

Artikel Review

Refuse Derived Fuel (RDF) dari Sampah Perkotaan dengan Proses Biodrying: Review

Mochammad Chaerul^{*}, Annisa Kusuma Wardhani¹

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesha No. 10, Bandung 40132 Indonesia.

* Penulis korespondensi, e-mail: m.chaerul@ftsl.itb.ac.id

Abstrak

Pemanfaatan sampah sebagai bahan bakar atau *Refuse Derived Fuel* (RDF) menjadi salah satu opsi permasalahan sampah perkotaan. Terdapat berbagai macam proses yang dapat diaplikasikan untuk menghasilkan RDF, diantaranya melalui *biodrying*. *Biodrying* merupakan salah satu bagian dari teknologi *Mechanical-Biological Treatment* (MBT) yang bertujuan untuk mengurangi kadar air sampah dengan memanfaatkan panas yang dihasilkan dari aktifitas mikroorganisme dalam mendegradasi materi organik sehingga diharapkan terjadi peningkatan nilai kalor. Paper ini menyajikan *review* dari berbagai penelitian *biodrying* yang telah dipublikasikan di jurnal ilmiah, sehingga diharapkan dapat dijadikan salah satu acuan dalam penelitian *biodrying* lebih lanjut yang disesuaikan dengan karakteristik sampah di Indonesia. *Review* dilakukan terhadap hal-hal penting dalam penelitian *biodrying*, diantaranya prinsip operasi, konfigurasi desain reaktor, parameter yang dipantau, serta karakteristik baik umpan maupun produk.

Kata Kunci: *biodrying*, *Refuse Derived Fuel*, sampah perkotaan, *review*

Abstract

Utilization of waste into fuel (Refuse Derived Fuel, RDF) is an alternative to overcome the problem of municipal solid waste (MSW). Many processes can be applied to produce RDF including through biodrying process. Biodrying is a part of Mechanical-Biological Treatment (MBT) aiming to reduce water content in the waste by utilizing heat generated from microorganism activities while degrading organic matter in the waste, thus the calorific value will increase. The paper aims to make a review from various research paper on biodrying process published in scientific journals, so it becomes one of reference on further research on biodrying process by considering the characteristics of waste in Indonesia. Review has been conducted by focusing on several important aspects on the research such as operation principle, reactor design configuration, parameters to be examined, and the characteristics of feed and product.

Keywords: *biodrying*, *municipal solid waste*, *Refuse Derived Fuel*, *review*

1. Pendahuluan

Di negara-negara berkembang, permasalahan urbanisasi menjadi salah satu penyebab terjadinya peningkatan timbulan sampah perkotaan. Umumnya proporsi sampah terbesar itu yaitu sampah makanan dimana mengandung kadar air yang tinggi (Zhang dkk., 2008). Untuk menyelesaikan permasalahan persampahan, terdapat inovasi teknologi pengolahan sampah salah satunya adalah

biodrying. *Biodrying* atau *biological drying* merupakan reaktor biokonversi dari *Mechanical-Biological Treatment* (MBT) yang dapat dijadikan sebagai alternatif solusi untuk sampah-sampah yang tercampur dimana proses tersebut akan menyisihkan air dengan aktivitas mikroorganisme (Choi dkk., 2001; Velis dkk., 2009). MBT merupakan perpaduan antara operasi mekanis dan biologis yang bergantung pada karakteristik dari sampah tersebut (Garg dkk., 2009). Pada *biodrying*, sampah dapat dijadikan sumber energi (Sugni dkk., 2005). Selama proses berlangsung, evaporasi terjadi akibat adanya degradasi dari zat organik. Saat rasio perbandingan antara kadar air dan organik *biodegradable* tinggi, biodegradasi akan menghasilkan panas yang tidak cukup untuk melakukan evaporasi (D. Zhang dkk., 2008). Produk yang dihasilkan dari proses *biodrying* ini yaitu *Refuse Derived Fuel* (RDF) atau *Solid Recovered Fuel* (SRF) dimana terdapat potensi *recovery* termal akibat penyisihan kadar air yang besar (Rada dkk., 2007b). Dengan mengkonversi energi menjadi limbah terdapat dua tujuan yang dapat diperoleh yaitu dapat sebagai suplemen atau pengganti bahan bakar fosil konvensional serta penimbunan sampah di *landfill* dapat berkurang (Garg dkk., 2009).

Sebagai teknologi yang relatif baru di Indonesia, maka dirasakan perlu untuk melakukan review dari berbagai macam penelitian terkait teknologi pemanfaatan sampah menjadi RDF melalui proses *biodrying*. Review terutama dilakukan terhadap paper-paper ilmiah yang telah dipublikasikan di berbagai jurnal, terutama jurnal internasional. Paper ini juga bertujuan menjadi salah satu acuan dalam pengembangan penelitian lebih lanjut terkait proses *biodrying*, terutama yang digunakan untuk pemanfaatan sampah organik perkotaan di Indonesia.

2. *Refuse Derived Fuel*

Refuse Derived Fuel (RDF) merupakan bahan bakar alternatif yang berasal dari proses mekanis dengan bahan baku sampah perkotaan yang tercampur dimana sampah yang *non-combustible* disisihkan untuk menghasilkan campuran yang homogen. Secara umum sistem RDF memiliki dua fungsi yaitu produksi dan pembakaran. Pada proses produksi, sampah yang dapat didaurulang seperti kaca dan besi disisihkan terlebih dulu sehingga tidak masuk ke tahapan produksi RDF. Sedangkan sampah jenis lain seperti sampah organik, kertas, dan plastik dapat digunakan sebagai bahan baku dan dicacah untuk mereduksi ukuran yang selanjutnya diolah untuk menghasilkan produk RDF seperti *fluff* atau pellet. Sampah yang paling tepat untuk produksi RDF yaitu memiliki kandungan karbon tinggi setelah dipisahkan dari sampah yang dapat didaurulang. Sistem RDF dibagi menjadi dua yaitu (Kumar, 2016):

a. *Shred and burn system*

Sistem ini merupakan sistem paling sederhana dimana pengolahan minimal sampah yang belum diproses telah dilakukan seperti penyisihan besi. Pada sistem ini, tidak terdapat ketentuan untuk menyisihkan sampah yang tidak mudah terbakar. Selanjutnya sampah dipotong sesuai dengan ukuran partikel yang dipersyaratkan dan dilanjutkan pada proses pembakaran

b. *Simplified process system*

Jenis sistem ini dilakukan dengan memisahkan sampah-sampah yang tidak mudah terbakar, dapat didaurulang, dan material besi dari sampah campuran. Selanjutnya sampah dimasukkan pada *shedder* untuk menghomogenkan ukuran dari sampah tersebut yaitu 10-15 cm untuk mengoptimalkan *energy recovery* selama proses pembakaran berlangsung.

