

APLIKASI MODEL SISTEM DINAMIK UNTUK EVALUASI SKENARIO PENGELOLAAN SAMPAH DI WILAYAH PELAYANAN TEMPAT PENGOLAHAN DAN PEMROSESAN AKHIR SAMPAH (TPPAS) NAMBO

Application of System Dynamics Model for Evaluation of Municipal Solid Waste Management Scenarios in Service Areas of Nambo Regional Waste Treatment and Final Disposal Site

Mochammad Chaerul¹, Ika Artika²

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

²Direktorat Jenderal Cipta Karya, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat,
Jalan Pattimura No. 20 Kebayoran Baru, Jakarta 12110
Surel: m.chaerul@ftsl.itb.ac.id, ikaartika@pu.go.id

Diterima : 9 April 2021;

Disetujui : 28 Oktober 2021

Abstrak

Tempat Pengolahan dan Pemrosesan Akhir Sampah Regional Lulut Nambo (TPPAS Nambo) direncanakan oleh Pemerintah Provinsi Jawa Barat untuk melayani 4 wilayah yaitu Kota Depok, Kota Bogor, Kabupaten Bogor, dan Kota Tangerang Selatan. Tujuan penelitian adalah menganalisis berbagai alternatif skenario kebijakan guna mengoptimalkan pelayanan pengelolaan sampah di 4 wilayah tersebut dan mengetahui pengaruhnya terhadap sampah yang terangkut ke TPPAS Nambo dengan pendekatan model sistem dinamik. Simulasi dilakukan terhadap 4 skenario yaitu business as usual (BAU), optimalisasi fasilitas pengolahan sampah eksisting, implementasi rencana induk pengelolaan sampah daerah (masterplan), dan implementasi Kebijakan Strategi Daerah (Jakstrada) pengelolaan sampah. Dari hasil simulasi mulai tahun 2020 hingga 2045, didapat bahwa keempat kota di atas tidak dapat hanya mengandalkan keberadaan TPPAS Nambo yang memiliki keterbatasan kapasitas pengolahan, sehingga kehadiran Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) di masing-masing kota/kabupaten masih tetap diperlukan. Dari hasil simulasi didapat bahwa Skenario Jakstrada merupakan skenario yang paling optimal adalah bila mempertimbangkan jumlah timbulan sampah yang harus dikelola, biaya pengangkutan, kebutuhan lahan untuk TPA dan emisi lingkungan, walaupun mensyaratkan adanya kebutuhan fasilitas penanganan sampah di sumber yang lebih besar. Perkiraan biaya pengolahan sampah dari Skenario Jakstrada untuk masing-masing Kota Depok, Kota Bogor, Kabupaten Bogor dan Kota Tangerang Selatan adalah sebesar Rp 297.584/ton, Rp 543.345/ton, Rp 285.532/ton, dan Rp 305.902/ton. Dari validasi model terbukti bahwa sistem dinamik dapat diaplikasikan untuk menganalisis keterkaitan berbagai macam faktor yang perlu dipertimbangkan dalam proses perencanaan untuk mencapai pengelolaan sampah yang berkelanjutan.

Kata Kunci: *Pengelolaan sampah; sistem dinamik; simulasi; skenario; kapasitas pengolahan*

Abstract

Regional Waste Treatment and Final Disposal Site of Lulut Nambo (TPPAS Nambo) has been planned by West Java Province to serve municipal solid waste (MSW) generated from 4 areas, namely Depok, Bogor, South Tangerang Cities and Bogor Regency. The study aims to analyze the related scenarios to optimize MSW management services in the areas and to find the waste quantity to be transported to TPPAS Nambo by applying system dynamics model. Simulation was performed for 4 scenarios namely business as usual (BAU), optimization of existing waste treatment facility, implementation of the masterplan of MSW management, and implementation of Regional Policy and Strategy related to MSW management (Jakstrada). Simulation result from 2020 to 2045 shows that the 4 cities cannot rely solely on the presence of TPPAS Nambo which has treatment capacity limitation, thus the presence of final disposal site (TPA) in their respective city is still required. Compared to other scenario, Scenario of Jakstrada becomes the most optimal by considering amount of waste generated to be managed, transportation cost, land required for TPA, and emission to the environment, though it requires more waste handling facilities at source. The estimated cost of waste management from Jakstrada Scenario for Depok City, Bogor City, Bogor Regency, South Tangerang City are Rp 297.584/ton, Rp 543.345/ton, Rp 285.532/ton, and Rp 305.902/ton, respectively. From the model validation, it proved that the system dynamic could be applied to analyze the

interrelationship among the factors to be considered in the planning process to achieve sustainable MSW management.

Keywords: Waste management; system dynamic; simulation; scenarios; treatment capacity

PENDAHULUAN

Pengelolaan sampah yang dihasilkan dari penduduknya sebenarnya merupakan tanggung jawab pemerintah kota/kabupaten terkait, yang dapat dibantu oleh pemerintah provinsi dan/atau pusat sesuai dengan kewenangannya berdasarkan Undang-Undang No. 18 tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah. Keterbatasan lahan yang dihadapi, terutama di kota metropolitan dan kota besar, memicu berkembangnya pemanfaatan dan pengadaan Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) yang digunakan oleh beberapa kota/kabupaten yang letaknya berdekatan, atau TPA Regional (Anggraini 2011).

Sebagai bentuk tanggung jawab dalam pengelolaan sampah lintas kota/kabupaten, Provinsi Jawa Barat telah merencanakan adanya Tempat Pengolahan dan Pemrosesan Akhir Sampah Regional Lulut Nambo (TPPAS Nambo) yang berlokasi di Kabupaten Bogor untuk melayani timbulan sampah yang dihasilkan dari 4 kota/kabupaten di sekitarnya, yaitu: Kota Depok, Kota Bogor dan Kota Tangerang Selatan, serta Kabupaten Bogor. Sebenarnya TPPAS Nambo direncanakan dapat diselesaikan pada tahun 2020 ini, akan tetapi pembangunan TPPAS Nambo belum menunjukkan progres yang signifikan sampai saat paper ini disusun. Walaupun demikian, rencana kehadiran TPPAS Nambo ini perlu dipertimbangkan dalam perencanaan pengelolaan sampah di wilayah pelayanannya.

Pengelolaan sampah suatu kota merupakan kegiatan yang kompleks dan dinamis sebagai suatu sistem. Karakteristik yang kompleks dipengaruhi adanya beberapa aspek yang terlibat dalam pengelolaan sampah, antara lain: pengaturan, kelembagaan, keuangan, teknis operasional, dan partisipasi masyarakat. Sedangkan karakteristik dinamis muncul karena terdapat berbagai macam faktor dalam sistem pengelolaan yang saling mempengaruhi antar faktor dan berubah sepanjang waktu. Untuk menganalisis hubungan dan sifat dinamis antar faktor dalam pengelolaan sampah, pemodelan dengan sistem dinamik diyakini dapat digunakan untuk mengakomodir karakteristik tersebut (Popli, Sudibya, dan Kim 2017).

Pemodelan sistem dinamik dapat membantu untuk mempelajari struktur dan dinamika dari sistem yang kompleks, merancang kebijakan dengan dampak

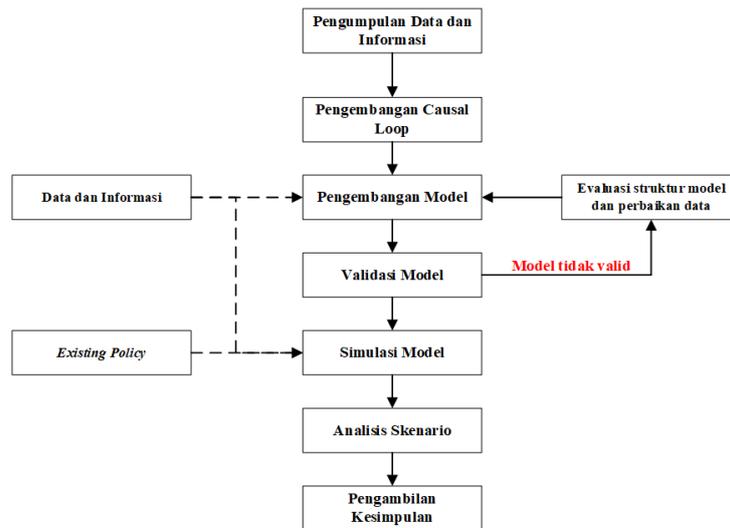
yang tinggi, dan mempercepat keberhasilan dari implementasi dan intervensi (Sterman 2002). Telah banyak peneliti yang menggunakan model yang berbasis sistem dinamik dalam bidang pengelolaan sampah, antara lain untuk mencari alternatif skenario yang efektif dalam mengurangi limbah/sampah (Chaerul et al. 2008; Rahayu et al. 2013; Zulfinar dan Sembiring 2015; Al-Khatib et al. 2015; Fauzan 2017), menurunkan biaya pengelolaan sampah (Kholil 2005; Yudiyanto 2007), meningkatkan kualitas lingkungan (Bala, Arshad, dan Noh 2017), memperpanjang usia pakai lahan urug (Giannis et al. 2017; Handono 2010), meningkatkan cakupan pelayanan (Abraham 2017; Febriyanto 2016; Wildanurrizal et al. 2014), dan memperoleh operasional pengelolaan sampah yang stabil dan berkelanjutan secara ekonomi dan lingkungan (Cai dan Liu 2013)

Dibandingkan dengan beberapa studi di atas, variabel penyusun model dari aspek teknis operasional dan aspek pembiayaan dibuat lebih rinci dengan data input dan data output yang lebih beragam. Model sistem dinamik dibuat berdasarkan kondisi umum pengelolaan sampah di Indonesia sehingga dapat diaplikasikan untuk kota/kabupaten lainnya. Dengan demikian model yang disusun diharapkan dapat menggambarkan pengelolaan sampah secara lebih utuh dari hulu sampai hilir sehingga memberikan hasil simulasi yang lebih akurat.

