

## FENOMENA DEGRADASI SAMPAH ORGANIK TERHADAP STABILITAS TEMPAT PEMROSESAN AKHIR (TPA)

### *THE PHENOMENON OF ORGANIC WASTE DEGRADATION ON LANDFILL STABILITY*

<sup>\*1</sup>Fildzah Raudina Mujaddidah, <sup>2</sup>Benno Rahardyan, <sup>3</sup>Enri Damanhuri, dan <sup>4</sup>Febrian Hadinata

Program Studi Magister Teknik Lingkungan  
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,  
Jl. Ganesha 10 Bandung 40132

Email: <sup>1</sup>fmujaddidah@gmail.com, <sup>2</sup>benno@ftsl.itb.ac.id, <sup>3</sup>e\_damanhuri@ftsl.itb.ac.id, <sup>4</sup>febrian.hadinata@yahoo.co.id

**Abstrak:** Sampah merupakan permasalahan utama di Indonesia dengan persentase pengolahan sampah sebesar 10,09% dan sisanya langsung ditimbun di TPA tanpa ada pengolahan. Sekitar 50%-70% komposisi sampah di Indonesia terdiri dari sampah organik yang mengalami degradasi seiring berjalannya waktu, dimana proses degradasi tersebut mempengaruhi kesetimbangan karbon di sampah yang merupakan unsur utama dalam sampah organik. Proses degradasi sampah sendiri dapat membentuk lindi, gas ( $CH_4$  dan  $CO_2$ ), atau tetap dalam sampah sendiri. Degradasi sampah akan merubah densitas sampah pada timbunan, sehingga mempengaruhi faktor keselamatan dari timbunan. Degradasi sampah secara anaerobik tidak menghasilkan gas, sehingga kemungkinan besar gas  $CO_2$  yang seharusnya terbentuk cenderung berubah menjadi asam yang terdapat pada lindi karena pH lindi bersifat asam dengan rentang pH 2,02 - 4,56 dan nilai DHL yang terus meningkat 2,505 – 30,6 mS/cm. Semakin kecil void ratio dan tekanan pori sampah, maka semakin besar kontak mikroorganisme di sampah yang dapat mempercepat proses degradasi sampah, dimana proses degradasi ini penurunan karakteristik fisik ini dipengaruhi oleh sirkulasi lindi. Faktor keamanan sampah tanpa kompaksi memiliki rentan antara 1,43 – 1,91 dengan rata-rata faktor keamanan 1,685, Faktor keamanan terkompaksi memiliki rentan faktor keamanan 1,26 - 1,93 dengan rata-rata faktor keamanan 1,535, kedua perlakuan secara rata-rata faktor keamanan sampah terkompaksi melewati standar TPA sementara dan permanen.

**Kata kunci:** densitas, faktor keselamatan, kesetimbangan massa karbon, sampah organik

**Abstract:** Solid waste is one of the major problems in Indonesia. The percentage of processed waste is only 10,09, and the rest of it is dumped in the landfill without any treatment. Approximately 50%-70 % of waste composition in Indonesia is organic waste that can be degraded easily over time. The degradation process affects the carbon mass balance. Organic waste degradation can form leachate, biogas ( $CH_4$  and  $CO_2$ ), and solid. Degradation process will change its density and it affects landfill stability, especially its safety factor. The anaerobic organic waste degradation in this study does not produce gas, the  $CO_2$  gas that is supposed to be formed tends to turn into acid contained in leachate. It is this that causes acidic pH leach with a pH range of 2,02 to 4,56 and an increasing EC value of 2,505 – 30,6 mS / cm. Organic waste degradation affects its physical changes by changes in decreasing void ratios and pore pressures, as well as increasing density. The smaller the void ratio and higher the pore pressure, the greater the contact of microorganisms in the waste surcafe that can accelerate the process of degradation declined in physical characteristics influenced by leachate circulation. It also affect it SF. The uncompacted waste SF is between 1,43-1,91 and its average is 1, 685. Uncompacted waste SF is safe in the temporary and permanent landfill. The compacted waste SF is between 1,26 - 1,93 and its average is 1,535, although some points are below the standard for the temporary landfill and 5 points below the permanent landfill standard. However, on average, compacted waste SF is safe for temporary and permanent landfill standards.

**Keywords:** density, carbon mass balance, organic waste, safety factor

## PENDAHULUAN

Produksi *municipal solid waste* (MSW) secara global terus terjadi peningkatan dengan prediksi jumlah MSW mencapai 2.2 triliun ton pada tahun 2025 (Hoornweg and Bhada-Tat, 2012). Peningkatan volume sampah merupakan suatu tantangan tersendiri dalam menangani dan mengontrol secara berkelanjutan, diluar proses daur ulang dan proses pemulihan, TPA masih menjadi pilihan utama pembuangan sampah di berbagai negara, khususnya negara berkembang. Komposisi sampah di Indonesia terdiri dari 50%-70% organik dan sisanya merupakan sampah anorganik. Berdasarkan data dari Badan Statistik Indonesia (2014), persentase sampah dipilah dan dimanfaatkan sebesar 10.09%, sampah dipilah namun tidak dimanfaatkan sebesar 8.75%, dan sampah yang tanpa pemilahan sebesar 81.16%. Dalam artian lagi kemungkinan besar 19.84% sampah yang sudah dipilah tetap dicampur dan dibuang ke TPA.