Berdasarkan European Commission – Directorate General Environment (2003), standar kualitas RDF berdasarkan sumbernya ditunjukkan pada Tabel 1 berikut. Sedangkan standar kriteria RDF secara umum ditunjukkan pada tabel 2 berikut.

Tabel 1. Standar Kualitas RDF Berdasarkan Sumber

Parameter	Satuan	Sampah Komersial	Sampah Konstruksi	Sampah Rumah Tangga
Lower Heating Value (LHV)	MJ/kg	16-20	14-15	13-16
	MWh/t	4,4-5,6	3,8-4,2	3,6-4,4
Kandung Energi Tahunan	GWh/thn	530	285-315	360-440
Kadar Air	w-%	10-20	15-25	25-35
Abu	w-%	5-7	1-5	5-10
Sulfur	w-%	<0,1	<0,1	0,1-0,2
Klorine	w-%	<0,1-0,2	<0,1	0,3-1,0
Properti Penyimpanan	-	Baik	Baik	Baik dalam bentuk pellet atau baled

Sumber: European Comission - Directorate General Environment (2003)

Tabel 2. Kriteria RDF

Parameter	Unit	Finlandia	Italia	Britania Raya	Indonesia	Thailand
Nilai Kalor	mJ/kg	13-16	15	18,7	12,5	N/A
Kadar Air	%wet	25-35	< 25	7-28	< 20	< 30
Abu	%we	5-10	20	12	N/A	N/A
Ukuran	Mm	N/A	N/A	N/A	≤ 50	< 30

Sumber: Paramita dkk., (2018)

3. Biodrying

Biodrying (biological drying) yaitu pengolahan *mechanical-biological treatment* (MBT) yang mendekomposisi secara aerobik untuk mengeringkan dan sebagian menstabilkan sampah (Mendoza dkk., 2013). Teknik pengeringan sampah ini bergantung pada aktivitas biologi dari mikroorganisme (bakteri dan fungi) untuk mengurangi kadar air dengan meningkatkan nilai kalor (meningkat berkisar 30-40%) sampah dengan kadar air yang tinggi dapat ditransformasikan menjadi bahan bakar padat yang dapat digunakan di masa yang akan datang (Adani dkk., 2002; Sadaka dkk., 2010; Tom dkk., 2016). Bahan bakar tersebut biasa dikenal dengan *Refuse Derived Fuel* (RDF) dimana keuntungan utamanya yaitu sebagai penambahan kandungan biogenik pada sampah input, menghasilkan CO₂ netral, dan sebagai energi alternatif (Velis dkk., 2009). Berbeda dengan komposting, *biodrying* memerlukan waktu yang pendek yaitu berkisar 2-3 minggu (Sadaka dkk., 2010). Selain itu, pada *biodrying* membantu untuk menurunkan kadar air dari sampah perkotaan dan degradasi organik yang terjadi seminimal mungkin sehingga dapat mempertahankan *heating value*. Sedangkan pada komposting dilakukan degradasi organik sebanyak mungkin untuk biostabilisasi sepenuhnya yang bertujuan agar dapat memproduksi humus guna meningkatkan kualitas tanah (Yang dkk., 2017).

Biodrying biasanya dilakukan dengan proses aerob. Prinsip dari proses ini yaitu mendorong terjadinya evaporasi dengan memanfaatkan panas yang dihasilkan dari proses degradasi zat organik (Zhang dkk., 2008). Keuntungan dari proses *biodrying* adalah mengurangi massa sampah dan emisi CH₄, CO₂, SO₂, NO_x, serta emisi debu dari *landfill* sampah ke atmosfer (Tom dkk., 2016). Penelitian *biodrying* dengan menggunakan bahan baku sampah perkotaan telah cukup banyak dilakukan dan rekapitulasi paper ilmiah yang direview dalam paper ini ditunjukkan pada Tabel 3 berikut.

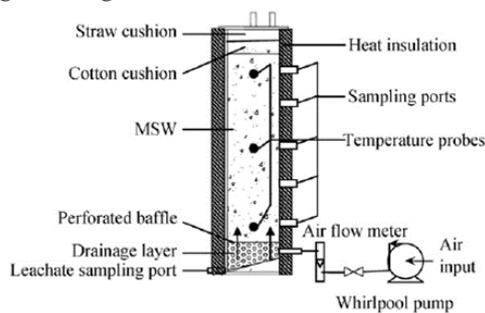
Tabel 3. Rekapitulasi Penelitian *Biodrying* dengan Sampah Perkotaan

Judul	Sumber
<i>The influence of biomass temperature on biostabilization-biodrying of municipal solid waste</i>	Adani dkk., (2002)
<i>Biostabilization-biodrying of municipal solid waste by inverting air-flow</i>	Sugni dkk., (2005)
<i>Lower Heating Value Dynamics during Municipal Solid Waste Bio-Drying</i>	Rada dkk., (2007)
<i>Biodrying of municipal solid waste with high water content by combined hydrolytic-aerobic technology</i>	D.-Q. Zhang dkk., (2008)
<i>Sorting efficiency and combustion properties of municipal solid waste</i>	Zhang dkk., (2009)

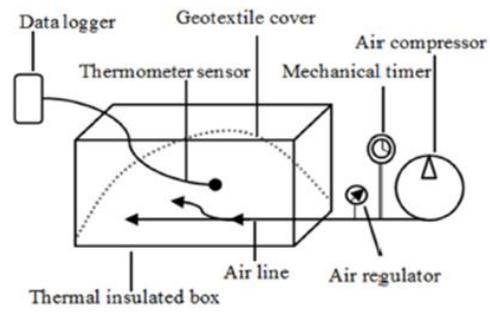
Judul	Sumber
during bio-drying	
<i>Autothermal biodrying of municipal solid waste with high moisture content</i>	Zawadzka dkk., (2009)
<i>Release of volatile organic compounds during bio-drying</i>	He dkk., (2010)
<i>Biodrying of Organic Fraction of Municipal Solid Wastes</i>	Zawadzka dkk., (2010)
<i>Bio-drying and Size Sorting of Municipal Solid Waste with High Water Content for Improving Energy Recovery</i>	Shao dkk., (2010)
<i>The effect of bio-drying pretreatment on Heating Values of Municipal Solid Waste</i>	Shuqing dkk., (2014)
<i>Influence of Aeration Modes of Aerobic Bio-Drying of Municipal Solid Waste</i>	Zhang dkk., (2014)
<i>Biodrying for municipal solid waste: Volume and weight reduction</i>	Bilgin dan Tulun, (2015)
<i>Biodrying of municipal solid waste under different ventilation modes: drying efficiency and aqueous pollution</i>	Shao dkk., (2015)
<i>Biodrying of municipal solid waste under different ventilation periods</i>	Jalil dkk., (2016)
<i>Biodrying process: A sustainable technology for treatment of municipal solid waste with high moisture content</i>	Tom dkk., (2016)
<i>Biodrying Process Efficiency: - Significance of Reactor Matrix</i>	Tom dkk., (2016)
<i>Effects of Adding Bulking Agents on Biostabilization and Drying of Municipal Solid Waste</i>	Yuan dkk., (2017)
<i>Effects of the Aeration Pattern, Aeration Rate, and Turning Frequency on Municipal Solid Waste Biodrying Performance</i>	Yuan dkk., (2018)

