalam sludge.

Mekanisme transfer massa yang terjadi selama pengeringan *fry drying* sama seperti halnya pada penggorengan makanan. Menurut Farkas dan Hubbard (2000), ada empat tahapan pada proses. Pada awalnya terjadi pemanasan sampel kemudian tahap kedua terjadi pendidihan

pada permukaan sampai ke dalam bahan. Pada tahap ketiga ketika kandungan air mulai menurun, minyak masuk ke dalam bahan dan akhirnya terjadi perubahan fase pada air dan tahap empat terjadi penguapan air sehingga sebagian minyak menggantikan air pada bahan. Menurut hasil studi ini temperatur optimal untuk proses *frying* terjadi pada rentang 140-160° C dan kecepatan penguapan air bahan semakin tinggi dengan semakin kecilnya ukuran bahan.

Minyak berfungsi sebagai media pemanas selama proses berlangsung dan meningkatkan nilai energi pada bahan yang dikeringkan. Pada penerapannya media pemanas yang dipakai adalah minyak bekas (waste cooking oil) sehingga pada saat produk sludge dibakar menggunakan insinerator minyak yang menempel ikut terbakar. Hal ini menguntungkan karena dapat dipakai untuk mengolah dua macam limbah secara bersamaan (*co-disposal*) yaitu sludge dan minyak bekas.

Keunggulan Proses *Fry-Drying*

Fry drying mempunyai keunggulan dibandingkan jenis proses pengeringan lain pada sludge. Proses ini relatif mudah dengan cara kontak langsung menggunakan media pemanas (misalkan minyak panas), mampu mengeringkan dengan cepat dan menghasilkan produk kering yang aman untuk dibakar (Peregrina et al., 2008). Keuntungan lain adalah uap yang terbentuk berupa uap air sehingga mudah untuk diambil kembali (recovery) dengan cara kondensasi

Pengeringan sistem konveksi mempunyai tahanan termal (*thermal resistance*) yang lebih tinggi daripada *fry-dryer* (Peregrina et al., 2008). Semakin tinggi tahanan termal semakin lambat proses pengeringan. Apabila dibandingkan dengan sistem konveksi menggunakan pemanas aliran gas. Beberapa keuntungan lain *Fry drying* antara lain terserapnya minyak pada bahan dapat menaikkan nilai energi yang dibutuhkan pembakaran, minyak dapat mengurangi sifat berdebu pada sludge kering dan produk yang dihasilkan stabil tidak mudah mengalami degradasi ketika disimpan.

Karakteristik Produk Hasil *Fry-Dryer*

Berikut ini diberikan karakteristik produk hasil pengeringan dengan *fry-dryer* pada bahan tiga macam sludge berdasarkan analisa proximate yang ditulis pada original paper oleh Ohm et al. (2009). Karakteristik sludge diberikan dalam bentuk tabel seperti terlihat pada tabel 1 masing masing berasal dari pabrik kimia, pabrik kulit dan pabrik plating sebagai berikut:

Kandungan air pada sludge dari pabrik kimia yang semula 80% turun menjadi 5.5%. Prosentase abu, fixed carbon dan bahan volatile sebelum pengeringan masing masing 7.8, 2.3, dan 9.9% setelah proses berubah menjadi 22.5, 38 dan 34%. Sludge dari pabrik kulit kandungan air awal sebelum pengeringan 81,6% menjadi 1% setelah pengeringan. Kandungan abu, fixed carbon dan bahan volatil yang semula 8.1, 1.5 dan 8.8% prosentasenya berubah menjadi 21, 51.3 dan 26.7% setelah pengeringan. Demikian juga sludge pabrik plating kandungan air menurun semula 65,4% berubah menjadi 0,8% setelah pengeringan sedangkan kandungan abu, fixed karbon dan bahan volatile berubah dari masing masing dari 15, 3.6 dan 16% menjadi 20.5, 51.7, dan 27%. Kandungan air, fixed karbon dan bahan volatil pada sludge memenuhi syarat sebagai bahan bakar padat pada insinerator

Tabel 1. Hasil analisa proximate karakteristik sludge sebelum dan setelah pengeringan (Peregrina et al., 2008).