Dengan persentase sampah organik yang dominan, dimana sampah organik yang bersifat *biodegradable* mengalami proses degradasi di TPA. Degradasi sampah organik yang terjadi mengakibatkan penurunan volume dan massa sampah (Shi dkk, 2015). Pengurangan volume dan massa sampah mempengaruhi densitas sampah pada TPA. Densitas sampah merupakan salah satu komponen penting dalam sistem pengolahan sampah, khususnya dalam desain TPA dan pengelolannya. Dengan adanya perubahan densitas, menyebabkan kondisi kemiringan TPA tidak stabil, khususnya menyebabkan peningkatan tegangan geser, muatan, tekanan lateral, dan pergeseran sementara dari TPA, selain itu kekuatan tegangan pada TPA akan menurun dengan adanya pengairan dan perubahan tekanan pori air (Sayilacksha dkk, 2015).

Adanya pergerakan dan perubahan ukuran TPA akibat degradasi tentu saja merubah sifat, kemilingan, kestabilan TPA sehingga kemungkinan terjadinya kecelakaan semakin besar (Varga, 2014). Efek lain dari kondisi ini adalah kemungkinan terjadi pencemaran air tanah dan sumber air lainnya yang berada di sekitar TPA.

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai densitas sampah yang sesuai dengan kondisi persampahan di Indonesia agar desain dan monitoring TPA efektif dan sesuai dengan kondisi di Indonesia. Penelitian ini difokuskan pada perubahan fenomena degradasi sampah organik terhadap terhadap stabilitas TPA.

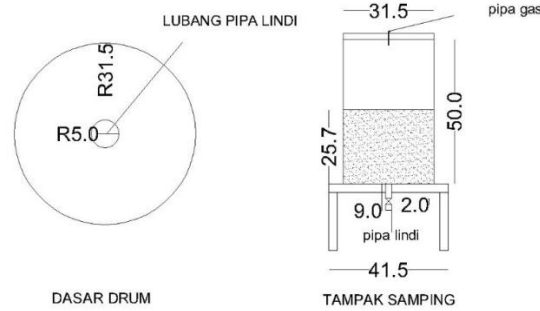
## METODOLOGI PENELITIAN

Pada penentuan nilai densitas ( $\gamma$ ) pada sampah organik dan melakukan permodelan menggunakan Plaxis terdapat beberapa tahap yang terdiri dari tahap persiapan, tahap *running*, tahap analisa, dan interpretasi hasil. Tahap persiapan dimulai dari studi literatur mengenai teknik pengukuran densitas dan beberapa penelitian-penelitian yang berkaitan dengan dekomposisi sampah, densitas, dan stabilitas TPA. Selanjutnya dilakukan pengambilan sampel sampah yang terdiri dari campuran sampah sisa makanan dan kardus dengan komposisi 20:1. Komposisi ini berdasarkan atas tipikal persentase terbesar komposisi sampah di Indonesia, khususnya di Kota Bandung. Persiapan reaktor, bahan-bahan kimia untuk analisa, serta karakteristik awal dilakukan dalam tahap persiapan. Analisa karakteristik awal terdiri dari analisa suhu, pH, *total organic carbon* (TOC), kadar air, dan densitas pada sampel.

Tahap penelitian dilakukan variasi waktu (umur sampah) dalam reaktor, sehingga terdapat beberapa parameter yang diukur dalam rentang waktu tertentu. TOC, kadar volatile, dan densitas sampah dianalisa setiap enam hari sekali. Daya hantar listrik (DHL), pH, suhu, dan kadar air diukur setiap dua hari sekali. Waktu penelitian selama enam puluh hari. Setiap reaktor dimasukkan tanpa dilakukan kompaksi, hanya mengukur densitas awal sampah segar, sedangkan kompaksi dilakukan setiap enam hari sekali atau pada saat pengukuran densitas akhir (Bolyard dan Reinhart, 2016). Setelah didapatkan data, maka dilakukan permodelan mengenai stabilitas TPA menggunakan program Plaxis 8.0. Tahap analisa dan penarikan kesimpulan dilakukan setelah semua data yang dibutuhkan telah didapatkan

## Desain Reaktor

Reaktor terbuat dari drum HDPE berukuran 35L dengan diameter 31,5 cm dan tinggi reaktor. Bagian atas reaktor terdapat pipa dan keran sebagai tempat keluar gas berupa metan (CH<sub>4</sub>) dan karbondioksida (CO<sub>2</sub>). Bagian bawah terdapat pipa dan keran untuk mengambil sampel lindi dan dianalisa. Penelitian ini menggunakan dua puluh buah reaktor (sepuluh reaktor untuk penelitian dan sepuluh untuk duplo penelitian). **Gambar 1** merupakan reaktor yang digunakan dalam penelitian.