4. Reaktor Biodrying

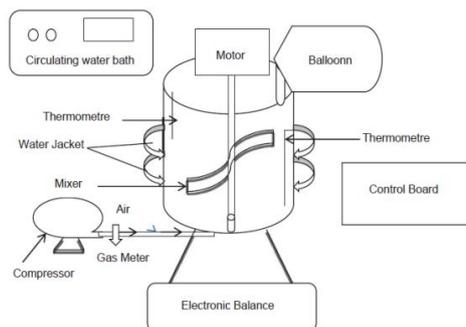
Proses *biodrying* telah diaplikasikan di berbagai negara dalam pengolahan sampah perkotaan dengan berbagai variasi reaktor yang dirancang yang ditunjukkan pada Gambar 1 dan Tabel 4 berikut sebagai konfigurasi reaktor.



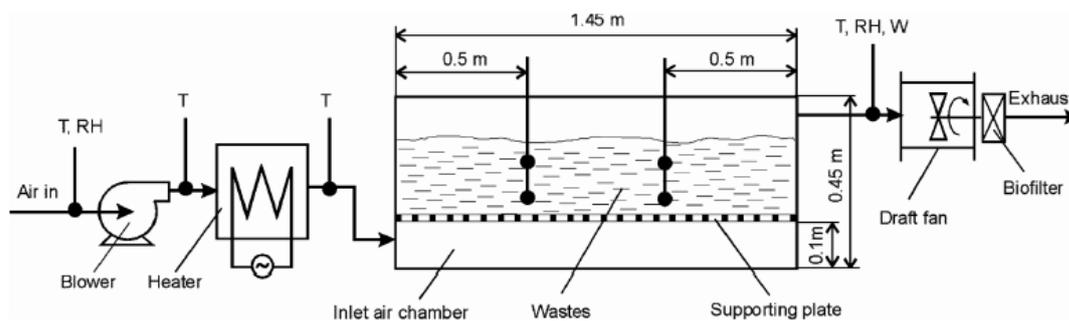
a. Reaktor *Biodrying* Silinder Kolom



b. Reaktor *Biodrying* Kotak



c. Reaktor *Biodrying* Drum dengan Pengaduk



d. Reaktor Biodrying Horizontal Tubular

Gambar 1. Perancangan Reaktor Biodrying

Sumber: Bilgin dan Tulun, (2015); Jalil dkk., (2016); Zawadzka dkk., (2010); D.-Q. Zhang dkk., (2008)

Tabel 4. Konfigurasi Reaktor Biodrying

No	Desain Reaktor			Aliran Udara	Berat Sampah	Waktu	Komposisi Sampah Perkotaan	Sumber
	Bahan	Ukuran	Isolasi Panas					
1	PVC Plastik	Silinder $\varnothing_{in} = 400$ mm H = 1200 mm	Dinding luar: kapas tebal 100 mm Lapisan atas: bantalan kapas dan jerami	$0,45\text{m}^3/\text{kg}_{\text{wet}} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{jam}$ (intermitten : 2) kali/hari x 4 hari, 6 kali/hari x 4 hari, 10 kali/hari x 4 hari, 6 kali/hari x 6 hari, dan 10 kali/hari x 6 hari)	32 kg	16 hari	60% (W/W) sampah dapur, 23% (W/W) sampah kertas, 11% (W/W) sampah plastik, dan 6% (W/W) sampah lainnya	D.-Q. Zhang dkk., 2008
2	PVC Plastik	Silinder H= 600 mm $\varnothing_{in} = 486$ mm, $\varnothing_{out} = 600$ mm	Busa Polyurethane ketebalan = 57 mm	200 l/jam (kontinyu)	300 kg	200 jam	TPA Sampah Perkotaan di Giussago, Pavia, Italia	Sugni dkk., 2005
3	HDPE	Horizontal Tubular, volume= $0,24 \text{ m}^3$	Busa Polyurethane = 60 mm	$86,35 \text{ m}^3/\text{jam}$ (beroperasi hanya 3 jam awal saja)	22-29 kg	10 hari	44% w/w sayuran, 30% w/w buah-buahan, dan 25% w/w biomaterial lainnya (teh, kopi, nasi, pasta)	Zawadzka dkk., 2010
4	PVC Plastik	Silinder H= 600 mm $\varnothing_{in} = 486$ mm, $\varnothing_{out} = 600$ mm	Busa Polyurethane ketebalan = 57 mm	$86,35 \text{ m}^3/\text{jam}$ (beroperasi pada awal saja)	25 kg	17 hari	44% w/w sayuran, 30% w/w buah-buahan, dan 25% w/w biomaterial lainnya (teh, kopi, nasi, pasta)	Zawadzka dkk., 2009
5	Vertikal Stainless-steel	Kotak p = 18 cm l = 18 cm h = 36 cm	Busa Polyurethane ketebalan = 20 mm	50 L/jam (kontinyu)	3 kg	13 hari	52,9% organik, 12,31% kertas, 4,38% kaca-botol, 2,89% tin box-logam, 2,06% karton, 12,47% plastik, 1,76% kemasan, 6,5% tekstil, 4,65% lainnya	Bilgin dan Tulun, 2015
6	HDPE	Kotak, kapasitas 50 L	Dinding Dalam: Polyurethane Dinding Luar: Polypropylene	$0,005 \text{ m}^3/\text{kg}_{\text{drywaste}} \cdot \text{jam}$ (intermitten : 5 – 30 menit running/3 jam stop)	12 kg	14 hari	47% sampah makanan, 15% kertas, 14% plastik, 3% kaca, 4% logam, 3% tekstil, kayu 4%, kulit/karet	Jalil dkk., 2016

No	Desain Reaktor			Aliran Udara	Berat Sampah	Waktu	Komposisi Sampah Perkotaan	Sumber
	Bahan	Ukuran	Isolasi Panas					
7	Stainless steel	Silinder, kapasitas 60 L, ukuran tinggi 0,6 m dan diameter dalam 0,36 m	Geotextile -	0,2-0,6 L/kg DM min	30 kg	18 hari	1%, dan lainnya 9% 62,75% sampah dapur, 21,67% kertas, 8,74% plastik, dan 6,84% lainnya	Yuan dkk., 2018

5. Pola Aerasi

Aerasi menjadi salah satu kunci utama dalam operasi *biodrying* dimana dapat menyisihkan uap air dengan mempertahankan panas selama proses berlangsung (Yuan dkk., 2018). Secara umum, terdapat dua jenis pola aerasi yaitu kontinyu dan *intermittent*. Pada aerasi kontinyu dapat mempercepat proses pengeringan namun biaya dalam menjalankan proses tersebut lebih tinggi dibanding bila pola aerasi *intermittent* atau *batch* saja (Pang dkk., 2019).