Paper ini bertujuan untuk mengaplikasikan sistem dinamik dalam mengevaluasi berbagai skenario pengelolaan sampah di Kota Depok, Kota Bogor, Kota Tangerang Selatan, dan Kabupaten Bogor untuk mengantisipasi dioperasikannya TPPAS Nambo. Dengan aplikasi sistem dinamik ini diharapkan dapat dihasilkan skenario optimum terkait pengelolaan sampah di keempat kota/kabupaten di atas yang menjadi wilayah pelayanan TPPAS Nambo, terutama dengan mempertimbangkan faktor timbulan sampah, kapasitas fasilitas pengolahan sampah, kapasitas pengangkutan, biaya pengelolaan sampah, dan emisi lingkungan.

METODE

Skenario dalam pengelolaan sampah akan dianalisis dengan model yang berbasis sistem dinamik. Alur pelaksanaan penelitian ini mengikuti skema di [Gambar 1](#) berikut.



Gambar 1 Metode Pelaksanaan Penelitian

Berbagai macam data yang diperlukan untuk menyusun model ini diperoleh dari data sekunder dan interviu dari berbagai instansi terkait. Data kependudukan dan kondisi ekonomi diperoleh dari Badan Pusat Statistik / BPS (BPS Kabupaten Bogor 2019; BPS Kota Bogor 2019; BPS Kota Depok 2019; BPS Kota Tangerang Selatan 2019). Sedangkan data pengelolaan sampah seperti timbulan sampah, sumber sampah, komposisi sampah, data historis sampah yang dikelola pada fasilitas pengolahan sampah dan tempat pemrosesan akhir (TPA), diperoleh dari Dinas Lingkungan Hidup (DLH) masing kota dan kabupaten, pemerintahan provinsi dan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR).

Sebagai langkah awal pengembangan model, dilakukan penyusunan konseptualisasi sistem pengelolaan sampah dengan mempertimbangkan berbagai faktor terkait yang dituangkan dalam bentuk *Causal Loop Diagram* (CLD) atau yang dikenal sebagai diagram sebab akibat untuk memahami keterkaitan antar faktor dalam suatu sistem pengelolaan sampah yang ditinjau.

Setelah model kualitatif dalam bentuk CLD dipahami, struktur model selanjutnya disusun dalam bentuk *Stock Flow Diagram* (SFD) dengan menggunakan

perangkat lunak STELLA 9.1.3. Berbagai data yang telah diperoleh selanjutnya diinput ke SFD tersebut dan diperoleh hasil simulasi mulai tahun 2020 hingga 2045. Hasil model kuantitatif tersebut dievaluasi dan diuji validitasnya dengan membandingkan hasil simulasi sistem dinamik dengan data historis. Validasi model menggunakan dua cara pengujian yaitu *mean comparison* (E1) dan *error variance* (E2) yang persamaannya dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Setelah model dianggap valid, disusun 4 skenario pengelolaan sampah di keempat Kota/Kabupaten yang menjadi wilayah pelayanan TPPAS Nambo. Pada penyusunan skenario, diasumsikan bahwa pada tahun 2025 cakupan pelayanan telah mencapai 100%. Keempat skenario tersebut adalah:

1. Skenario *Business as Usual* (BAU)
Skenario ini bertujuan untuk melihat perubahan kondisi di masa depan apabila dibiarkan mengikuti kecenderungan pada kondisi di masa sekarang.
2. Skenario A: Optimalisasi kapasitas fasilitas pengolahan eksisting
Skenario ini disusun dengan fokus untuk melihat pengaruh dari optimalisasi fasilitas pengolahan sampah eksisting ketika tingkat pelayanan persampahan mencapai 100%.

Tabel 1 Rumus Validasi Hasil Simulasi Sistem Dinamik

<i>Mean Comparison</i>	<i>Error variance</i>
$E1 = \frac{ \bar{S} - \bar{A} }{\bar{A}}$	$E2 = \frac{ Ss - Sa }{Sa}$
Dimana : \bar{S} = Nilai rata-rata hasil simulasi \bar{A} = Nilai rata-rata data Model dianggap valid apabila $E1 \leq 5\%$.	Dimana : Ss = Standar deviasi hasil simulasi Sa = Standar deviasi data Model dianggap valid apabila $E2 \leq 30\%$.

Sumber: (Barlas 1989)

3. Skenario B: Kebijakan lokal sesuai rencana induk pengelolaan sampah (masterplan) di masing-masing kota/kabupaten
 Skenario ini disusun dengan untuk melihat melihat berbagai macam konsekuensi apabila semua program pengelolaan sampah diaplikasikan berdasarkan dokumen masterplan masing-masing kota/kabupaten.
4. Skenario C: Pengurangan sampah sesuai Jakstrada
 Skenario ini bertujuan untuk melihat seberapa signifikan pengurangan sampah ke TPA apabila target Jakstrada yaitu 30% pengurangan dan 70% penanganan tercapai serta terus dijaga nilainya hingga tahun-tahun berikutnya.

Berbagai macam faktor akan terpengaruh akibat perbedaan skenario yang diajukan. Beberapa faktor yang disajikan lebih detail dalam paper ini adalah timbulan sampah, kapasitas fasilitas pengolahan sampah, kapasitas pengangkutan, biaya pengelolaan sampah, dan emisi lingkungan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengelolaan Sampah di Wilayah Pelayanan

Seperti halnya kota-kota lainnya di Indonesia, tingkat pelayanan pengelolaan sampah di wilayah pelayanan TPPAS Nambo saat ini belum mencapai 100%. Data tingkat pelayanan pada tahun 2017 berdasarkan dokumen masterplan persampahan di masing-masing kota/kabupaten menunjukkan bahwa di Kota Depok mencapai 59,6%, Kota Bogor 69,83%, dan Kabupaten Bogor 15,03%. Sementara di Kota Tangerang Selatan berdasarkan data terakhir tahun 2013, tingkat pelayanan baru mencapai 18,6%.

TPPAS Regional Lulut Nambo berlokasi di Kecamatan Klapanunggal, Kabupaten Bogor. Pembangunan dan pengelolaan TPPAS Nambo berada dalam kewenangan UPTD Pengelolaan Sampah TPA/TPST Regional (PSTR) DLH Jawa Barat. TPPAS ini direncanakan untuk melayani sampah rumah tangga dari 4 wilayah kota/kabupaten di atas. Kuantitas sampah yang dapat diterima TPPAS Nambo dari masing-masing wilayah pelayanan ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

Dalam Kebijakan dan Strategi Pengelolaan Sampah Nasional, ditargetkan pada tahun 2025 seluruh sampah terkelola dengan kegiatan pengurangan sampah mencapai 30% dan penanganan sampah mencapai 70%. Kebijakan ini kemudian diturunkan dalam Kebijakan dan Strategi Pengelolaan Sampah Daerah (Jakstrada) yang diatur dalam Peraturan Kepala Daerah. Dalam Jasktrada Kota Depok, program fisik untuk meningkatkan pengolahan sampah berupa target penambahan bank sampah sebanyak 1

Tabel 2 Kuantitas Sampah yang Diterima di TPPAS Nambo

No	Wilayah Pelayanan	Kuota penerimaan sampah (ton/hari)	
		Minimal	Maksimal
1	Kota Depok	600	700
2	Kota Bogor	400	500
2	Kota Tangerang Selatan	300	500
3	Kabupaten Bogor	500	600
Jumlah		1.800	2.300

Sumber: (UPTD PSTR Jawa Barat 2018)