**Gambar 1.** Reaktor penelitian

## Densitas Sampah dan Void Ratio

Pengukuran densitas sampah menggunakan ASTM D1557-12: *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristic Modified Effort* (56,00 ft-lb/ft<sup>3</sup>(2,700 kN-m(m<sup>3</sup>))<sup>1</sup>. Sedangkan pengukuran *void ratio* menggunakan ASTM D-854. Pengukuran densitas dilakukan setiap enam hari sekali di Laboratorium Limbah Padat dan B3 Insitutu Teknologi Bandung Kampus Jatinangor.

## Kesetimbangan Massa Karbon

Kesetimbangan massa karbon didapatkan dengan melakukan pengukuran *chemical organic compound*(COD) di lindi, sedangkan untuk sampah padat dilakukan pengukuran *c-organik* dan *volatile organic compoung* (VOC). Produksi gas yang didapat dari proses degradasi tidak diukur, namun hanya melakukan perhitungan pengurangan dari data karbon *input* (pada hari keenol) dengan penjumlahan dari karbon total dari lindi dan sampah padat selama proses degradasi. Rumus kesetimbangan massa dapat dilihat pada Persamaan 1.

$$C_{tot} = C_{gas} + C_{liquid} + C_{solid} \quad (1)$$

Dimana  $C_{tot}$  merupakan konsentrasi total karbon,  $C_{gas}$  merupakan konsentrasi gas yang terbentuk selama proses degradasi,  $C_{liquid}$  karbon total di lindi yang terbentuk, dan  $C_{solid}$  konsentrasi karbon di sampah padat.

$$\frac{dx}{dt}_{mob} = \sum(X_{si}Q_{si}) - X_l.Q_l + X_g.Q_g + r.V \quad (2)$$

Dimana  $\frac{dx}{dt}_{mob}$  merupakan akumulasi konsentrasi.  $\sum(X_{si}Q_{si})$  merupakan jumlah sampah yang masuk yang dijumlahkan kuantitas setiap kategori aliran molekul dikali dengan karbon di setiap mergeologi.  $X_l.Q_l$  adalah massa karbon yang terdapat pada karbon.  $X_g.Q_g$  merupakan massa karbon yang terdapat pada gas terproduksi selama proses degradasi.  $r.V$  adalah reaksi yang terjadi pada proses dalam volum reaktor ditambah dengan kinetik.

## Permodelan Plaxis

Permodelan menggunakan software Plaxis 8.6 2D pada saat akhir penelitian guna mengetahui faktor keselamatan dari proses degradasi dan perubahan densitas dari waktu ke waktu. Data yang didapatkan dari penelitian dan diaplikasikan dalam permodelan ini adalah nilai densitas ( $\gamma_d$ ), sedangkan nilai rasio poisson, kohesi (kPa), sudut fraksi internal ( $\phi$ ) didapatkan dari data Hadinata (2011).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakteristik Sampel

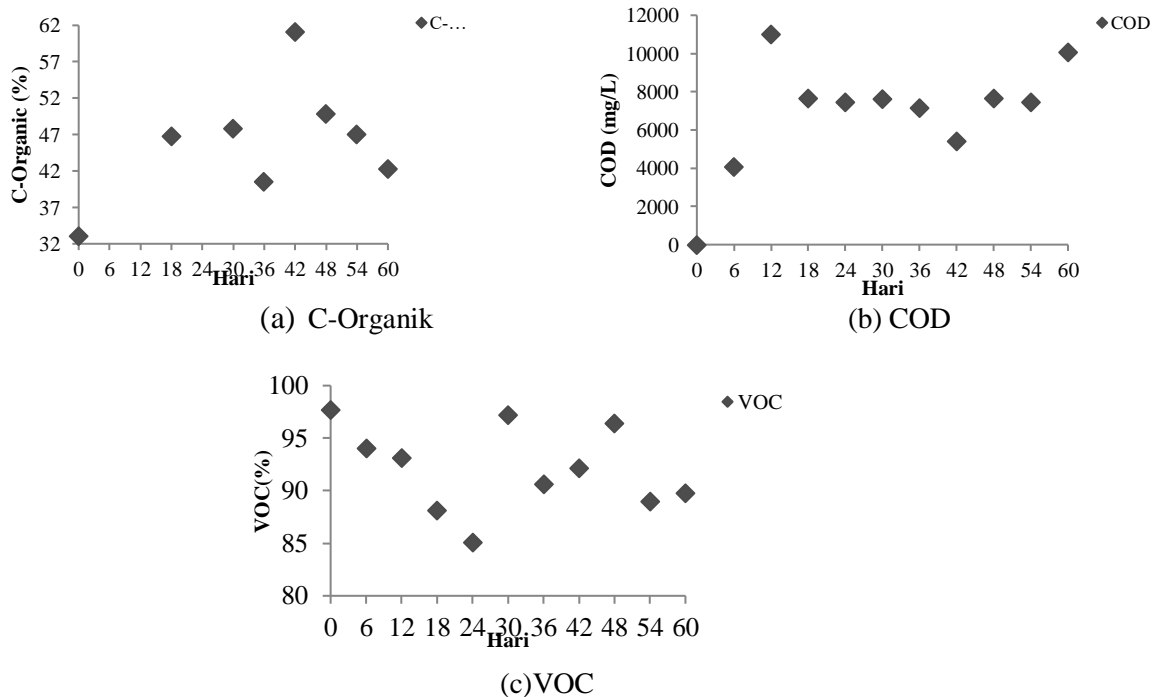
Sampah organik terdiri dari campuran sampah sisa makanan dan kardus yang telah dicacah dan diayak dengan ukuran diameter 1 cm dengan perbandingan 20:1. Karakteristik awal sampah organik dapat dilihat pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Karakteristik awal sampel