Pada penelitian Shao dkk., (2015) menunjukkan bahwa rasio kehilangan air dengan *volatile solid* pada pola aerasi kontinyu sebesar 5,93 dimana lebih besar dibanding pola aerasi *intermittent* yaitu sebesar 5,35. Hal ini menunjukkan bahwa efisiensi *biodrying* dengan pola aerasi kontinyu lebih tinggi dibanding pola aerasi *intermittent*. Pada penelitian Yuan dkk., (2018) menunjukkan hasil yang sama dimana pola aerasi kontinyu menghasilkan penyisihan kadar air yang lebih tinggi yaitu sebesar 66,01%. Penelitian Zhang dkk (2014), menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda dimana pola aerasi kontinyu dapat menyisihkan kadar air yang tinggi yaitu sebesar 53,3%.

6. Parameter *Biodrying* yang Diukur

Beberapa penelitian dengan menggunakan reaktor *biodrying* dalam skala laboratorium, menunjukkan hasil produk yang bervariasi. Tabel 5 berikut menunjukkan karakteristik umpan dan produk setelah dilakukannya proses *biodrying*.

Tabel 5. Hasil Penelitian Reaktor *Biodrying* Skala Laboratorium

No	Suhu	Kadar Air		Volatile Solid		Nilai Kalor		Sumber
		Awal	Akhir	Awal	Akhir	Awal	Akhir	
1	20-70°C	72%	50,5%-62,4%	-	-	-	-	D.-Q. Zhang dkk., 2008
2	31-46°C	247-419 g/kgw.w	120-229 g/kg w.w	5,1±0,15a-7,8±0,5a kg	3,9±0,36a-7,9±0,35a kg	14525±628a-14559±313b kJ/kg	12390±820a-16279±427b kJ/kg	Sugni dkk., 2005
3	14-53°C	0,807-0,843 kg _{H₂O} /kg _{T_{aw}} waste	0,330-0,533 kg _{H₂O} /kg _{T_{aw}} waste	-	-	6750-8050 kJ/kg	10980-12280 kJ/kg	Zawadzka dkk., 2010
4	24-56°C	822-849 g/kg	436-454 g/kg	-	-	-	14,84-14,85 kJ/g	Zawadzka dkk., 2009
5	30-50°C	48,75%-50,00%	4,50%-19,00%	-	-	-	4685 kcal/kg	Bilgin dan Tulun, 2015
6	23,1-58,8°C	62,31±4,64%-67,96±0,44%	11,91±1,48%-33,91±2,24%	-	-	-	-	Jalil dkk., 2016
7	20-70°C	71,47%	33,25%-54,04%	80,91%	61,40%-67,4%	2422 kJ/kg	3165-9440 kJ/kg	Yuan dkk., 2018

6.1 Suhu

Suhu menjadi kunci yang penting dalam evaporasi air dan degradasi organik selama proses *biodrying* berlangsung (Zhang dkk., 2008). Pemanasan secara alami pada sampah perkotaan terjadi secara efektif pada proses *biodrying* untuk mencegah kondisi septik pada sampah sehingga dapat mempertahankan sampah dalam waktu yang lama tanpa adanya bau yang dihasilkan (Tom dkk., 2016c). Suhu diatur oleh adanya laju aliran udara untuk menghindari sterilisasi massa yang dapat menurunkan aktifitas biologi (Rada dkk., 2007a). Laju aerasi yang lebih tinggi mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk memasuki fase stabilisasi dan meningkatkan panjangnya fase stabilisasi. Laju aerasi dan frekuensi pembalikan yang tinggi akan meningkatkan kehilangan panas dengan meningkatkan konveksi permukaan antara campuran dan gas *biodrying*. Laju aerasi rendah akan meningkatkan panas yang lebih sehingga tersedia degradasi organik dengan aerasi yang sesuai. Dengan demikian, laju aerasi yang rendah dapat menyimpan energi lebih. Suhu mengatur penguapan air dan ventilasi menentukan jumlah kadar air yang hilang selama proses *biodrying* (Yuan dkk., 2018).

Pada prosesnya, umumnya suhu meningkat pada minggu pertama dan kemudian menurun menuju suhu ambien. Suhu bergantung pada aktivitas mikroorganisme pada reaktor *biodrying*. Suhu yang lebih mudah diaplikasikan pada proses *biodrying* yaitu pada rentang 30°C – 45°C. Terlalu tinggi suhu dan terlalu rendah suhu dapat memperlambat proses *drying*. Pertumbuhan mikroorganisme yang layak untuk proses *biodrying* yaitu pada rentang 40°C-70°C dan membutuhkan sistem aerasi yang layak pada desain *biodrying* untuk menjaga suhu di dalam reaktor (Jalil dkk., 2016). Penurunan suhu juga menunjukkan pada kondisi ini aerasi yang tinggi dapat meningkatkan kehilangan panas dan mencegah aktifitas mikroba (Bilgin dan Tulun, 2015). Dalam suatu reaktor *biodrying*, suhu pada lapisan atas lebih rendah dibanding lapisan lebih bawah karena proses evaporasi lebih dominan terjadi di lapisan atas. Perbedaan suhu antara lapisan bawah dan atas yaitu 2-15°C, umumnya setelah 4-5 hari proses berlangsung (Zawadzka dkk., 2010). Maka dari itu diperlukan proses pembalikan seperti penelitian Sugni dkk (2005), dimana terdapat proses pembalikan sehingga sampah di dalam reaktor tersebut dapat membuat tren suhu rata-rata menjadi sama.

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut maka (Reis dkk., 2019):

- a. Proses *biodrying* dibagi menjadi empat tahapan yaitu fase peningkatan suhu, fase termofilik, fase peningkatan suhu tahap dua, dan fase pendinginan
- b. Proses aerasi yang terjadi di dalam reaktor di dalamnya terdapat air yang ditambahkan ke dalam proses akibat dari udara yang diinjeksikan. Maka semakin tinggi aerasi, semakin besar air dari kelembaban udara yang ditambahkan
- c. Pada awal proses *biodrying* berlangsung, udara yang dibutuhkan rendah (pada fase peningkatan suhu dan termofilik), selanjutnya dibutuhkan pembalikan dan volume udara yang lebih besar ketika suhu menurun (pada fase peningkatan suhu kedua), ketika terjadi peningkatan dan kemudian terjadi penurunan, maka proses *biodrying* selesai dan laju udara yang rendah menghasilkan kadar air yang lebih rendah
- d. Proses pemanasan pada *biodrying* terjadi akibat adanya aktifitas biologis yang menghasilkan energi untuk memecahkan ikatan permukaan air dan menghasilkan uap air sehingga lebih mudah untuk disisihkan akibat adanya aerasi dibandingkan ketika tidak terjadi aktifitas biologis.