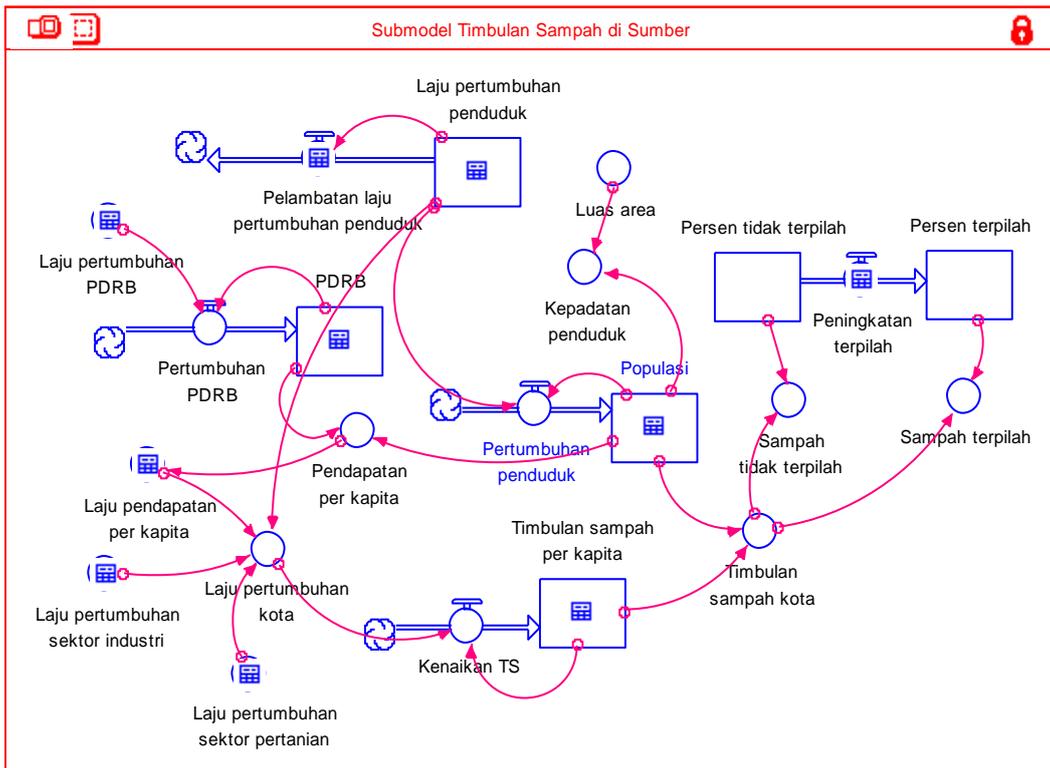
unit/tahun. Kota Bogor dalam Jakstrada-nya memiliki target per tahun penambahan 1 unit bank sampah dan 1 unit Tempat Pengolahan Sampah berbasis 3R (TPS 3R). Kabupaten Bogor memiliki target per tahun penambahan 5 unit bank sampah dan 5 unit TPS 3R serta penambahan 1 unit Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) setiap 2 tahun. Sementara Kota Tangerang Selatan memiliki target penambahan 45 unit bank sampah dan 2 unit TPS 3R per tahun. Selain itu, di tiap wilayah juga terdapat program penguatan komitmen dunia usaha melalui penerapan kewajiban produsen dalam pengurangan sampah (*Extended Producer Responsibility / EPR*).

Causal Loop Diagram Pengelolaan Sampah

Dalam studi ini, model sistem dinamik pengelolaan sampah tersusun dari lima submodel, yaitu: submodel timbulan sampah di sumber, submodel teknis operasional, submodel pemrosesan di TPPAS Nambo, submodel pembiayaan, dan submodel beban emisi. Hubungan antar variabel penyusun model digambarkan melalui *Causal Loop Diagram* (CLD) yang terdapat pada Gambar 2.

Interaksi antar variabel ditandai dengan simbol anak panah. Apabila terbentuk umpan balik atau lingkaran tertutup, ditandai simbol positif/*reinforcing loop* ('R') atau negatif/*balancing loop* ('B'). Tanda positif pada garis artinya perubahan nilai di satu variabel mengakibatkan perubahan nilai di variabel yang lain dalam arah yang berbanding lurus. Sementara tanda negatif artinya perubahan nilai di satu variabel mengakibatkan perubahan nilai di variabel yang lain dalam arah yang berbanding terbalik.

Timbulan sampah dipengaruhi oleh dua faktor utama yaitu pertumbuhan penduduk dan PDRB. Sampah diharapkan dipilah di sumber sebelum dikumpulkan dan diangkut ke fasilitas pengolahan sampah. Sampah anorganik yang bernilai ekonomis dapat dikumpulkan ke bank sampah. Dengan semakin banyaknya sampah yang diolah, diharapkan sampah tidak tertangani dan pembuangan sampah ilegal yang dapat mencemari lingkungan menurun. Untuk mencegah pencemaran lingkungan, pemerintah



Gambar 3 Stock Flow Diagram Submodel 1: Timbulan Sampah di Sumber

sampah di TPPAS Nambo dan pemakaian lahan urug. Hasil yang diperoleh dari submodel ini adalah jumlah produk *Refuse Derived Fuel* (RDF), kompos, dan material daur ulang serta volume sampah di lahan urug.

Submodel Pembiayaan pengelolaan sampah pada Gambar 6 bertujuan untuk mengetahui dinamika kebutuhan pembiayaan pengelolaan sampah. Hasil yang diperoleh dari submodel ini adalah kebutuhan biaya investasi dan biaya operasional dan pemeliharaan (OP). Biaya investasi terdiri dari pembangunan fasilitas pengolahan sampah, perluasan lahan urug, dan pengadaan truk sampah. Sementara perhitungan biaya operasi dan pemeliharaan (OP) meliputi OP layanan TPS 3R dan TPST, OP pengangkutan, OP TPA lokal, *tipping fee*, dan biaya tol ke TPPAS Nambo.

Submodel beban emisi pengelolaan sampah menggambarkan emisi yang ditimbulkan dari kegiatan pengelolaan sampah di wilayah pelayanan TPPAS Nambo. Berbagai sumber emisi teridentifikasi di submodel ini, yang dapat dibagi menjadi 2 (dua) sumber, yaitu emisi akibat pengelolaan sampah di sumber kota masing-masing yang ditunjukkan dalam Gambar 7 dan emisi akibat kegiatan pengelolaan sampah di TPPAS Nambo yang ditunjukkan dalam Gambar 8.

Hasil yang diperoleh dari submodel ini adalah dinamika emisi CO₂eq dari kegiatan pengangkutan sampah, pengolahan sampah dan kegiatan dekomposisi lahan urug di TPPAS Nambo. Emisi pengolahan sampah ditinjau dari pengolahan secara biologis dan termal. Emisi pengolahan biologis bersumber dari pengomposan sampah mudah terurai yang masuk ke TPS 3R/UPS. Sementara emisi pengolahan termal bersumber dari pengolahan di TPST yang diasumsikan menggunakan insinerator.

Validasi Model

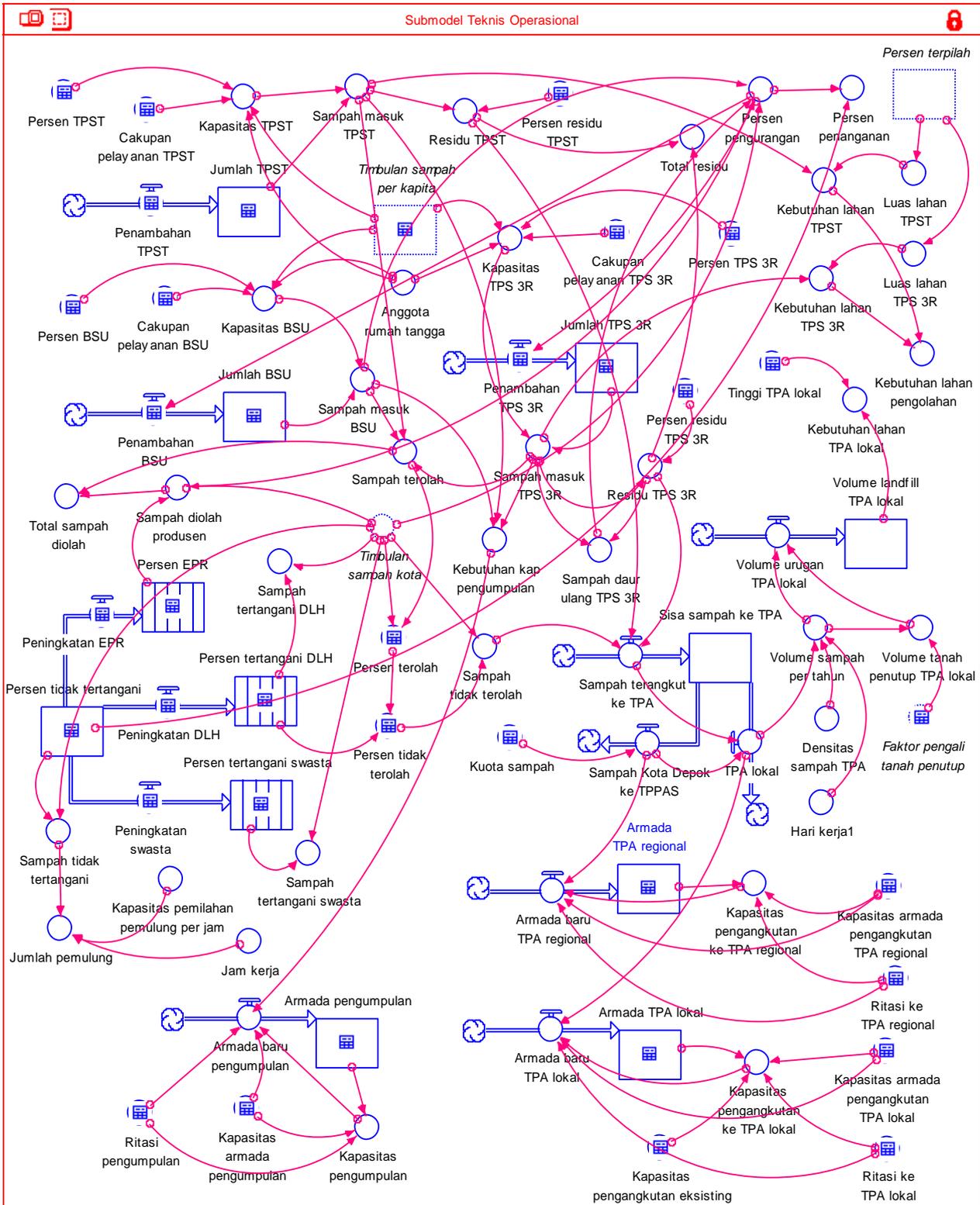
Validasi model dilakukan untuk memastikan apakah hasil simulasi sudah sesuai dengan kondisi nyata dan dapat diterima. Validasi dilakukan terhadap data historis persampahan masing-masing wilayah pelayanan dari tahun 2014 hingga 2018.