No.	Parameter	Nilai
1	pH	3,5
2	Suhu	25,5 °C
3	C-Organic	32,953%
4	Volatile Organic Compound (VOC)	97,70%

Dalam penelitian ini dilakukan dua perlakuan fisik terhadap sampel, yaitu dengan cara dikompaksi dan tanpa kompaksi. Perlakuan tanpa dikompaksi dikondisikan densitas sampel sebesar 0,6 gram/cm<sup>3</sup> dengan nilai *void ratio* sebesar 2,202 dan *safety factor* sebesar 1,820. Sedangkan sampah yang terkompaksi memiliki densitas awal 0,829 gram/cm<sup>3</sup> dengan nilai *void ratio* sebesar 6,892 dan *safety factor* sebesar 1,350.

### Parameter Kimia



**Gambar 2.** Perubahan parameter kimia degradasi sampah organik

Distribusi perubahan konsentrasi *c-organic* dari waktu ke waktu bersifat fluktuatif. Hal ini disebabkan sampel sampah setiap waktu berasal dari reaktor yang berbeda, selain itu komposisi sampah bersifat heterogen sehingga terdapat berbagai macam tingkat degradasi yang dapat mempengaruhi distribusi karbon pada sampah tersebut. Fenomena serupa terjadi pada distribusi VOC dan Lindi dimana terjadi perubahan fluktuatif karena sampel sampah yang bersifat heterogen. Berdasarkan penelitian Ogata dkk., (2014), proses degradasi sampah secara anaerobik pada landfill dipengaruhi oleh keheterogenan sampah yang mempengaruhi distribusi karbon pada fase gas dan cair. Peningkatan konsentrasi COD disebabkan oleh proses sirkulasi air

lindi yang dilakukan untuk melakukan pengecekan terhadap pH, suhu, dan DHL pada lindi. Berdasarkan Xu dkk (2014), resirkulasi lindi meningkatkan proses hidrolitik pada mikroorganisme untuk berkontak langsung dengan sampah padat, sehingga enzim semakin aktif dan meningkatkan kandungan organik serta konsentrasi asam lemak volatil yang terukur dalam COD. Dapat dikatakan bahwa proses resirkulasi lindi sangat mempengaruhi proses hidrolisis dan asidogenesis dibandingkan proses metanogenesis (yang cenderung mencegah proses tersebut).