6.2 Kadar Air

Kadar air sebagai salah satu parameter kunci yang berdampak baik pada kadar karbon biogenik dan efektif pada *heating value* dari sampah yang mudah terbakar. Kadar air berada diantara rentang 8,59% dan 50,93% dimana pada kondisi ekstrim yaitu 91,48% dan 0,94% untuk biogenik (sampah makanan) dan non-biogenik. Sampah makanan memiliki kadar air paling tinggi dibanding jenis sampah lainnya (Mohammed dkk., 2018). Dalam melakukan degradasi materi organik, mikroorganisme

mebutuhkan kadar air dan oksigen hingga yang melewati *pile* hingga pada suatu saat akan mencapai titik saturasi konsentrasi air dan oksigen di *pile* tersebut (Sugni dkk., 2005). Kehilangan air tergantung pada total volume aerasi, pola aerasi berbeda menyebabkan kehilangan air sedikit pada total volume aerasi konstan (Yuan dkk., 2017). Hubungan antara kadar air dan nilai kalor, semakin rendah kadar air maka semakin tinggi nilai kalor (Mohammed dkk., 2018).

Penyisihan kadar air terjadi akibat dua tahapan yaitu larutan air menguap dari permukaan biomasa ke *sublayer* dari aliran udara melalui pori-pori *bed*, kemudian uap air terbawa dari sekitar permukaan massa sampah dengan *bulk of convective air stream*. Pada awal proses biodrying, kelembaban dari udara gas buang meningkat menuju maksimum dan secara bertahap menurun. Proses ini akibat panas secara biologi terbawa dengan aliran udara. Tingginya laju aliran udara dapat meningkatkan persentase penyisihan air. Tetapi laju aliran rendah dapat meningkatkan suhu untuk proses *biodrying* (Zawadzka dkk., 2010). Selain itu, kadar air yang rendah dapat membatasi degradasi zat organik yang menghasilkan panas. Pada prosesnya terdapat fermentasi aerob dimana struktur sel dari biomassa sampah hancur dan *field water-holding capacity* menurun, sehingga sedikit air dihasilkan dari sampah. Banyak kehilangan air akibat evaporasi konvektif. Setelah tiga hari pertama, kadar air berubah sedikit. Saat proses ini terjadi *heating phase* dan mikroorganisme berada pada *lag phase*. Dengan demikian, reaksi biologi tidak aktif, panas eksotermal lebih rendah, dan banyak air terbawa oleh evaporasi konvektif (Shuqing dkk., 2014).

6.3 Volatil Solid (VS)

Pada proses *biodrying*, konsumsi *volatile solid* (VS) menjadi penting dimana tujuan utama dari *biodrying* yaitu mengurangi biodegradasi untuk diperoleh nilai kalor gross pada matriks sampah (Huilinir dan Villegas, 2014). Nilai VS sebagai parameter penentu biodegradasi dimana diharapkan terjadi pembatasan biodegradasi dapat mempertahankan nilai kalor (Sugni dkk., 2005). Parameter ini bergantung pada kadar air dimana apabila kadar air akan terjadi fenomena eksotermik yang dapat memperlambat proses biologis (Rada dkk., 2007). Tujuan *biodrying* yaitu untuk menyisihkan kadar air dalam jumlah banyak dengan sedikit degradasi VS (Shao dkk., 2015). VS awal yaitu 80,91% dan setelah 18 hari terjadi penurunan VS (*volatile solid*) menjadi 61,40% - 67,40%. Kehilangan VS yaitu 0,28-0,34 kg/kg, laju degradasi VS yaitu 34,72%-41,45%. Peningkatan laju aerasi atau perubahan pola aerasi dan frekuensi pembalikan memiliki pengaruh rendah pada degradasi VS pada rasio campuran bahan baku konstan (C/N rasio). Suhu yang tinggi disebabkan oleh degradasi dari komponen yang dapat dengan mudah didegradasi. Frekuensi pembalikan lebih tinggi akan membuat material tersebut kontak dengan O₂.

Laju aerasi tinggi dapat menyebabkan panas dan kadar air hilang dengan sangat cepat yang dapat berpengaruh pada degradasi mikroba dari zat organik (Yuan dkk., 2018). Perbedaan antara dua kurva yang menurun selama proses merupakan hasil dari konversi progresif dari *volatile solid* yang biodegradable dan penurunan progresif pada kelembaban masa (akibat dari fenomena eksotermik dari *biodrying* yang melambatkan proses biologi) (Rada dkk., 2007a).

6.4 Nilai Kalor

Nilai kalor yaitu *High Heating Value* (HHV) dan *Low Heating Value* (LHV). Pada HHV keberadaan air dan hidrogen setelah pembakaran terjadi adalah pada keadaan terkondensasi pada produk. Sedangkan pada LHV yaitu nilai kalo yang diasumsikan air dan hidrogen berada pada fasa uap. Kalor yang dibutuhkan pada proses penguapan tersebut akan menjadikan nilai kalor lebih rendah daripada LHV (Novita dan Damanhuri, 2010).

Gross calorific value yaitu perbandingan antara kuantitas panas yang dihasilkan pada kondisi bahan sampel telah dilakukan insinerasi serta massa dari suatu sample. Nilai tersebut umumnya diindikasikan sebagai nilai kalor untuk zat yang kering (kJ kg TS⁻¹) serta disebabkan oleh adanya proses biodegradasi zat organik. Sedangkan *net calorific value* disebabkan oleh penguapan panas dari air akibat

proses pembakaran. Berbeda dengan *calorific value*, kandungan energi bergantung pada sampel yang masih basah yang dapat dilihat dari kadar air pada sampel tersebut.

Kandungan energi dari sampel tersebut meningkat dikarenakan adanya proses biodegradasi dimana terjadi penurunan kadar air, sehingga meningkatkan *total solid* (Adani dkk., 2002). Teori tersebut dibuktikan dengan penelitian Mohammed dkk.,(2018) dimana terdapat korelasi positif antara nilai kalor dan *biogenic content* dimana jumlah sampah makanan sebagai *biogenic content* memiliki kadar air awal yang tinggi. Setelah 18 hari, LHV dari tiga percobaan meningkat rata-rata 168%, mencapai 14801 kJ/kg dan 15760 kJ/kg. Produk dapat digunakan sebagai SRF (Shuqing dkk., 2014).