Tabel 3 Hasil Uji Validasi Model Kota Depok

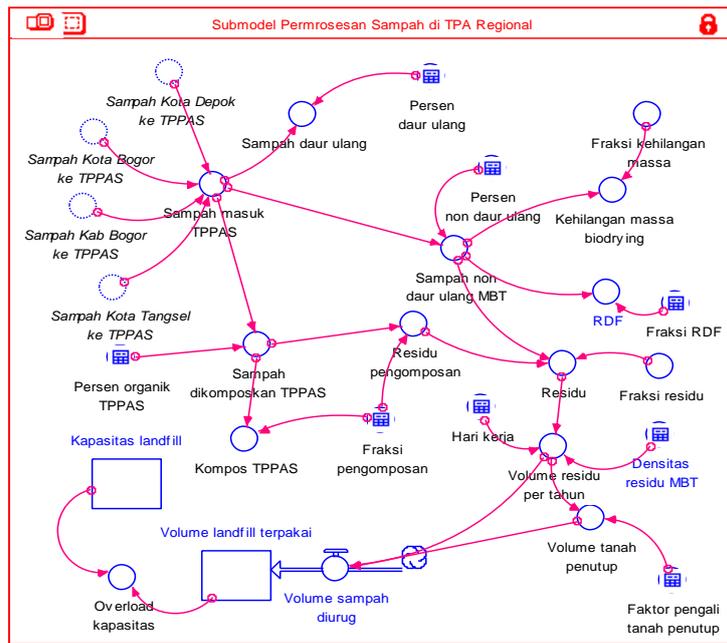
Variabel	Mean Comparison (%)	Error Variance (%)	Keterangan
Populasi penduduk	0,000816%	0,011115%	Valid
PDRB	0,007850%	0,285636%	Valid
Pendapatan per kapita	0,006925%	0,636451%	Valid
Jumlah sampah terangkut	4,497615%	6,510310%	Valid

Tabel 3 menunjukkan contoh hasil validasi data Kota Depok terhadap beberapa variabel, yaitu: populasi penduduk, PDRB, pendapatan per kapita, dan jumlah sampah-sampah terangkut.

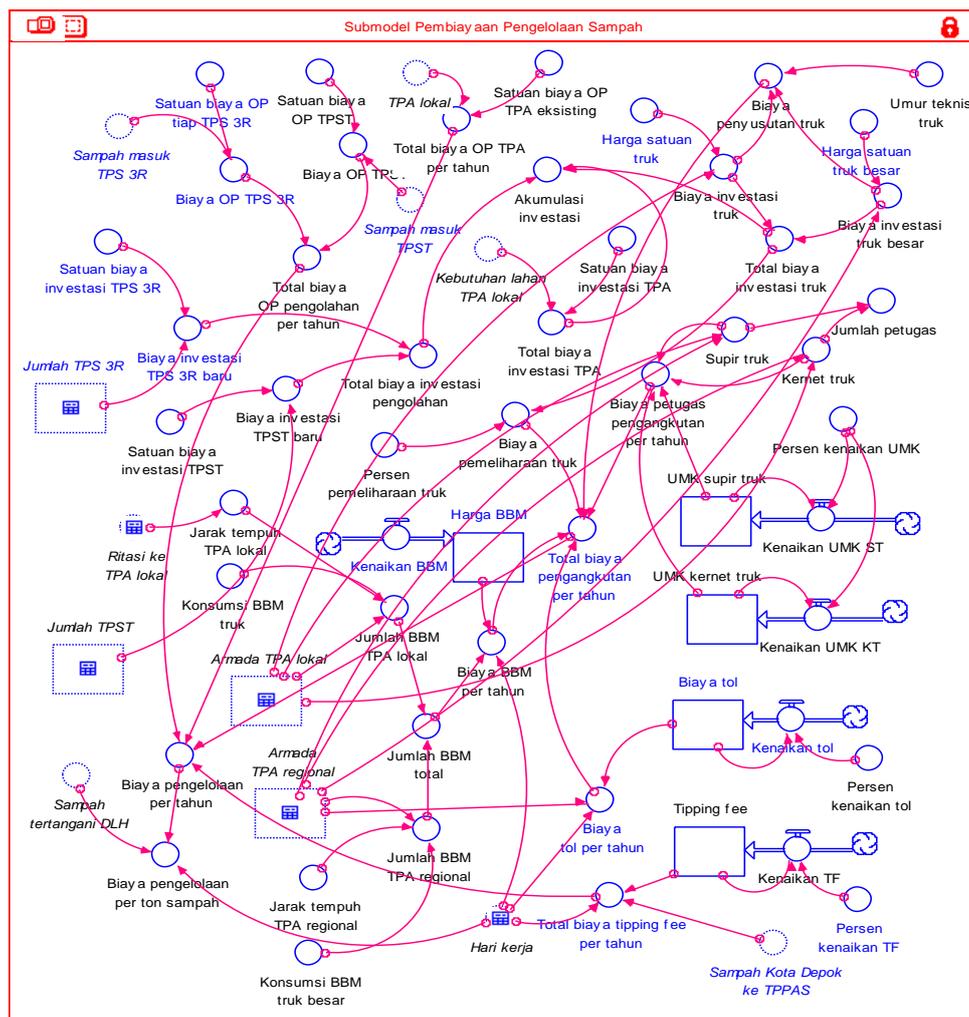
Dari beberapa variabel yang divalidasi tersebut, diperoleh nilai *mean comparison* (E1) < 5% dan *error variance* (E2) < 30% sehingga model dapat dikatakan valid. Validasi juga telah dilakukan pada semua data kota/kabupaten yang dilayani TPPAS Nambo dan didapatkan juga hasil yang valid.



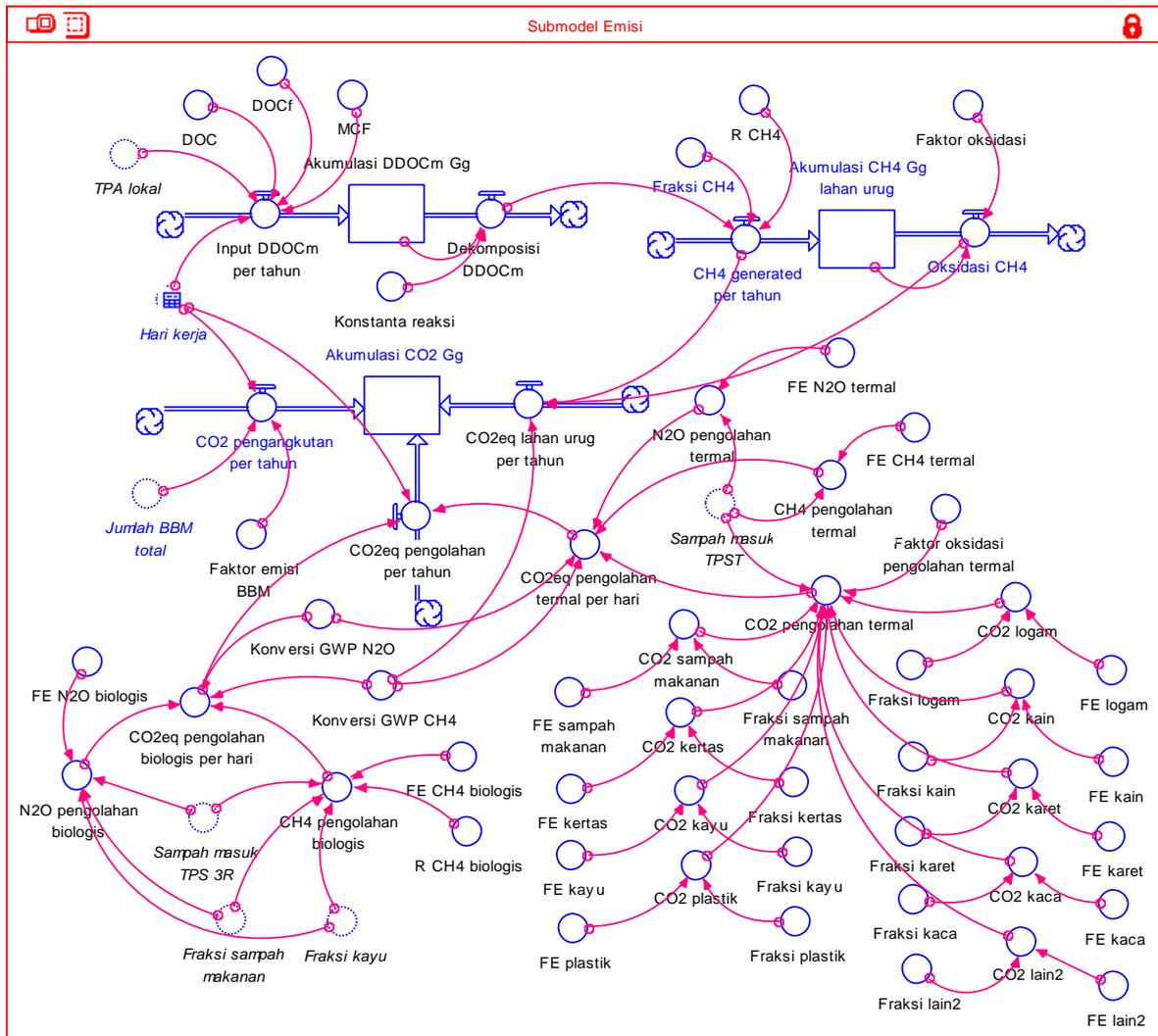
Gambar 4 Stock Flow Diagram Submodel 2: Teknis Operasional