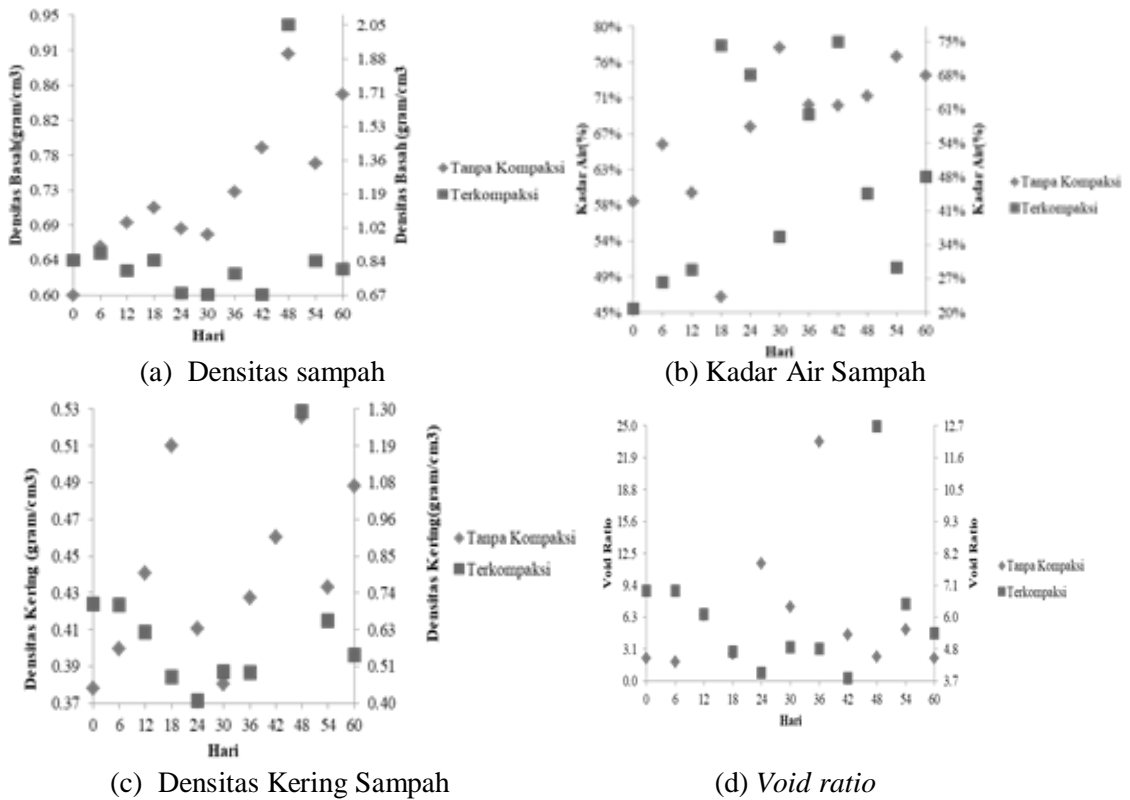
**Pengaruh Degradasi Sampah Terhadap Sifat Fisik Sampah**

Kedua perlakuan dilakukan pengukuran densitas basah - kering, kadar air, dan void ratio yang ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kondisi awal sampah tanpa kompaksi dan terkompaksi

Perlakuan	Densitas Basah (gram/cm <sup>3</sup> )	Kadar Air (%)	Densitas Kering(gram/cm <sup>3</sup> )	Void Ratio
Tanpa Kompaksi	0,6	58,59%	0,378	2,202
Terkompaks	0,849	20,80%	0,703	6,892

Berat total yang dibutuhkan dalam reaktor adalah 12 kg.



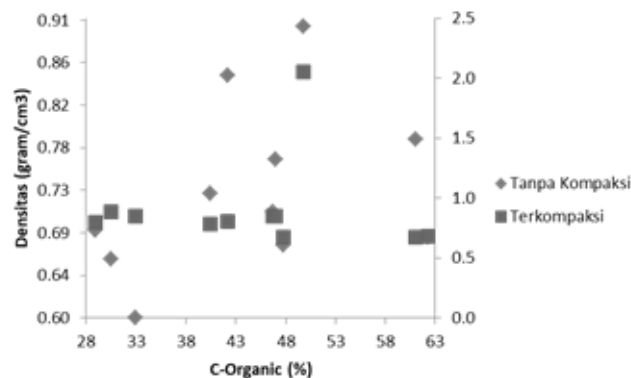
**Gambar 3.** Perubahan karakteristik fisik sampah organik selama proses degradasi

Perubahan densitas mempengaruhi perubahan kandungan air dan void ratio pada sampah. Pola perubahan densitas basah sampah terkompaksi sama dengan sampah tidak terkompaksi,

namun nilai densitas basah lebih besar karena perubahan volume yang terjadi lebih besar, yaitu  $\pm 1,2$  kali lebih besar daripada sampah tanpa kompaksi.