Sludge	proses	Kandungan Air (%berat)	Abu (%berat)	Karbon Tetap (%berat)	Bahan Volatile (% berat)
Pabrik Kimia	Sebelum	80.0	7.8	23	9.9
	Setelah	5.5	22.5	38.0	34.0
Pabrik Kulit	Sebelum	81.6	8.1	1.5	8.8
	Setelah	1.0	21.0	51.3	26.7
Pabrik plating	Sebelum	65.4	15.0	3.6	16.0
	Setelah	0.8	20.5	51.7	27.0

Hasil ultimate analisis dari ketiga macam sludge dapat dilihat pada Tabel 2. Berdasarkan tabel tersebut dapat dibuat ringkasan kandungan komponen yang dapat terbakar yaitu C, H, O, N dan S sebelum dan sesudah pengeringan (Tabel 2).

Tabel 2. Hasil analisa ultimate karakteristik sludge (Peregrina et al., 2008).

Sludge	Elemen	Bahan dapat terbakar (% berat)				
		C	H	Sludge	S	O
Pabrik Kimia	Sebelum	2.3	1.1	0.3	0.3	8.2
	Setelah	44.3	7.5	1.1	0.1	19.0
Pabrik Kulit	Sebelum	1.5	1.2	0.7	0.2	6.6
	Setelah	49.4	8.2	1.9	0.1	18.5
Pabrik plating	Sebelum	3.6	2.0	0.9	0.4	12.8
	Setelah	49.2	8.3	1.5	0.6	19.0

Sistem pengeringan konduksi, perpindahan panas terjadi secara tidak langsung melalui dinding alat pengering. Sebagai pemanas adalah gas panas atau minyak panas yang terpisah dengan bahan yang dikeringkan sehingga uap air tidak bercampur dengan media pemanas. Sistem ini walaupun membutuhkan peralatan yang lebih kompleks dibandingkan

konveksi tetapi mempunyai keunggulan yaitu panas laten uap air dapat diambil kembali (*recovery*). Pada mixed dryer metode pengeringan menggunakan kombinasi mekanisme konveksi dan konduksi.

Pengeringan Konveksi (convective drying)

Pengeringan konveksi mekanisme perpindahan panas dilakukan dengan cara kontak langsung antara bahan yang dikeringkan dan pemanas sehingga dapat meningkatkan temperatur bahan yang dikeringkan dan kandungan air. Uap air berpindah dari pada permukaan penguapan bahan kemudian menguap ke aliran udara pemanas. Kecepatan perpindahan panas dan massa uap air tergantung kecepatan udara yang digunakan pengeringan, temperatur dan tekstur bahan yang dikeringkan. Sistem pengeringan konveksi sampai saat ini masih banyak diterapkan pada proses pengeringan pada berbagai industri.

Perilaku pengeringan konveksi bahan padat sampai saat ini belum dapat diketahui dengan jelas. Hal ini disebabkan karena selama proses berlangsung terjadi perubahan struktur (bentuk) dan ukuran bahan yang berakibat pada perubahan mekanisme perpindahan panas dan massa. Oleh karena itu banyak penelitian yang mengembangkan berbagai model untuk menjelaskan mekanisme pengeringan. Model ini disusun berdasarkan neraca energi menggunakan konsep hukum pertama termodinamika dengan mengabaikan perubahan energi akibat perubahan bentuk dan struktur. Beberapa peneliti terdahulu yang pernah melakukan antara lain Vaxelaire et al. (2000), Prommas, Keangin dan Rattanadecho (2010).

Penelitian Vaxelaire (Vaxelaire et al., 2000).

Vaxelaire et al. (2000) melakukan penelitian tentang kinetika dan potensial drying untuk mengetahui perilaku proses pengeringan. Penelitian ini menggunakan dua variabel yang dianggap berpengaruh terhadap kualitas hasil pengeringan yaitu (1) Kondisi operasi pemanas (udara atau gas panas) misalnya temperatur, relatif humidity dan kecepatan aliran udara; dan (2) Kondisi dan tekstur bahan.