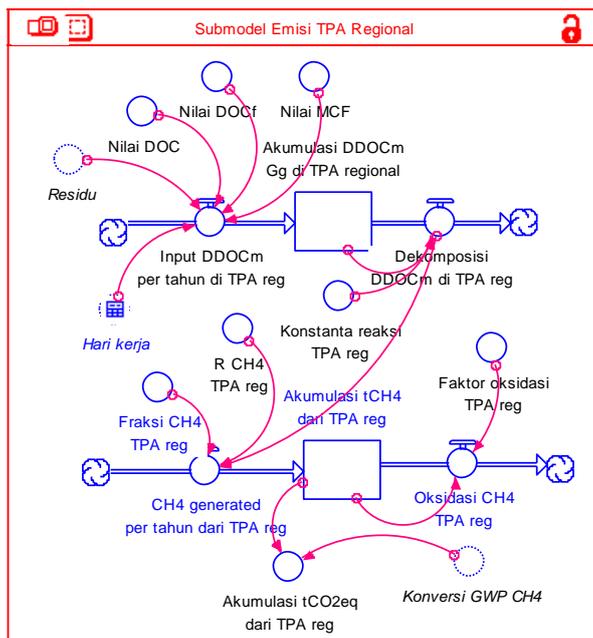
Gambar 5 Stock Flow Diagram Submodel 3: Pemrosesan Sampah di TPPAS Nambo



Gambar 6 Stock Flow Diagram Submodel 4: Pembiayaan Pengelolaan Sampah



Gambar 7 Stock Flow Diagram Submodel 5a: Emisi Kegiatan Pengelolaan Sampah di Kota Masing-masing



Gambar 8 Stock Flow Diagram Submodel 5b: Emisi Kegiatan Pemrosesan Sampah di TPPAS Nambo

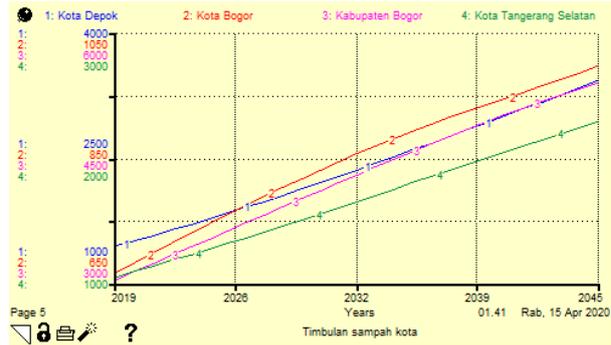
Hasil Simulasi Model

Berdasarkan skenario-skenario yang telah disusun, ditentukan parameter-parameter dan nilai pada setiap skenario. Contoh parameter dan asumsi yang digunakan pada simulasi Kota Depok ditunjukkan pada Tabel 4 berikut. Skenario-skenario tersebut juga diaplikasikan pada Kota Bogor, Kabupaten Bogor dan Kota Tangerang Selatan dengan menggunakan nilai dasar sesuai kondisi masing-masing kota/kabupaten. Dengan nilai dasar masing-masing kota/kabupaten tersebut, simulasi model memberikan hasil seperti yang ditampilkan pada Gambar 9 sampai dengan Gambar 17 berikut.

Simulasi timbulan sampah

Jumlah penduduk di wilayah pelayanan akan terus meningkat meskipun terdapat penurunan laju pertumbuhan penduduk sebesar 0,07%/tahun. Pada tahun 2045, jumlah penduduk Kota Depok diperkirakan mencapai 4.396.037 jiwa, Kota Bogor 1.269.266 jiwa, Kabupaten Bogor 8.100.301 jiwa, dan Kota Tangerang Selatan 2.944.465 jiwa. Timbulan sampah per kapita juga mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan ekonomi. Pada tahun 2045, timbulan sampah di Kabupaten Bogor, Kota Depok, Kota Tangerang Selatan dan Kota Bogor diperkirakan naik masing-masing menjadi 0,67; 0,78; 0,78 dan 0,79 kg/orang/hari.

Gambar 9 berikut menunjukkan perubahan timbulan sampah kota yang dipengaruhi oleh faktor penduduk dan ekonomi. Timbulan sampah Kota Depok yang semula pada tahun 2019 sebanyak 1.444 ton/hari meningkat pada tahun 2045 menjadi 3.426 ton/hari, Kota Bogor dari 667 ton/hari menjadi 996 ton/hari, Kabupaten Bogor dari 3.042 ton/hari menjadi 5.403 ton/hari, dan Kota Tangerang Selatan dari 1.048



Gambar 9 Hasil Simulasi Timbulan Sampah

ton/hari menjadi 2.291 ton/hari. Jumlah ini jauh melebihi dari jatah kuota sampah ke TPPAS Nambo, sehingga masih ada selisih yang harus ditangani pemerintah daerah di masing-masing wilayah pelayanan.

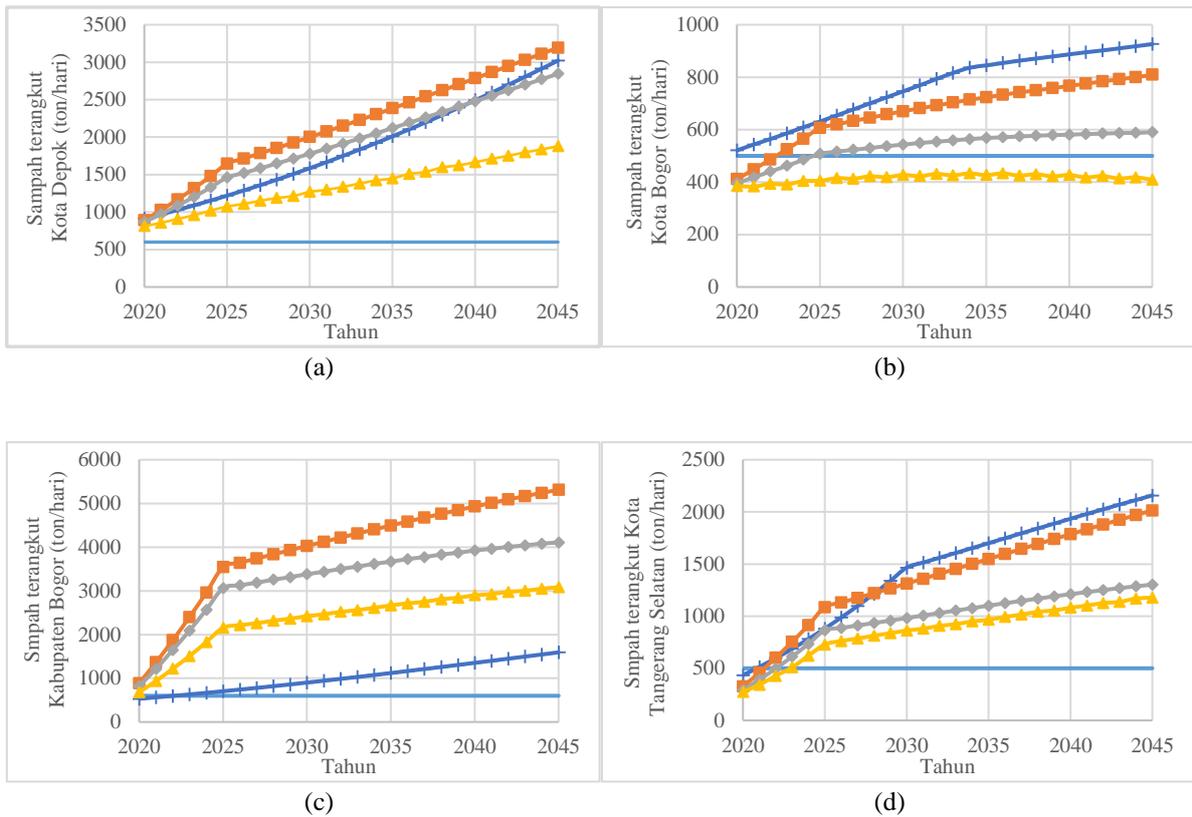
Simulasi sampah terangkut ke TPPAS Nambo