6.5 Penurunan Massa dan Volume

Penurunan massa dan volume diharapkan terjadi pada proses *biodrying berlangsung* untuk dapat dilakukan penyimpanan jangka pendek serta mempermudah pemindahan (He dkk., 2013) Penurunan massa linier dengan penurunan kadar air dikarenakan massa sangat bergantung pada kadar air dalam material tersebut serta degradasi parsial dari zat organik (Jalil dkk., 2016). Penurunan berat akibat adanya konversi dari sebagian volatile solid (pada penelitian ini yaitu c, h, o, n) dan evaporasi dari sebagian kelembaban. Penurunan berat ($\Delta m = \text{konsumsi volatile solid} + \text{ekstraksi kelembaban}$) signifikan, 2 minggu pertama 26%, 2 minggu selanjutnya 29% (Rada dkk., 2007a). Penurunan berat terjadi selama 20 hari yaitu 37 kg, dengan penurunan 1,85 kg/hari. Akumulasi penurunan berat yaitu 33,94% dimana kurang dari penurunan evaporasi aktual dikarenakan tingginya tingkat kondensasi evaporasi pada reaktor. Sedangkan terjadi penurunan volume sebesar 56,5% dari 0,39 m³ menjadi 0,169 m³. Maksimum volume reduksi yaitu 40% dicapai pada hari ke-20 (Tom dkk., 2016c).

6.6 Konsentrasi O₂

Selama fase hidrolisis, konsentrasi O₂ tersedia pada tingkat rendah (<5%, V/V) dikarenakan input udara lebih rendah dibanding yang dibutuhkan untuk degradasi aerob pada tahap hidrolisis. Selama proses aerob, rata-rata konsentrasi O₂ konsisten melebihi 10% (V/V). Dengan demikian, kondisi aerob disarankan untuk dijaga pada tahap ini. Konsentrasi O₂ rata-rata mengindikasikan laju degradasi organik oleh mikroorganisme aerob dibawah frekuensi ventilasi yang diberikan dan laju udara, sampai batas tertentu. Semakin tinggi frekuensi ventilasi selama tahap hidrolitik, semakin tinggi konsentrasi O₂ selama tahap aerob selanjutnya. Konsentrasi O₂ dapat diperoleh lebih tinggi dengan memperpanjang rentang tahapan hidrolitik (D. Zhang dkk., 2008).

6.7 Aktivitas Enzim Ekstraseluler

Peningkatan suhu secara cepat selama tahapan tersebut dapat menggantikan mikroorganisme dominan dan fluktuasi resultan dari aktivitas enzim ekstraseluler. Enzim ekstraseluler memiliki peran yang penting dalam tahap hidrolisis pada senyawa organik. Evolusi aktivitas enzim ekstraseluler konsisten dengan kehilangan organik. Apabila aktivitas enzim semakin tinggi maka kehilangan organik selama proses *biodrying* berlangsung semakin tinggi. Dengan demikian, frekuensi ventilasi dan rentang waktu sementara selama proses tahapan hidrolitik akan mengatur aktivitas enzim untuk meningkatkan performa *biodrying* untuk proses kombinasi (D. Zhang dkk., 2008).

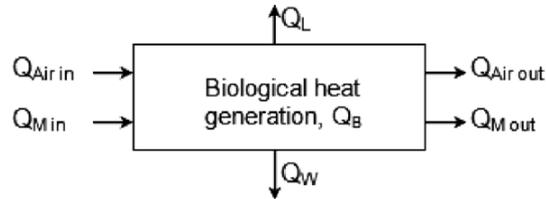
7. Modeling Biodrying

7.1 Keseimbangan Energi

Keseimbangan energi yang terjadi pada proses *biodrying* digambarkan pada Gambar 2. Pada Gambar 2, terdapat $Q_{Air\ in}$ yaitu energi yang berasal dari uap udara inlet, sedangkan $Q_{Air\ out}$ energi yang dihasilkan oleh uap udara outlet. $Q_{M\ in}$ yaitu energi yang diinputkan dari bahan baku biomassa dan $Q_{M\ out}$ yaitu energi yang dihasilkan oleh biomassa yang telah dikeringkan. Q_L merupakan kehilangan panas menuju udara ambien, Q_W yaitu jumlah energi outlet yang menghasilkan *leachate*, dan Q_B yaitu

panas secara biologis. Selama proses *biodrying* berlangsung, energi yang diinputkan terbatas yang terdiri dari $Q_{Air\ in}$ dan $Q_{M\ in}$. Sedangkan output yang dihasilkan yaitu $Q_{Air\ out}$, $Q_{M\ out}$, Q_L , dan Q_W . Q_B dihasilkan dari adanya aktifitas mikroorganisme sebagai hasil dari proses degradasi aerob dari zat organik. Persamaan kesetimbangan energi dapat dituliskan sebagai berikut (Zawadzka dkk., 2010):

$$\int_0^{\tau_{end}} Q_{Air\ in}(\tau)d\tau + Q_{M\ in} + Q_B = \int_0^{\tau_{end}} Q_{Air\ out}(\tau)d\tau + Q_{M\ out} + Q_L + Q_W \quad (1)$$



Gambar 2. Skema Energi Biodrying
 Sumber: Zawadzka dkk., (2010)

7.2 Efisiensi Biodrying

Efisiensi *biodrying* dapat dihitung berdasarkan kehilangan karbon dari *elemental analysis* pada awal dan akhir proses *biodrying* berlangsung (g/kg_{dry}) dan penyisihan air di massa *biodried* pada awal dan akhir proses (g/kg_{dry}). Berikut persamaan yang digunakan untuk menghitung efisiensi tersebut (Zawadzka dkk., 2010):

$$\eta = 1 - \frac{Total\ Carbon\ Loss}{Total\ Water\ Loss} \quad (2)$$

Pada penelitian Zawadzka dkk., (2010), efisiensi *biodrying* dengan menggunakan sampah perkotaan berada di rentang 0,73 hingga 0,97. Rentang ini bersesuaian dengan penelitian Navaee-Ardeh dkk., (2009) dimana umumnya proses efisiensi *biodrying* yaitu pada rentang 0,65 hingga 0,90. Nilai tersebut bermakna bahwa *biodrying* dapat dianggap sebagai teknologi yang tepat untuk sebagai bahan bakar alternatif yang berasal dari sampah biologis (biomassa). Apabila nilai efisiensi tinggi menunjukkan bahwa kandungan karbon pada sampah kering biologis nilainya hampir sama dengan nilai awal kandungan karbon pada bahan baku biomassa. Hal ini menunjukkan bahwa konversi karbon tidak signifikan akibat dari aktifitas mikroba.