Salah satu cara untuk mengetahui perilaku pengeringan adalah berdasarkan densitas fluks massa yang diupkan (F_m). Densitas fluks massa yang diupkan adalah massa yang diupkan setiap satuan luas bahan yang diupkan setiap satuan waktu. Perubahan densitas fluks massa dan kandungan air yang berpengaruh terhadap karakteristik drying mempunyai pola berbeda dan dibagi menjadi dua, yaitu (1)

Perioda pada saat kecepatan penguapan konstan yaitu proses penguapan air pada permukaan bahan. Pada fase ini karakteristik proses dipengaruhi kondisi operasi udara; dan (2) Perioda pada saat terjadi penurunan kecepatan penguapan yang dipengaruhi sifat perpindahan massa dan panas dan kondisi operasi. Pengeringan konveksi tergantung tahanan perpindahan pada lingkungan yang dapat dikontrol berdasarkan parameter temperatur udara kering (*dry bulb*), kelembaban (*humidity*) dan kecepatan aliran udara.

Pengaruh ketiga variabel di atas sulit ditentukan misalkan apakah pada kondisi operasi satu (T_1, RH_1, v_1) lebih baik (cepat, murah) bila dibandingkan dengan kondisi lain (T_2, RH_2, v_2). Untuk itu perlu digunakan parameter lain yang lebih mudah dipakai sebagai dasar evaluasi. Salah satu parameter yang dapat dipakai adalah *potential drying* (DP) yaitu *driving force* termodinamika yang dapat menyebabkan terjadinya penguapan air dari bahan yang basah ke udara dengan kelembaban tertentu. *Potential drying* dapat dicari berdasarkan perbedaan potensial kimia uap jenuh pada temperature bola basah (*wet bulb*) dan temperature bola kering (*dry bulb*).

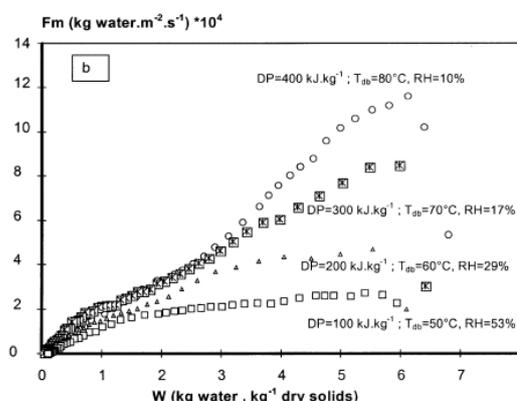
Berikut ini profil kecepatan pengeringan yang dinyatakan dalam F_m berdasarkan parameter *potential drying* (DP) hasil penelitian Vaxelaire et al. (2000) pada *sludge* lumpur aktif hasil pengolahan limbah air. Berdasarkan gambar (2) dapat dilihat berbagai variasi kondisi operasi proses pengeringan temperatur bola kering (T_{db}) dan DP yang mempengaruhi kecepatan pengeringan yang dinyatakan dalam densitas fluks massa pada berbagai kandungan air air bahan. Kurva ini dapat dipakai sebagai dasar perancangan alat pengering untuk menentukan kondisi operasi pengeringan.

Penelitian Prommas (Prommas, Keangin dan Rattanadecho,2010).