Hasil simulasi dari semua skenario yang ditunjukkan Gambar 10 memperlihatkan bahwa hampir semua skenario memberikan hasil melebihi kuota sampah ke TPPAS Nambo. Hasil simulasi dari skenario A, B, dan C adalah berdasarkan kondisi apabila tingkat pelayanan mencapai 100%. Skenario C yaitu pengurangan sampah 30% memberikan hasil jumlah sampah yang terangkut paling sedikit, namun hanya di Kota Bogor yang nilainya tidak melebihi kuota sampah masuk ke TPPAS Nambo. Penambahan kapasitas pengolahan sampah pada skenario yang diuji masih terlalu kecil bila dibandingkan dengan pertumbuhan timbulan sampah yang besar. Skenario masterplan dari setiap wilayah pelayanan yang diwakilkan oleh skenario B belum signifikan mengurangi sampah. Pada tahun 2045, sampah terangkut ke TPPAS Nambo pada skenario C di Kota

Tabel 4 Contoh Parameter dan Asumsi dalam Skenario Pengelolaan Sampah Kota Depok

Parameter	Satuan	Dasar (2019)	Target 2045		
			Skenario A	Skenario B	Skenario C
Persentase EPR	%	-	-	10% ^a	10% ^a
Persentase tertangani DLH	%	65,5%	100% ^a	90% ^a	80% ^a
Persentase tertangani swasta	%	-	-	-	10% ^a
Persentase tidak tertangani	%	34,5%	-	-	-
Peningkatan persentase EPR	%/tahun	-	-	2%	2%
Peningkatan persentase tertangani DLH	%/tahun	1,00%	5,75%	4,08%	2,42%
Peningkatan persentase swasta	%/tahun	-	-	-	2%
Penambahan BSU	Unit/tahun	-	-	1	20
Penambahan UPS	Unit/tahun	-	-	-	5
Penambahan TPST	Unit/tahun	-	-	-	1
Cakupan pelayanan BSU	KK	89	350	350	350
Cakupan pelayanan UPS	KK	1.607	2000	2000	2000
Cakupan pelayanan TPST	KK	-	-	-	5000
Persentase residu UPS	%	9,28%	30% ^b	30% ^b	30% ^b
Persentase residu TPST ^c	%	-	10%	10%	10%

Keterangan: ^a Target tercapai tahun 2025, ^b Persentase residu menjadi naik karena diasumsikan seluruh jenis sampah masuk ke UPS dari yang sebelumnya hanya mengolah sampah mudah terurai, ^c Asumsi teknologi insinerator.



Keterangan:

- Kuota sampah
- + Skenario BAU
- Skenario A : Optimalisasi
- ◇ Skenario B : Masterplan
- ▲ Skenario C : Jakstrada

Gambar 10 Hasil Simulasi Sampah Terangkut ke TPPAS Nambo dari (a) Kota Depok, (b) Kota Bogor, (c) Kabupaten Bogor, dan (d) Tangerang Selatan

Depok, Kota Bogor, Kabupaten Bogor, dan Kota Tangerang Selatan diperkirakan masing-masing sebesar 1.880; 409; 3.083; dan 1.177 ton/hari. Selisih jumlah sampah yang membutuhkan pemrosesan di TPA lokal dari skenario C di Kota Depok, Kabupaten Bogor, dan Kota Tangerang Selatan masing-masing sebesar 1.180; 2.484; dan 677 ton/hari.

Simulasi kebutuhan lahan

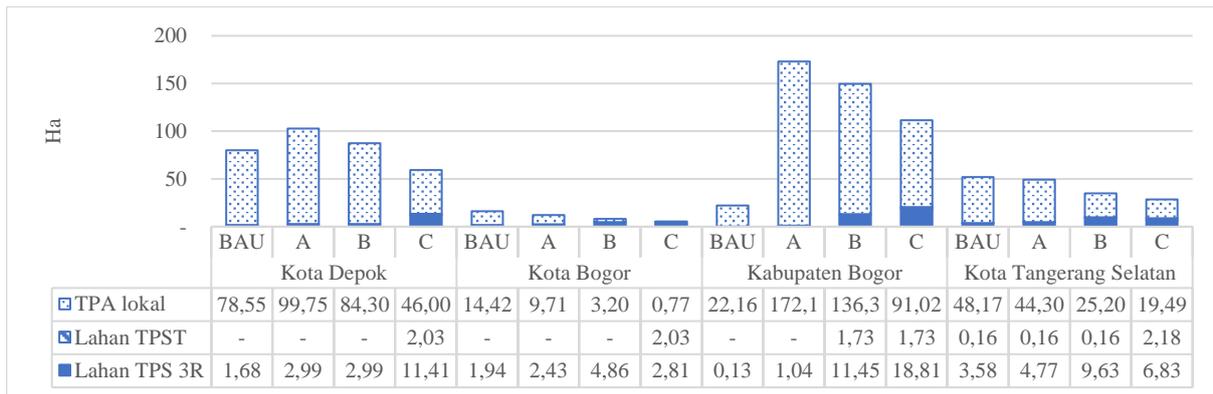
Jumlah timbulan sampah dan sampah terangkut ke TPPAS Nambo menunjukkan jumlah yang sangat besar bila dibandingkan dengan jatah kuota sampah ke TPPAS Nambo sehingga pemerintah daerah tetap perlu menyiapkan TPA lokal untuk mengatasi selisih sampah tersebut. Kondisi TPA eksisting di hampir semua wilayah pelayanan saat ini sudah over-kapasitas sehingga diperlukan penambahan lahan urug baru.

Gambar 11 menunjukkan hasil simulasi kebutuhan lahan untuk UPS, TPST, dan lahan urug dari tahun 2020 hingga 2045. Porsi kebutuhan lahan paling besar pada hampir semua skenario adalah lahan urug.

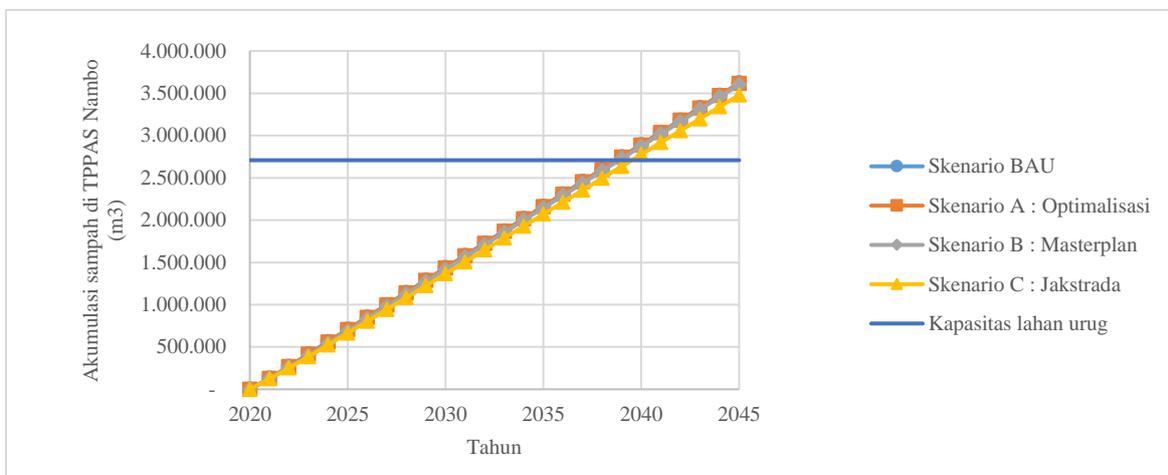
Pada kondisi tingkat pelayanan 100%, lahan yang dibutuhkan akan semakin luas dimana hal ini diwakili oleh hasil skenario A. Namun dengan adanya peningkatan bank sampah dan pengolahan sampah di TPS 3R dan TPST akan mengurangi kebutuhan lahan seperti yang terlihat dari hasil skenario B dan C. Secara keseluruhan total lahan yang dibutuhkan menunjukkan pengurangan seiring dengan peningkatan pengolahan sampah. Perkiraan total kebutuhan lahan dari skenario C di Kota Depok, Kota Bogor, Kabupaten Bogor, dan Kota Tangerang Selatan masing-masing sebesar 59,44; 5,61; 111,56; dan 28,5 ha.