Besar perubahan densitas basah sampah terkompaksi berkisar  $0,672 - 2,052 \text{ gram/cm}^3$  dengan rata-rata densitas basah  $0,898 \text{ gram/cm}^3$ . Perubahan kadar air selama enam puluh hari memiliki pola meningkat dari ke waktu dan memiliki rentang antara  $46,9\% - 77,4\%$  dengan rata-rata  $67,1\%$ . Perubahan densitas basah terhadap kandungan air pada sampah memiliki kolerasi positif ( $p < 0,05$ ,  $r = 0,59$ ). Semakin tinggi nilai densitas sampah, semakin besar pula kadar air sampah tersebut (Julrat dan Trabesi, 2017). Peningkatan kadar air dalam sampah juga disebabkan oleh proses sirkulasi lindi yang dilakukan untuk mengontrol parameter sampah. Kadar air yang tinggi juga menghambat terbentuknya gas ( $r = -0,569$ ) dan proses metanogenesis (White dan Beaven, 2013; Chen dkk., 2016). Kadar air dari sampah terkompaksi mencapai  $75\%$ , yaitu lebih rendah daripada sampah tanpa kompaksi. Hal ini disebabkan air yang terdapat pada sampel terikat atau terjebak dalam pori sampah. Perubahan densitas basah dengan kadar air tidak saling berkolerasi, namun berbanding lurus ( $p > 0,05$ ,  $r = 0,8$ ). Sama halnya dengan kadar air pada sampah, densitas kering berbanding lurus dengan proses degradasi dan densitas ( $p < 0,05$ ,  $r = 19,042$ ) serta kadar air (Jurat dan Trabelsi, 2017). Densitas kering berhubungan dengan besar daya kompaksi yang diterima oleh sampah. Hubungan *void ratio* dengan densitas basah untuk perlakuan tanpa kompaksi sendiri berbanding terbalik namun ( $p > 0,05$ ,  $r = -0,024$ ), *Void ratio* sangat berkolerasi lurus dengan perubahan densitas ( $p < 0,05$ ,  $r = 48,795$ ). Perubahan densitas dan *void ratio* sangat mempengaruhi proses degradasi yang terjadi pada sampah padat ( $p < 0,05$ ).

Densitas kering, dan kadar air berbanding terbalik, dimana ketika nilai ketiga parameter tersebut semakin meningkat, maka nilai *void ratio* semakin menurun. Densitas kering sampah berbanding terbalik dan tidak saling berhubungan dengan perubahan densitas basah ( $p > 0,05$ ,  $r = -0,302$ ). Densitas kering berhubungan dengan kadar air selama proses degradasi sampah. *Void ratio* merupakan ruang kosong yang terdapat di antara sampah atau lapisan tanah. Ketika densitas meningkat, maka volume sampah tersebut semakin berkurang, sehingga nilai *void ratio* semakin menurun (Sayilacksha dkk, 2015). Semakin tinggi nilai densitas dan *void ratio*, maka semakin dekat pula jarak kontak substrat antar mikroorganisme yang terdapat pada sampah, dan juga penambahan nilai COD dan pH pada lindi (Ko dkk., 2016).



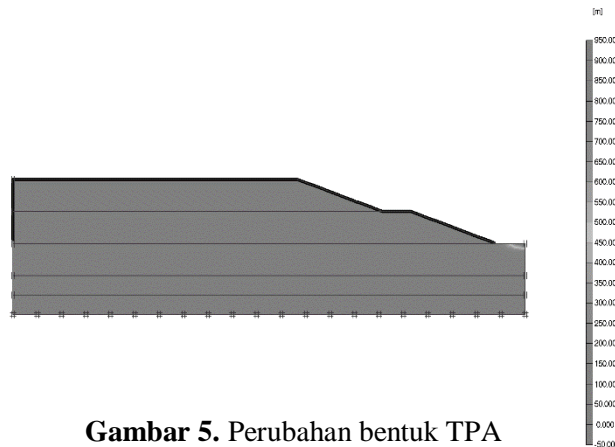
**Gambar 4.** Hubungan *C-Organic* dengan densitas

Aliran distribusi karbon dalam tahap degradasi sampah organik masih didominasi berada di sampah padat dimana persentase karbon rata-rata mencapai  $90\%$  dengan *c-organic* memiliki pengaruh positif terhadap perubahan densitas ( $r = 1,081$ ). Nilai karbon solid padat sendiri berkolerasi negatif terhadap pembentukan gas ( $p < 0,05$ ,  $r = -0,941$ ) dan berbanding lurus terhadap jumlah massa karbon pada sampel padat ( $p = 0,00$ ), walau tidak berpengaruh terhadap pembentukan jumlah massa karbon di lindi, namun pola penjumlahan massa karbonnya berbanding lurus ( $p > 0,05$ ,  $r = 0,216$ ). Fenomena ini disebabkan sampel sampah yang merupakan sisa makanan atau sampah sisa dapur yang memiliki kandungan asam volatil lemak tinggi. Asam

volatil lemak terbentuk karena proses degradasi protein, lemak, gula, dan holoselulosa (pada sampah organik) dalam tahap hidrolisis dan asidogenesis (Chen dkk., 2016). Asam volatil lemak merupakan penghambat proses terbentuknya gas (gas terbentuk dengan rentan suhu 30°-60°C dengan pH berkisar 6,8-7,5, sedangkan pH dan suhu kurang dari kedua rentan tersebut), khususnya menghambat proses metanogenesis, dan menyebabkan pH pada lindi rendah (Ye dkk.,2013), sehingga CO<sub>2</sub> gas yang seharusnya terbentuk menjadi asam CO<sub>2</sub> pada lindi (Brandstätter dkk., 2015). Salinitas dan kandungan amonium (ditunjukkan nilai DHL) pada lindi juga memberikan efek pada saat proses degradasi, yaitu menghambat proses terbentuknya gas dan metanogenesis, walau tidak berkorelasi ( $p > 0,05$ ,  $r = -0,295$ ), namun memberikan dampak berkebalikan. Pembentukan gas dalam proses degradasi anaerobik merupakan hasil minor, atau kemungkinan besar sulit untuk terbentuk (Brandstätter dkk.,2015). Dalam penelitian ini tidak ada pengukuran secara detail mengenai senyawa-senyawa kimia secara detail yang terdapat pada sampah padat, lindi, dan gas yang terbentuk.