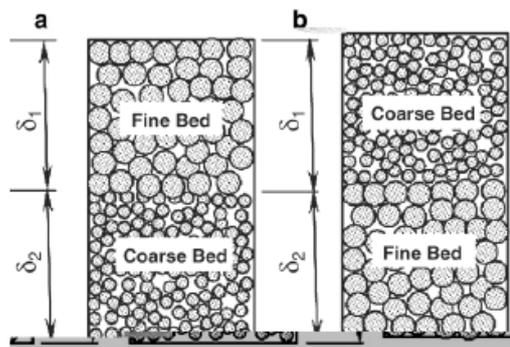
Penelitian tentang pengeringan yang telah dilakukan Vaxelaire tidak mempelajari pengaruh dari ukuran dan tumpukan bahan. Prommas dkk [15] melakukan penelitian proses pengeringan dengan menggunakan variable ukuran dan tumpukan bahan. Percobaan dilakukan dengan cara mengeringkan bahan yang ditumpuk dengan cara berbeda seperti terlihat pada Gambar 3. Pada gambar tersebut terlihat dua macam tumpukan yang digunakan pada penelitian. Gambar 3(a) tumpukan bahan diameter kecil (diameter rata rata 0.15 mm) diletakkan dibawah bahan dengan diameter besar (0.4 mm)

sebaliknya 3(b) bahan dengan diameter besar (0.4 mm) diletakkan di bawah diameter kecil (0.15 mm). Kemudian kedua macam tumpukan bahan tersebut dikeringkan menggunakan pemanas listrik.

Berdasarkan data hasil pengamatan dapat diketahui bahwa profil kandungan uap air tidak seragam sepanjang tumpukan. Selama proses pengeringan secara konveksi. Kandungan air pada tumpukan dengan diameter bahan kecil selalu tinggi, sedangkan pada tumpukan dengan diameter bahan yang besar kandungan air rendah dibandingkan pada kondisi awal. Hal ini disebabkan karena terjadinya perbedaan aliran kapiler pada kedua jenis diameter.



Gambar 2. Hubungan antara kandungan air bahan dan densitas fluks massa (F_m) (Vaxelaire et al., 2000).



Gambar 3. Dua macam tumpukan bahan pada Pengeringan (Prommas, Keangin dan Rattanadecho,2010).

Hasil penelitian ini menunjukkan banyak terjadi interaksi pada sistem pengeringan pada tumpukan bahan selama proses pengeringan konveksi. Kecepatan penguapan tumpukan dengan diameter bahan kecil di bawah bahan besar, lebih rendah daripada tumpukan bahan diameter besar di bawah diameter kecil.

Sehingga waktu pengeringan tumpukan ini lebih pendek.

Pengeringan Konduksi (*Conductive Drying*)

Pengeringan secara konduksi disebut juga pengeringan tidak langsung (*indirect drying*). Mekanisme pengeringan secara tidak kontak langsung antara media pemanas dan bahan yang dikeringkan. Perpindahan panas melalui kontak antara bahan yang dipanaskan dengan tempat pengeringan yang memperoleh sumber panas dari media pemanas. Sistem pengeringan ini digunakan pada bahan yang tidak boleh terkontaminasi oleh media pemanas misalkan pada makanan dan produk farmasi. Contoh peralatan sistem pengeringan yang banyak digunakan adalah *rotary dryer*.

Rotary dryer berbentuk tabung silinder berputar yang di dalamnya berisi bahan yang dikeringkan. Media pemanas yang diletakkan terpisah dari bahan yang dikeringkan dapat berupa nyala api, steam, aliran gas panas atau pemanas listrik.

Pengeringan gabungan konduksi-konveksi

Pengeringan gabungan konveksi dan konduksi mempunyai mekanisme perpindahan panas secara kontak langsung maupun tidak langsung. Sistem pemanas yang dipakai biasanya adalah gas panas yang langsung dibuang ke atmosfer. Gas panas yang masuk pada mulanya dialirkan secara terpisah dari bahan yang dikeringkan. Setelah keluar dari sistem pemanas awal selanjutnya dilewatkan pada bahan sehingga terjadi kontak langsung. Sistem ini digunakan untuk pengeringan bahan yang mempunyai kandungan air yang tinggi sehingga pada saat awal pemanasan ketika temperatur gas masih tinggi digunakan sistem tidak langsung agar tidak terjadi kontak antara air dan gas panas.