Simulasi akumulasi sampah diurug

Hasil simulasi sampah diurug di TPPAS Nambo yang ditunjukkan pada Gambar 12 menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan signifikan yang diberikan dari ketiga skenario. Hal ini dikarenakan jumlah sampah yang terangkut ke TPPAS Nambo diperkirakan akan selalu maksimum sebab jumlah timbulan sampah kota yang sangat besar jauh melebihi jatah kuota sampah. Berdasarkan hasil simulasi, lahan urug



Gambar 11 Hasil Simulasi Total Kebutuhan Lahan Hingga Tahun 2045



Gambar 12 Hasil Simulasi Akumulasi Sampah diurug di TPPAS Nambo

TPPAS Nambo akan penuh pada tahun 2039 atau 2040 sehingga pemerintah provinsi selaku pengelola TPA regional perlu menambah zona lahan urug baru.

Simulasi biaya pengelolaan sampah

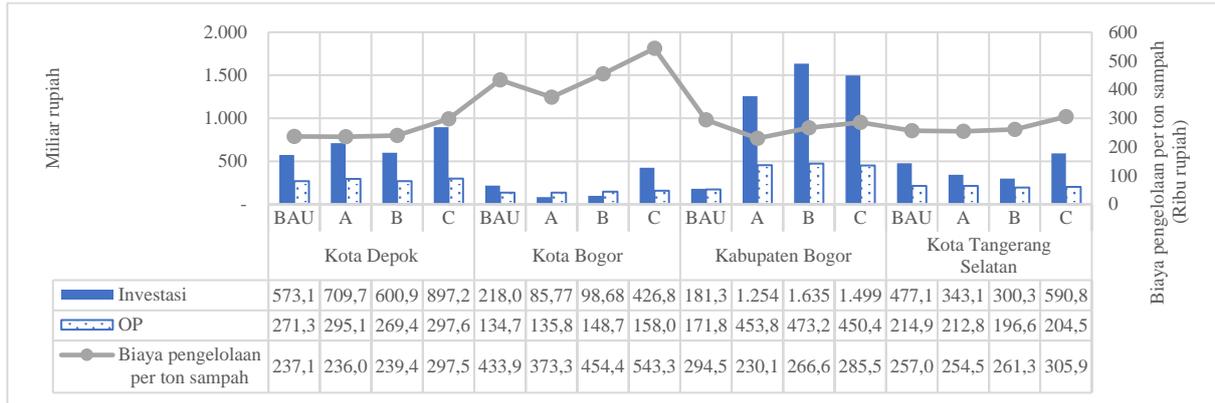
Dari hasil simulasi semua skenario ditunjukkan pada Gambar 13 diketahui bahwa rata-rata skenario C membutuhkan biaya investasi paling tinggi, namun biaya OP dari setiap skenario menunjukkan perbedaan yang tidak signifikan. Apabila dihitung biaya pengolahan per ton sampah dari perbandingan antara biaya OP dengan jumlah sampah yang dikelola DLH, hasil simulasi menunjukkan biaya pengelolaan per ton sampah akan semakin mahal seiring dengan semakin banyak kegiatan pengolahan sampah yang dilakukan. Perkiraan biaya pengolahan per ton sampah dari skenario C pada tahun 2045 di Kota Depok, Kota Bogor, Kabupaten Bogor, dan Kota Tangerang Selatan masing-masing sebesar Rp 297.584; Rp 543.345; Rp 285.532; dan Rp 305.902.

Secara umum skenario C membutuhkan biaya investasi lebih tinggi dibanding skenario lainnya.

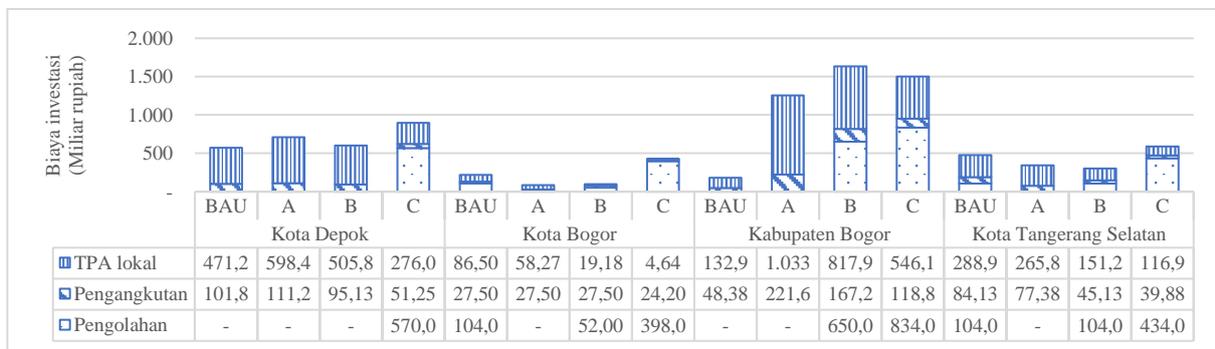
Akumulasi biaya investasi hingga tahun 2045 yang diperlukan dari skenario C di Kota Depok, Kota Bogor, Kabupaten Bogor, dan Kota Tangerang Selatan masing-masing sebesar Rp 897 M, Rp 427 M, Rp 1.499 M, dan Rp 591 M.

Gambar 14 memperlihatkan besarnya kontribusi dari masing-masing komponen perhitungan biaya investasi. Pada skenario A dan B, rata-rata komponen biaya investasi yang paling mahal adalah lahan urug. Sementara itu pada skenario C, komponen biaya pengolahan lebih mahal karena terdapat penambahan TPST secara berkala. Hasil simulasi menunjukkan seiring dengan meningkatnya biaya investasi pengolahan sampah, maka biaya pengangkutan dan biaya TPA lokal juga akan menurun.

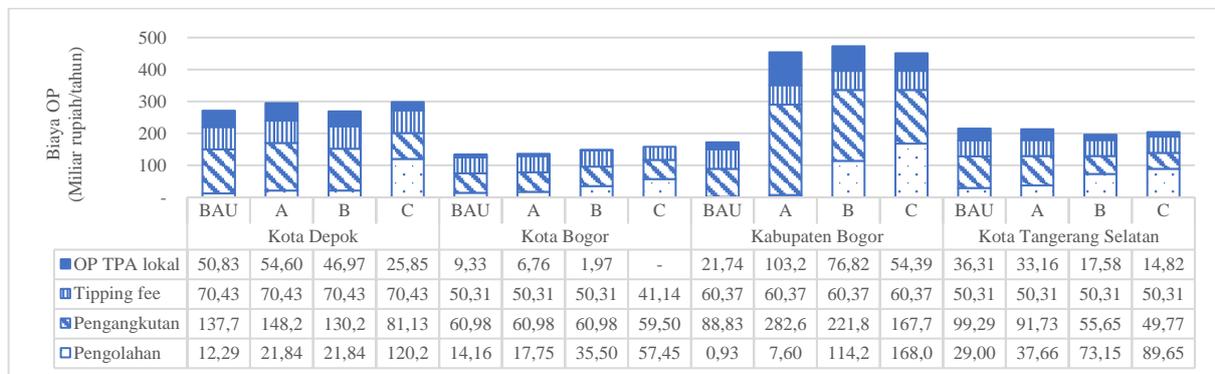
Gambar 15 memperlihatkan rincian biaya OP. Pada skenario A dan B, rata-rata komponen biaya OP terbesar adalah biaya pengangkutan, sedangkan pada skenario C adalah biaya pengolahan. Dari skenario B terlihat bahwa kombinasi antara pengurangan melalui EPR dan penambahan bank sampah per tahun



Gambar 13 Hasil Simulasi Total Kebutuhan Biaya Investasi, OP per tahun, dan Pengolahan per Ton Sampah Hingga Tahun 2045



Gambar 14 Hasil Simulasi Rincian Kebutuhan Biaya Investasi pada Tahun 2045



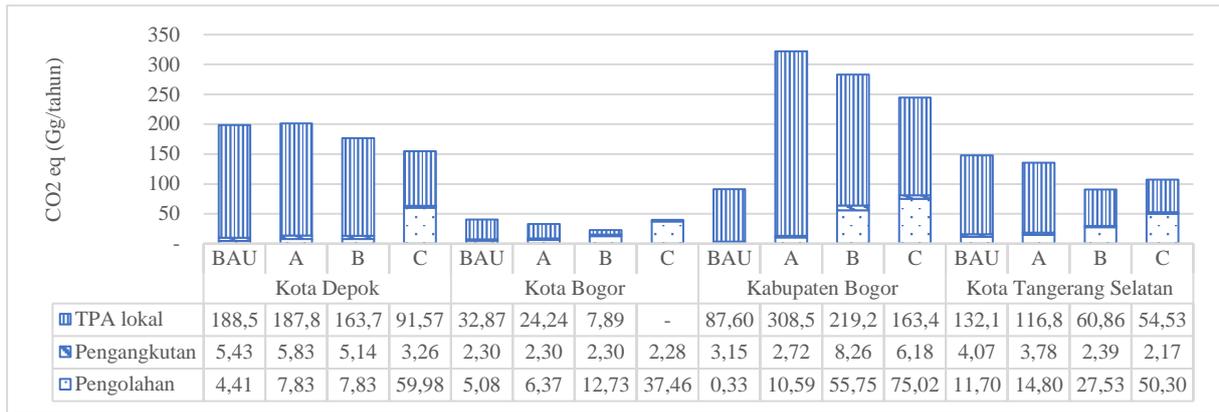
Gambar 15 Hasil Simulasi Rincian Kebutuhan Biaya OP pada Tahun 2045

mampu menurunkan biaya pengangkutan dan biaya OP TPA lokal, namun hal tidak signifikan menaikkan biaya pengolahan sampah yang ditanggung pemerintah daerah karena pembiayaan bank sampah seluruhnya dikelola masyarakat. Sementara itu, dari skenario C terlihat bahwa secara keseluruhan kenaikan biaya OP ternyata tidak signifikan meskipun terdapat banyak penambahan fasilitas pengolahan sampah. Perbedaan yang tidak signifikan ini karena sebenarnya terjadi peralihan biaya yang semula dialokasikan untuk pengangkutan dan TPA menjadi untuk pengolahan sampah. Total biaya OP pada tahun 2045 dari skenario C di Kota Depok, Kota Bogor,

Kabupaten Bogor, dan Kota Tangerang Selatan masing-masing sebesar Rp 298 M, Rp 158 M, Rp 450 M, dan Rp 205 M.