7.3 Kinetika

Terdapat beberapa model yang digunakan dalam perhitungan produksi bioenergi yaitu model kinetika degradasi substrat orde satu, model degradasi monod, dan model persamaan degradasi substrat empiris. Umumnya dalam komposting, model degradasi monod digunakan untuk proses *biodegradable* guna simulasi proses degradasi aerob dan memprediksi kinetika panas yang diproduksi selama proses berlangsung. Namun untuk proses *biodrying* masih sangat sedikit penelitian yang menerapkan kinetika *biodrying*. Hingga saat ini, kinetika *biodrying* telah dilakukan studi oleh Huilindir dan Villegas (2014) untuk bahan baku dari *pulp and paper secondary sludge* serta Villegas dan Huilindir (2014) untuk *sewage sludge*, belum terdapat studi untuk *biodrying* dengan bahan baku sampah perkotaan. Secara teoritis, populasi mikroba (X_H) secara eksplisit diukur dengan model kinetika monod dimana *volatile solids* (VS) dibagi menjadi empat fraksi yaitu *rapidly biodegradable* (X_{rb}), *slowly biodegradable* (X_{sb}), *nonbiodegradable* (atau inert, X_I), dan *heterotrophic biomass* (X_H). *Heterotrophic biomass* mengkonsumsi *soluble substrate* (S_s) dimana terhidrolisis dari X_{rb} dan X_{sb} dengan reaksi yang terjadi yaitu reaksi eksotermis dan biomassa baru *rapidly biodegradable* dihasilkan yang memperoleh biomassa dari biomassa yang telah membusuk. Pada awal proses kinetika, pengaruh kadar air dan suhu dapat diperoleh dari persamaan berikut:

$$f^T = 1,066^{T-20} - 1,21^{T-60} \quad (3)$$

$$f^{Mc} = 1/(e^{7,0622-17,684f_{Mc}+1}) \quad (4)$$

Selain itu, model kinetika dapat diprediksi dengan degradasi padatan VS dengan memvariasikan laju aliran udara. Model ni berguna untuk mengetahui derajat biodgeradasi (Kumar dkk., 2019). Berikut ini beberapa model kinetika yang telah diterapkan di beberapa penelitian.

Tabel 6. Model-Model Kinetika

No.	Model Kinetika	Sumber
1	$k_T = k_0 \cdot (1,066^{T-20} - 1,21^{T-60}) \cdot \frac{1}{e^{7,0622-17,684 \cdot f_{MC}+1}} * \frac{1}{e^{3,4545-23,675 \cdot FAS.+1}}$	Haug, 1993
2	$k_T = k_{23} * a^{T-23}$	Haug, 1993
3	$k_T = a e^{(b \cdot T + c \cdot \frac{Mc}{T})}$	Kulcu dan Yaldiz, 2004
4	$k_T = \frac{a}{Mc \cdot (T - b)} e^{(c \cdot T - d \cdot \frac{Mc}{T})}$	Kulcu dan Yaldiz, 2004
	$k_T = e^{AFR-a} * k_{23} * b^{T-23}$	Kulcu dan Yaldiz, 2004
5	$k_T = a \cdot (b^{c \cdot T + d \cdot \frac{Mc}{T}})$	Huilinir dan Villegas, 2014
6	$k_T = a \cdot (T \cdot Mc + b) e^{c \cdot \frac{Mc}{T} + FAS * Mc}$	Huilinir dan Villegas, 2014

dimana

k_T = Konstanta laju reaksi (d^{-1})

T = Suhu proses ($T^{\circ}C$)

Mc = Kadar air harian material (% by weight)

f_{Mc} = Fraksi kadar air harian material

AFR = Laju aliran udara (L/min kg_{TS})

k_{23} = Konstanta kinetika pada suhu $23^{\circ}C$

FAS = Free Air Space dalam % ($FAS = -0,0922D_w + 101,84$; $D_w = bulk\ wet\ density, kg/m^3$)

a, b, c, d = Konstanta

8. Kesimpulan

Berdasarkan review terhadap penelitian-penelitian di atas, *biodrying* dapat digunakan untuk menurunkan kadar air pada sampah perkotaan, terutama pada sampah organik yang memiliki kadar air yang tinggi. Produk akhir yang diperoleh dari proses tersebut adalah *Refuse Derived Fuel* (RDF) yang dapat digunakan sebagai energi alternatif. Proses *biodrying* diharapkan waktu tinggalnya semakin rendah. Hingga saat ini, penelitian-penelitian yang direview menjelaskan bahwa proses *biodrying* akan berlangsung optimal selama 7-15 hari.

Selama proses berlangsung, diharapkan tidak terjadi kehilangan panas maupun terjadinya kondensasi sehingga diperlukan isolasi panas dan penutup yang dapat mencegah terjadinya kondisi tersebut. Bahan-bahan yang dapat digunakan yaitu busa *polyurethane* atau bantalan kapas dan jerami atau lapisan berpori seperti geotekstil. Parameter-parameter utama yang perlu diukur yaitu suhu, kadar air, dan nilai kalor. Terdapat beberapa parameter pendukung yang penting untuk diukur yaitu kadar VS, penurunan massa dan volume, konsentrasi O_2 , dan aktivitas enzim ekstraseluler. Hingga saat ini belum banyak penelitian yang melakukan modelling terhadap proses *biodrying*. Oleh karena itu, diperlukan modelling dalam *biodrying* seperti perhitungan kesetimbangan energi, efisiensi *biodrying*, dan kinetika. Perhitungan tersebut diharapkan dapat memperkuat analisis pada proses *biodrying* tersebut.

Daftar Pustaka

Adani, F., Baido, D., Calcaterra, E., Genevini, P., 2002. The influence of biomass temperature on