Karakteristik Sampah Hasil Pengeringan Termal

Salah satu metode pengolahan sampah rumah tangga adalah dengan cara dibakar menggunakan insinerator. Sebelum dibakar sampah dikondisikan terlebih dahulu guna meningkatkan nilai panas, memperbaiki kualitas emisi gas buang dan abu sisa pembakaran. Proses ini disebut *pre sorting* yang dilakukan dengan cara pemilahan dan pengeringan sampah agar memenuhi persyaratan dengan karakteristik tertentu. Sampah hasil pemilahan dan dan pengeringan termal biasanya dikenal dengan nama *refuse- derived fuels* (RDF).

Pada proses pembuatan RDF mula mula sampah dipisahkan dari bahan yang tidak mudah terbakar seperti logam, gelas, bahan yang

mempunyai potensi pencemaran pada gas buang misalnya baterai dan bahan yang mempunyai ukuran relatif besar seperti kayu. Bahan yang relatif lunak kemudian dihancurkan untuk memperkecil ukuran sebelum dilakukan pengeringan. Bahan yang berukuran kecil selanjutnya dikeringkan sampai kandungan air < 10%.

Karakteristik yang penting pada RDF adalah nilai panas dan komposisi campuran bahan. Nilai panas menentukan kontinuitas reaksi pembakaran dan komposisi campuran menentukan kualitas emisi gas buang hasil pembakaran. Jenkins *et al.* (1998) memberikan hasil analisis karakteristik RDF seperti terlihat pada Table 4. Berdasarkan tabel 4 higher heating value (HHV) memenuhi persyaratan nilai panas RDF agar dapat menyala secara menerus yaitu minimal 5000 Btu/lb.

Komposisi sampah rumah tangga sebagai bahan baku RDF selain senyawa organik yaitu hidrokarbon juga mengandung senyawa anorganik. Bahan anorganik ini terdistribusi atau terdispersi pada seluruh RDF. Senyawa anorganik ini terdiri dari elemen Si, K, Na, S, Cl, Ca, Mg, dan Fe yang dapat melebur pada temperature bakar apabila terikut pada gas buang dapat mencemari lingkungan dan menyebabkan korosi pada ruang bakar. Penurunan elemen anorganik dapat meningkatkan temperatur lebur abu. Hal ini menguntungkan karena dapat mencegah terikutnya elemen ini pada emisi gas buang. Salah satu metode yang dapat dipakai untuk penurunan elemen ini dengan cara dicuci menggunakan air, tetapi hal ini akan berpengaruh terhadap kebutuhan energi proses pengeringan.

Tabel 4. Karakteristik RDF (Prommas, Keangin dan Rattanadecho,2010)

Jenis analisis	Hasil analisis
<i>Proximate analysis</i> (% bahan kering)	
Karbon tetap	0.47
Bahan volatile	73.40
Abu	26.13
<i>Total</i>	100.00
<i>Ultimate analysis</i> (% bahan kering)	
Karbon	39.70
Hidrogen	5.78
Oksigen	27.24
Nitrogen	0.80
Sulfur	0.35
Abu	26.13
<i>Total</i>	100.00

<i>Elemental composition of ash (%)</i>	
SiO ₂	
Al ₂ O ₃	33.81
TiO ₂	12.71
Fe ₂ O ₃	1.66
CaO	5.47
MgO	23.44
Na ₂ O	5.64
K ₂ O	1.19
SO ₂	0.20
P ₂ O ₅	2.63
CO ₂	0.67
<i>Total</i>	100.00
<i>Higher heating value (Btu/Lb)</i>	66.79

Karakteristik RDF ini dapat dipakai sebagai acuan untuk merencanakan sistem pengeringan yang dapat menghasilkan sampah dengan karakteristik yang dianggap memenuhi persyaratan untuk dibakar.