Simulasi emisi pengelolaan sampah

Gambar 16 memperlihatkan dinamika beban emisi yang dihasilkan dari kegiatan pengolahan sampah, pengangkutan sampah, dan pemrosesan di TPA lokal. Dari gambar tersebut diketahui bahwa emisi paling besar dihasilkan dari dekomposisi lahan urug TPA. Akumulasi beban emisi secara keseluruhan yang ditunjukkan pada Gambar 17 menunjukkan pada tingkat pelayanan 100%, nilai beban emisi pada



Gambar 16 Hasil Simulasi Rincian Beban Emisi dari Kegiatan Pengelolaan Sampah per Tahun pada Tahun 2045



Gambar 17 Hasil Simulasi Rincian Akumulasi Beban Emisi Tahun 2045

skenario A yang meningkat dibanding skenario BAU. Adanya peningkatan pengolahan sampah seperti yang terdapat pada skenario B dan C, rata-rata menunjukkan penurunan total emisi karena emisi yang dihasilkan dari proses pengolahan lebih kecil bila dibandingkan dengan emisi lahan urug.

KESIMPULAN

Melalui validasi model, pemodelan sistem dinamik terbukti dapat diaplikasikan untuk menganalisis berbagai macam faktor yang terkait dengan pengelolaan sampah di wilayah pelayanan TPPAS Nambo. Peningkatan timbulan sampah di 4 (empat) wilayah pelayanan, yaitu: Kota Depok, Kota Bogor, Kota Tangerang Selatan, dan Kabupaten Bogor, berkonsekuensi pada kebutuhan peningkatan biaya pengelolaan sampah, terutama untuk pengangkutan dan pengolahan sampah.

Terdapat 4 (empat) skenario pengelolaan sampah yang dikembangkan untuk mengantisipasi dioperasikannya TPPAS Nambo ini. Hasil simulasi keempat skenario menunjukkan bahwa karena keterbatasan kapasitas pengolahan sampah di TPPAS Nambo maka fasilitas pengelolaan sampah tetap dibutuhkan secara mandiri untuk mengelola sampah yang dihasilkan masing-masing kota/kabupaten.

Dari keempat skenario tersebut maka skenario C, yaitu pengurangan sampah hingga 30% sesuai Jakstrada, merupakan skenario yang paling optimal bila mempertimbangkan jumlah timbulan sampah yang harus dikelola, biaya operasional, kebutuhan lahan untuk TPA dan emisi lingkungan. Akan tetapi, skenario C mensyaratkan adanya kebutuhan fasilitas penanganan sampah di sumber yang lebih besar.

Hasil simulasi lainnya memperlihatkan biaya pengolahan sampah pada tahun 2045 dari skenario C Jakstrada di Kota Depok sebesar Rp 297.584/ton, Kota Bogor Rp 543.345/ton, Kabupaten Bogor Rp 285.532/ton, dan Kota Tangerang Selatan Rp 305.902/ton. Besaran ini lebih besar dibandingkan biaya eksisting yang dikeluarkan oleh setiap kota dan kabupaten sehingga diperlukan penyiapan anggaran daerah yang lebih memadai agar rencana pengoperasian TPPAS Nambo dapat berjalan dengan baik dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dapat terlaksana dengan baik berkat bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu, peneliti mengucapkan terima kasih kepada Kementerian PUPR, DLH Jawa Barat, DLH Kota Depok, DLH Kota Bogor, DLH Kabupaten Bogor, dan DLH Kota

Tangerang Selatan yang telah memfasilitasi pengumpulan data dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abraham, Razii. 2017. "Model Simulasi Dinamik Pengelolaan Sampah Padat Permukiman Berbasis Program 3R di Kota Bogor (Tugas Akhir)." Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Al-Khatib, Issam A, Derar Eleyan, dan Joy Garfield. 2015. "A system dynamics model to predict municipal waste generation and management costs in developing areas." *The Journal of Solid Waste Technology and Management* 41 (2): 109-20. <https://doi.org/10.5276/JSWTM.2015.109>.
- Anggraini, Fitriyani. 2011. "Aspek Kelembagaan pada Pengelolaan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah Regional." *Jurnal Permukiman* 6 (2): 78-84.
- Bala, Bilash Kanti, Fatimah Mohamed Arshad, dan Kusairi Mohd Noh. 2017. "Modelling of Solid Waste Management Systems of Dhaka City in Bangladesh." In *System Dynamics*, 249-74. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2045-2_12.
- Barlas, Yaman. 1989. "Multiple tests for validation of system dynamics type of simulation models." *European Journal of Operational Research* 42 (1): 59-87. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(89\)90059-3](https://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90059-3).
- BPS Kabupaten Bogor. 2019. "Kabupaten Bogor Dalam Angka."
- BPS Kota Bogor. 2019. "Kota Bogor Dalam Angka."
- BPS Kota Depok. 2019. "Kota Depok Dalam Angka."
- BPS Kota Tangerang Selatan. 2019. "Kota Tangerang Selatan Dalam Angka."
- Cai, Lin, dan Ying Liu. 2013. "Application of system dynamics for municipal waste management in China: a case study of Beijing." In *Conference Proceedings of the 31st International Conference of the System Dynamics Society*, 21-25.
- Chaerul, Mochammad, Masaru Tanaka, dan Ashok V. Shekdar. 2008. "A system dynamics approach for hospital waste management." *Waste Management* 28 (2): 442-49. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.01.007>.
- Fauzan, Andi Yasser. 2017. "Strategi pengelolaan sampah untuk mengurangi timbunan sampah plastik (Sistem pengelolaan sampah dengan simulasi model sistem dinamik di Pulau Pramuka Kabupaten Administrasi Kepulauan Seribu (Tesis)." Universitas Indonesia, Depok.
- Febriyanto, Ricky. 2016. "Strategi Pengelolaan Sampah Kota melalui Penerapan Alternatif Kebijakan Lingkungan (Tesis)." Universitas Indonesia, Depok.
- Giannis, Apostolos, Miaojun Chen, Ke Yin, Huanhuan Tong, dan Andrei Veksha. 2017. "Application of system dynamics modeling for evaluation of different recycling scenarios in Singapore." *Journal of Material Cycles and Waste Management* 19 (3): 1177-85. <https://doi.org/10.1007/s10163-016-0503-2>.
- Handono, Mulyo. 2010. "Model Pengelolaan Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Sampah secara Berkelanjutan di TPA Cipayung Kota Depok-Jawa Barat (Disertasi)." Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Kholil. 2005. "Rekayasa Model Sistem Dinamik Pengelolaan Sampah Terpadu Berbasis Nirlimbah (Zero Waste) Studi Kasus di Jakarta Selatan (Disertasi)." Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Popli, Kanchan, Gamal Luckman Sudibya, dan Seungdo Kim. 2017. "A Review of Solid Waste Management using System Dynamics Modeling." *Journal of environmental science international* 26 (10): 1185-1200. <https://doi.org/10.5322/JESI.2017.26.10.1185>.
- Rahayu, N, T Arai, G Yudoko, dan H Morimoto. 2013. "System dynamics models for planning long-term integrated municipal solid waste management in Bandung city." *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 179: 1153-68. <https://doi.org/10.2495/SC130982>.
- Sterman, Jhon D. 2002. "System Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World 31."
- UPTD PSTR Jawa Barat. 2018. "Rencana Pembangunan dan Pengelolaan TPPAS Regional Nambo."
- Wildanurrisal, Wildanurrisal, Achmad Bahauddin, dan Putro Ferro Ferdinant. 2014. "Perancangan Model Simulasi Pengelolaan Sampah Dengan Pendekatan Sistem Dinamis Di Kota Cilegon." *Jurnal Teknik Industri Untirta* 2 (3).
- Yudiyanto. 2007. "Analisis Sistem Pengelolaan Sampah Permukiman di Kota Bogor." (Tesis) Institut Pertanian Bogor.
- Zulfinar, Zulfinar, dan Emenda Sembiring. 2015. "Dinamika Jumlah Sampah Yang Dihasilkan Di Kota Bandung." *Jurnal Teknik Lingkungan* 21 (1): 18-28. <https://doi.org/10.5614/jtl.2015.21.1.3>.