- biostabilization-biodrying of municipal solid waste. *Bioresour. Technol.* 83, 173–179.
- Bilgin, M., Tulun, S., 2015. Biodrying for Municipal Solid Waste: Volume and Weight Reduction. *Environ. Technol.* 36, 1691–1697.
- Choi, H.I., Richard, T.L., Ahn, H.K., 2001. Composting High Moisture Materials: Biodrying Poultry Manure in a Sequentially Fed Reactor. *Compost Sci. Util.* 9, 303–311.
- European Commission - Directorate General Environment, 2003. Refuse Derived Fuel, Current Practice and Perspectives (B4-3040/2000/306517/MAR/E3). Swindon.
- Garg, A., Smith, R., Hill, D., Longhurst, P.J., Pollard, S.J.T., Simms, N.J., 2009. An Integrated Appraisal of Energy Recovery Options in The United Kingdom using Solid Recovered Fuel Derived from Municipal Solid Waste. *Waste Manag.* 29, 2289–2297.
- Haug, R.T., 1993. *The Practical Handbook of Compost Engineering*, Second Edition. ed. CRC Press LLC, Florida.
- He, P., Tang, J., Zhang, D., Zeng, Y., Shao, L., 2010. Release of Volatile Organic Compounds During Biodrying of Municipal Solid Waste. *J. Environ. Sci.* 22, 752–759.
- He, P., Zhao, L., Zheng, W., Wu, D., Shao, L., 2013. Energy Balance of a Biodrying Process for Organic Wastes of High Moisture Content: A Review. *Dry. Technol.* 31, 132–145.
- Huilinir, C., Villegas, M., 2014. Biodrying of Pulp and Paper Secondary Sludge: Kinetics of volatile solid biodegradation. *Bioresour. Technol.* 157, 206–213.
- Jalil, N.A.A., Basri, H., Ahmad Basri, N.E., Abushammala, M.F.M., 2016. Biodrying of municipal solid waste under different ventilation periods. *Environ. Eng. Res.* 21, 145–151.
- Kulcu, R., Yaldiz, O., 2004. Determination of Aeration Rate and Kinetics of Composting Some Agricultural Wastes. *Bioresour. Technol.* 93, 49–57.
- Kumar, S., 2016. *Municipal Solid Waste Management in Developing Countries*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Kumar, S., Zhang, Z., Awasthi, M.K., Li, R., 2019. *Biological Processing of Solid Waste*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Mendoza, F.J.C., Prats, L.H., Martínez, F.R., Izquierdo, A.G., Guzmán, A.B.P., 2013. Effect of airflow on biodrying of gardening wastes in reactors. *J. Environ. Sci. (China)* 25, 865–872.
- Mohammed, M., Donkor, A., Ozbay, I., 2018. Bio-Drying of Biodegradable Waste for Use as Solid Fuel: A Sustainable Approach for Green Waste Management. *Agric. Waste Residues* 6, 89–104.
- Navae-Ardeh, S., Bertrand, F., Stuart, P.R., 2009. Modeling and Experimental Verification of A Novel Biodrying Process for Drying Pulp and Paper Sludge. In: *Proceedings of the 4th Inter-American Drying Conference*. Montreal, hal. 635–538.
- Novita, D.M., Damanhuri, E., 2010. Perhitungan Nilai Kalor Berdasarkan Komposisi dan Karakteristik Sampah Perkotaan di Indonesia dalam Konsep Waste to Energy. *J. Tek. Lingkung.* 16, 103–114.
- Pang, S., Bhattacharya, S., Yan, J., 2019. *Drying of Biomass, Biosolids, and Coal for Efficient Energy Supply and Environmental Benefits*. Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton.
- Paramita, W., Hartono, D.M., Soesilo, T.E.B., 2018. Sustainability of Refuse Derived Fuel Potential from Municipal Solid Waste for Cement's Alternative Fuel in Indonesia (A Case at Jeruklegi Landfill, in Cilacap). In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. hal. 1–6.
- Rada, E.C., Franzinelli, A., Taiss, M., Ragazzi, M., Panaitescu, V., Apostol, T., 2007a. Lower Heating Value Dynamics during Municipal Solid Waste Bio-Drying. *Environ. Technol.* 28, 463–469.
- Rada, E.C., Ragazzi, M., Apostol, T., Panaitescu, V., 2007b. Critical Analysis of High Moisture MSW Biodrying: The Romanian Case Study. In: *International Symposium MBT 2007*. Hanover, Germany, hal. 44–551.
- Reis, R.F. dos, Cordeiro, J.S., Font, X., Achon, C.L., 2019. the biodrying process of sewage sludge - a review. *Dry. Technol.* 1, 1–15.
- Sadaka, S., Vandevender, K., Costello, T., Sharara, M., 2010. Partial Composting for Biodrying Organic Materials.
- Shao, L.-M., He, X., Yang, N., Fang, J.-J., Lu, F., He, P.-J., 2015. Biodrying of Municipal Solid Waste Under Different Ventilation Modes: Drying Efficiency and Aqueous Pollution. *Waste Manag. Res.* 30, 1272–1280.
- Shao, L.-M., Ma, Z.-H., Zhang, H., Zhang, D.-Q., He, P.-J., 2010. Bio-drying and Size Sorting of Municipal Solid Waste with High Water Content for Improving Energy Recovery. *Waste Manag.* 30, 1165–1170.
- Shuqing, Z., Wenxiong, H., Ran, Y., Song, Y., Dandan, H., Chang, L., 2014. The effect of bio-drying pretreatment on Heating Values of Municipal Solid Waste. *Adv. Mater. Res.* 1010–1012, 537–546.

- Sugni, M., Calcaterra, E., Adani, F., 2005. Biostabilization-biodrying of municipal solid waste by inverting air-flow. *Bioresour. Technol.* 96, 1331-1337.
- Tom, A.P., Haridas, A., Pawels, R., 2016a. Biodrying Process Efficiency: -Significance of Reactor Matrix Height. *Procedia Technol.* 25, 130-137.
- Tom, A.P., Pawels, R., Haridas, A., 2016b. Biodrying process: A Sustainable Technology for Treatment of Municipal Solid Waste with High Moisture Content. *Waste Manag.* 49, 64-72.
- Tom, A.P., Pawels, R., Haridas, A., 2016c. Biodrying process: A Sustainable Technology for Treatment of Municipal Solid Waste with High Moisture Conten. *Waste Manag.* 49, 64-72.
- Velis, C.A., Longhurst, P.J., Drew, G.H., Smith, R., Pollard, S.J.T., 2009. Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: A review of process science and engineering. *Bioresour. Technol.* 100, 2747-2761.
- Villegas, M., Huilnir, C., 2014. Biodrying of Sewage Sludge: Kinetics of Volatile Solids Degradation Under Different Initial Moisture Contents and Air-Flow Rates. *Bioresour. Technol.* 174, 33-41.
- Yang, B., Hao, Z., Jahng, D., 2017. Advances in Biodrying Technologies for Converting Organic Wastes into Solid Fuel. *Dry. Technol.* 1, 1-84.
- Yuan, J., Zhang, D., Li, Y., Li, J., Luo, W., Zhang, H., Wang, G., Li, G., 2018. Effects of The Aeration Pattern, Aeration Rate, and Turning Frequency on Municipal Solid Waste Biodrying Performance. *J. Environ. Manage.* 218, 416-424.
- Yuan, J., Zhang, D., Li, Yun, Chadwick, D., Li, G., Li, Yu, Du, L., 2017. Effects of Adding Bulking Agents on Biostabilization and Drying of Municipal Solid Waste. *Waste Manag.* 1, 1-9.
- Zawadzka, A., Krzystek, L., Ledakowicz, S., 2009. Autothermal Biodrying of Municipal Solid Waste with High Moisture Content. *Chem. Pap.* 64, 265-268.
- Zawadzka, A., Krzystek, L., Stolarek, P., Ledakowicz, S., 2010. Biodrying of Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. *Dry. Technol.* 28, 1220-1226.
- Zhang, D.-Q., He, P.-J., In, T.-F., Shao, L.-M., 2008. Bio-drying of municipal solid waste with high water content by aeration procedures regulation and inoculation. *Bioresour. Technol.* 99, 8796-8802.
- Zhang, D.-Q., He, P.-J., Shao, L.-M., 2009. Sorting efficiency and combustion properties of municipal solid waste during bio-drying. *Waste Manag.* 29, 2816-2823.
- Zhang, D., He, P., Shao, L., Jin, T., Han, J., 2008. Biodrying of municipal solid waste with high water content by combined hydrolytic-aerobic technology. *J. Environ. Sci.* 20, 1534-1540.
- Zhang, H., Gu, J., Wang, G., Hao, L., Wu, X., 2014. Influence of Aeration Modes on Aerobic Bio-drying of Municipal Solid Waste (MSW). *Adv. Mater. Res.* 1010-1012, 934-938.