Pemilihan Sistem Pengeringan

Pemilihan sistem pengeringan sampah rumah tangga harus mempertimbangkan tiga hal yaitu penggunaan energi yang efisien, kemudahan mengontrol VOC pada gas buang hasil pengeringan dan kecepatan pengeringan. Berikut ini diberikan perbandingan ketiga jenis pengeringan yang telah diuraikan di atas sehingga dapat dijadikan pertimbangan dalam memilih sistem pengeringan yang sesuai. Dari segi penggunaan energi proses *bio-drying* yang paling rendah. Hal ini disebabkan proses pengeringan ini menggunakan panas eksotermis hasil degradasi sampah sebagai sumber energi. Tambahan energi dari luar relatif kecil hanya terbatas kebutuhan untuk aerasi. Proses yang paling besar penggunaan energi untuk pengeringan adalah pengeringan termal secara konveksi dan konduksi. Pada proses ini membutuhkan sumber panas dari luar untuk pengeringan. Perpindahan konveksi berjalan lambat karena adanya ruang di sela sela tumpukan bahan (*void fraction*). Sistem *frying* mempunyai kecepatan pengeringan yang paling besar sehingga mempunyai waktu pengeringan yang paling cepat. Hal ini disebabkan perpindahan panas konveksi sistem ini cepat karena adanya minyak sebagai media konveksi.

Potensi terbentuknya jenis VOC proses *bio-drying* paling banyak jenisnya, hal ini disebabkan karena terjadinya reaksi samping hasil proses degradasi secara biologi. Selain itu proses pengeringan berjalan lama antara 7 sampai 15 hari. Hal ini berdampak pada kemungkinan mencemari lingkungan apabila tidak dilakukan kontrol yang baik terhadap VOC.

Pengeringan termal dan *frying* menghasilkan VOC yang lebih kecil daripada *bio-drying*. Nilai panas bahan hasil pengeringan *frying* paling tinggi hal ini disebabkan karena kandungan air produk pengeringan rendah (< 1%) dan terikutnya minyak yang meresap dalam bahan. Kebutuhan energi untuk pengeringan setiap satu satuan massa bahan yang dikeringkan secara termal sistem konveksi dan konduksi paling besar dibandingkan dengan *bio-drying* dan *frying*. Namun demikian kebutuhan energi untuk pengeringan secara termal dapat diperoleh dari panas hasil pembakaran sampah itu sendiri.

Hasil penelitian Caton (2010) pada limbah makanan menunjukkan bahwa panas hasil pembakaran mencukupi untuk proses pengeringan. Berdasarkan hasil penelitian diperoleh data kebutuhan energi untuk mengeringkan limbah makanan dengan kandungan air sekitar 70% menjadi < 10% diperlukan 6.7 MJ/kg produk kering. Apabila dibandingkan dengan nilai panas sampah makanan kering sebesar 21.7 MJ/kg maka kebutuhan energi pengeringan tersebut hanya 30%. Efektifitas pemakaian panas tergantung pada rancangan peralatan yang memungkinkan mengurangi kehilangan panas pada gas keluar pembakaran dan pada peralatan.

Berdasarkan perbandingan tersebut dan dengan memperhatikan aspek teknis, sistem pengeringan termal layak digunakan untuk pengeringan sampah organik rumah tangga. Beberapa kendala teknis pada sistem *bio-drying* dan *frying drying* antara lain :

1. Proses *bio-drying* terlalu lama sehingga membutuhkan lahan pengolahan yang lebih luas untuk mengeringkan sampah.
2. Proses *bio-drying* menghasilkan VOC yang relatif besar sehingga membutuhkan sistem kontrol potensi pencemaran VOC.
3. Pada jangka waktu sampai 15 hari kandungan air sampah masih mencapai 30% sehingga belum memenuhi persyaratan untuk dibakar yaitu <10%.
4. Pada sistem *frying* dibutuhkan suplai minyak bekas (*waste oil*) yang menerus. Hal ini akan menjadi kendala apabila diterapkan karena akan terjadi kompetisi dengan penggunaan minyak bekas sebagai media penggoreng makanan sehingga dapat menyebabkan harganya menjadi mahal.
5. Jenis peralatan sistem *frying* lebih kompleks dibandingkan kedua sistem yang lain.