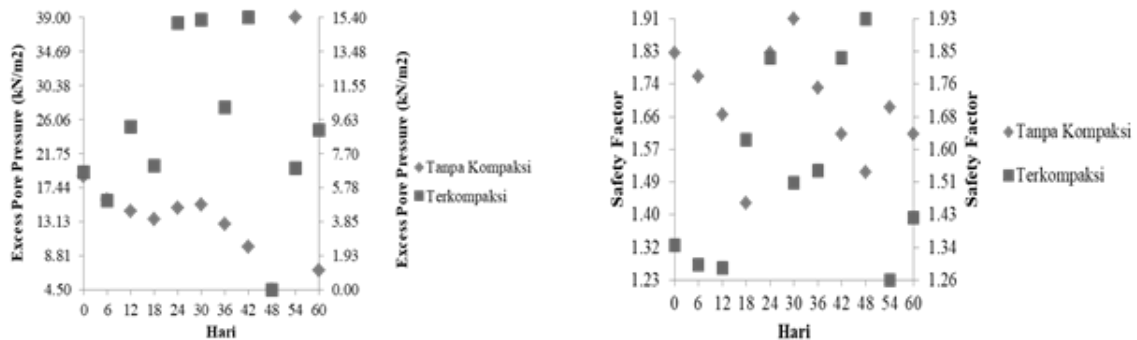
### Pengaruh Proses Degradasi Sampah Terhadap Stabilitas TPA

Perhitungan faktor keamanan menggunakan program Plaxis 8.6 dengan memasukkan *unit weight density saturated* dan *unsaturated*, serta permeabilitas yang didapatkan dari hasil penelitian. Tanah dasar yang digunakan adalah merupakan tanah lempung dengan pelapis tanah liat. Perhitungan faktor keamanan untuk dua perlakuan, yaitu sampah tanpa kompaksi dan sampah terkompaksi.



Gambar 5. Perubahan bentuk TPA

Perubahan tanah baik perlakuan tanpa kompaksi dan terkompaksi sama dan tidak ada perbedaan berarti. Perubahan terjadi di antara lapisan pertama dan kedua.



Gambar 6. Titik tekan pori dan faktor keamanan TPA

Tekanan pori terbesar untuk sampah tanpa kompaksi mencapai 39,5 kN/m<sup>2</sup>, sedangkan sampah terkompaksi hanya mencapai 16 kN/m<sup>2</sup>. Pembentukan gas berkorelasi negatif terhadap

titik tekan pori sampah ( $p < 0,19$ ,  $r = -0,526$ ). Semakin tinggi titik tekan pori, maka semakin kecil *void ratio* pada sampel sampah tersebut, sehingga memperbesar luas kontak antar mikroorganisme untuk mendegradasi sampah (Ko dkk., 2016). Namun dikarenakan kandungan total asam volatil lemak pada sampah organik, khususnya sampah makanan tinggi, maka proses metanogenesis dan pembentukan gas terhambat, maka kandungan karbon organik berpindah ke lindi dimana pH rendah dan DHL yang tinggi (Xu dkk., 2014; Xu dkk., 2015). Faktor keamanan sampah tanpa kompaksi memiliki rentan antara 1,43 – 1,91 dengan rata-rata faktor keamanan 1,685, sehingga faktor keamanan sampah terkompaksi secara keseluruhan dapat dikatakan dalam kategori aman untuk kategori TPA sementara dan secara rata-rata termasuk dalam kategori aman untuk TPA permanen. Faktor keamanan terkompaksi memiliki rentan faktor keamanan 1,26 - 1,93 dengan rata-rata faktor keamanan 1,535, walau beberapa titik di bawah standar faktor keamanan untuk TPA sementara dan 5 titik di bawah standar faktor keamanan TPA permanen. Namun secara rata-rata faktor keamanan sampah terkompaksi melewati standar TPA sementara dan permanen. Perubahan faktor keamanan sampah dan stabilitas tanah (Varga, 2014; Gao dkk., 2015;) dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu (1) sampah semakin berat dan mengecilnya volume sampah. Dalam artian lain nilai densitas sampah semakin meningkat, (2) perubahan nilai tekanan pori dan *void ratio* sampah akibat proses resirkulasi lindi. Nilai titik tekan pori dan *void ratio* mengecil akibat proses degradasi dan konsentrasi lindi semakin meningkat akibat kontak antar mikroorganisme di sampah, sehingga kerapatan sampah semakin meningkat akan dapat mengurangi kestabilan TPA; dan (3) Permukaan yang terus basah (salah satunya akibat resirkulasi lindi, dapat mengurangi kestabilan dan faktor keamanan TPA).