KESIMPULAN

Proses pengeringan sampah bertujuan untuk memperbaiki karakteristik sampah antara lain kandungan air, kandungan karbon, kandungan hidrogen, kandungan sulfur dan nilai bakar. Hal ini berdampak terhadap kandungan komponen emisi gas buang sehingga sampah yang dikeringkan sebelum dibakar akan menghasilkan gas buang yang lebih ramah lingkungan. Pemilihan sistem pengeringan harus mempertimbangkan kecepatan pengeringan, kebutuhan energi dan kemudahan penerapan secara teknik. Pada penerapannya kebutuhan energi untuk pengeringan dapat menggunakan energi panas hasil pembakaran sampah.

DAFTAR PUSTAKA

- Caton, P.A., M.A. Carr, S.S. Kim dan M.J. Beautyman. 2010. Energy recovery from waste food by combustion or gasification with the potential for regenerative dehydration: A case study. *Energy Conversion and Management*, 51. p.1157–1169.
- Chen, G., P.L.Yue dan A.S. Mujumdar. 2002. Sludge dewatering and drying. *Drying Technology*. 20, pp.833- 916.
- Dofour, P. 2006. Control engineering in drying technology: Review and trends. *Drying Technology* 24, pp. 889- 904.
- Farkas, B.E. dan L.J.Hubbard. 2000. Analysis of convective heat transfer during immersion frying. *Drying Technology* 18, pp.1269-1285.
- Frei, K.M, P.R.Stuart dan D.Cameron. 2004. Novel drying process using forced aeration through a porous biomass matrix. *Drying Technology* 22, pp. 1191- 1215.
- He, P., J.Tang, D. Zhang, Y.Zeng dan L.Sha. 2010. Release of volatile organic compounds during bio-drying of municipal solid waste. *Journal of Environmental Science* 22(5), pp. 752-759.
- Jenkins, B.M., L.L.Baxterr, T.R.Miles Jr. dan T.R.Miles. 1998. Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology* 54, pp.17 – 46.
- Jewell, W.J., Dandero, N.C., P.J.van Soest, R.T. Cummings, W.W.Vegeta dan R. Linkenheil. 1984. High temperature stabilization and moisture removal from animal waste for by-product recovery. Final Report for the Cooperative State Research Service, SEA/CR 616-15-168, USDA, Washington, DC, USA, p.169.
- Lee, C.C. dan S.D.Lin. 2007. Handbook of environmental engineering calculations. 2nd edition 39, Mc. Graw- Hill Companies.
- Ohm, T.I., J.Chae, J.Kim. H.Kim, dan S.Moon. 2009. A study on the dewatering of industrial waste sludge by fry-drying technology. *Journal of Hazardous Material* 168, pp 445-450.
- Peregrina, C., B.Rudolph, D.Vlecomtea dan P.Arlabosse. 2008. Immersion frying for thermal drying of sewage sludge: An economic assessment. *Journal of Environmental management* 86, pp 1587-1594.
- Prommas, R., P.Keangin dan P.Rattanadecho. 2010. Energy and exergy analysis in convective drying process of multi-layered porous. *International Communication in Heat and Mass Transfer* 37, pp. 1106-1114.
- Shin, M.S., H.S Kim; J.E Hong; D.S Jang dan T.I. Ohm . 2008. A study for drying of sewage sludge through immersion frying using used oil. *J.Korean Soc. Environ. Eng* 30, pp 694-699.
- Silva, D.P., V.Rudolf dan O.P.Taranto. 2005. The drying of sewage sludge by immersion frying. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 22, pp. 271-276.
- Vaxelaire, J., J.M.Bongiovanni, Mousques dan Puiggali. 2000. Thermal drying of residual sludge. *Wat. Res.* 34 (17), pp. 4318-4323.
- Velis, C.A., P.J.Longhurst, G.H.Drew, R.Smith dan S.J.T. Pollard. 2009. Biodrying for Mechanical-biological treatment of wastes: A review. *Bioresources Technology* 103, pp 2747-2761
- Zhang, D., P.He dan L.Shao. 2009. Potential gas emissions from of municipal solid waste by bio-drying. *Journal of Hazardous Material* 168. Pp. 1497- 1503.