## KESIMPULAN

Degradasi sampah secara anaerobik tidak menghasilkan gas, sehingga kemungkinan besar gas CO<sub>2</sub> yang seharusnya terbentuk cenderung berubah menjadi asam yang terdapat pada lindi karena pH lindi bersifat asam dengan rentang pH 2,02 -4,56 dan nilai DHL yang terus meningkat 2,505 – 30,6 mS/cm. Semakin kecil *void ratio* dan tekanan pori sampah, maka semakin besar kontak mikroorganisme di sampah yang dapat mempercepat proses degradasi sampah, dimana proses degradasi ini penurunan karakteristik fisik ini dipengaruhi oleh sirkulasi lindi. Faktor keamanan sampah tanpa kompaksi memiliki rentan antara 1,43 – 1,91 dengan rata-rata faktor keamanan 1,685, Faktor keamanan terkompaksi memiliki rentan faktor keamanan 1,26 - 1,93 dengan rata-rata faktor keamanan 1,535, kedua perlakuan secara rata-rata faktor keamanan sampah terkompaksi melewati standar TPA sementara dan permanen.

## Daftar Pustaka

- Bolyard, Stephanie C., Reinhart, Debra.R. (2016). *Application of Landfill Treatment Approaches of Stabilization of Municipal Solid Waste*. Waste Management, **55**, 22.-30.
- Brandstätter, Christia., Laner, David., dan Fellner, Johann. (2015). *Carbon Pools and Flows During Lab-Scale Degradation of Old Landfilled Waste Under Different Oxygen and Water Regimes*. Waste Management, **50**, 100-111.
- Chen, Yunmin., Guo, Ryu., Li, Yu-Chao., Liu, Hailong., dan Zhan, Tony Liantong. (2016). *A Degradation Model for High Kitchen Waste Content Municipal Solid Waste*. Waste Management.
- Julrat, Sakol, Trabelsi, Samir. (2017). *Density Independent Algorithm for Sensing Moisture Content of Sawdust Based on Reflection Measurements*. Biosystem Engineering, **158**, 102-109.
- Ko, Jae Hac., Yang, Fang., dan Xu, Yang Qiyong. (2016). *The Impact of Compaction and Leachate Recirculation On Waste Degradation in Simulated Landfills*. Bioreseource Technology, **211**, 72-79.
- Ogata, Yuka., Ishigaki, Tomonori., Nakagawa, Mikako., dan Yamada, Masato. (2016). *Biotechnology Reports*, **10**, 111-116.
- Sayilacksha, G., Venuja, T., dan Kurukulsuriya, L.C. (2015). *Stability of An Open Dumpsite Ageing*. Struktural Engineering and Construction, **15**, No. 11, 81-86.
- Shi, Y., B. C. Baldwin, K. J. Davis, X. Yu, C. J. Duffy, dan H. Lin. (2015). *Simulating High Resoluton Soil Moisture Patterns in The Shale Hills Watershed Using a Land Surface Hydrolic Model*. Hydrological Processes, **29**, Issue 21, 4624–4637.



- Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristic Modified Effort (56,00 ft-lb/ft<sup>3</sup>(2,700 kN-m(m<sup>3</sup>))<sup>1</sup>*
- Varga, Gabriella. (2011). *Some Geotechnical Aspects of Bioreactor Landfills*. Civil Engineering, **5**, No. 1, 39-44.
- Varga, Gabriella. (2014). *Comparison of Landfill Stability Analysis Results Based On Literature Recommendations*. Geosciences and Engineering, **3**, No.5, 71-76.
- White, J.K, Beaven, R.P. (2013). *Development to A Landfill Processes Model Folloriwng Its Appliation to Rwo Landfill Modelling Challenges*. Waste Management, **33**, 1969-1981.
- Xu, Qiyong., Jin, Xiao., Ma, Zeyu., Tao, Huchun., dan Ko, Jae Hac. (2014) *Methane Production in Simulated Hybrid Bioreactor Landfill*. Bioresource Technology.
- Xu, Qiyong., Tian, Yian., Wang, Shen., dan Ko, Hae Hac. (2015). *A Comparative Study of Leachate Quality and Biogas Generation in Simulated Anaerobic and Hybrid Bioreactors*. Waste Management.
- Ye, Jingqing., Li, Dong., Sun, Yongming., Wang, Guohui., Yuan Zhenhong., Zhen, Feng., dan Wang., Yao. (2013). *Improved Biogas Production From Strow by Co-Digestiin with Kitche Waste and Pig Manure*. Waste Management, **33**, 2653-2658.