

MODEL SISTEM DINAMIS SUSTAINABILITAS LINGKUNGAN PADA INDUSTRI DAUR ULANG KOMPUTER

Roesfiansjah Rasjidin

Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Esa Unggul,
Jl. Arjuna Utara No. 9, Kebon Jeruk, Jakarta
roesfiansjah.rasjidin@esaunggul.ac.id

Abstrak

Penggunaan komputer dan produksi limbahnya yang meningkat secara signifikan dan diikuti oleh persentase daur ulang yang rendah berpotensi untuk mencemari lingkungan terkait kandungan bahan berbahaya dan beracun pada part-part komputer. Sementara itu, tanpa daur ulang akan terus terjadi peningkatan eksploitasi dan konsumsi sumber daya alamiah. Kedua kondisi ini membawa pada ketidakberlanjutan lingkungan yang akan menurunkan kualitas hidup. Penelitian ini mengembangkan model konseptual sustainability lingkungan pada industri daur ulang komputer yang dirancang oleh Rasjidin (2014). Pengembangan model menggunakan pendekatan sistem dinamis (SD) untuk mendesain Stock-and-Flow Diagram dan formulasi matematika terkait. Skenario simulasi dinamis merupakan kombinasi empat exogenous variabels, yaitu persentase pengumpulan, persentase part dibuat perusahaan sendiri, persentase penggantian part oleh supplier dan persentase daur ulang, dengan dua level pada tiap faktor, digunakan untuk mengevaluasi kuantitas material hasil daur ulang, pembuangan sisa daur ulang secara terkendali, part-part yang diganti oleh supplier, dan pembuangan part-part komputer secara tidak terkendali. Sejumlah rekomendasi diberikan dalam operasi pengelolaan sustainability lingkungan pada industri daur ulang komputer. Beberapa pengembangan penelitian di masa datang juga telah direkomendasikan untuk dapat dilakukan oleh para peneliti yang juga meminati bidang ini.

Kata kunci: Sustainability lingkungan, *reverse logistics*, sistem dinamis, daur ulang komputer

Pendahuluan

Penggunaan produk elektronik dunia khususnya komputer mengalami pertumbuhan yang sangat pesat dalam beberapa dekade lalu. Selama dekade akhir, pasar global personal computer (PC) meningkat hampir tiga kali lipat, dari 128.1 juta di tahun 2001 menjadi 352.8 juta di tahun 2011 (Gartner, 2012). Pada dekade mendatang, penjualan produk elektronik di manca negara seperti China, India, Afrika dan Amerika Latin diperkirakan akan meningkatkan tajam (UNEP, 2010). Seiring dengan perjalanan waktu, produk elektronik dengan volume yang tinggi ini tidak lagi memenuhi fungsi dan unjuk kerja yang diharapkan oleh pemiliknya, sehingga tidak digunakan lagi dan dibuang. Hal ini menyebabkan peningkatan limbah elektronik (electronic waste, e-waste) dengan volume besar dari waktu ke waktu. Diperkirakan, produksi limbah elektronik dunia meningkat sekitar 40 juta ton per tahun (UNEP, 2010).

Akan tetapi, hanya sebagian kecil dari limbah elektronik ini yang didaur ulang (recycled). Sebagai contoh, kuantitas limbah elektronik dari televisi, komputer dan produk komputer di Australia mencapai 16.8 juta unit pada periode 2007-2008, namun hanya 10 persen yang didaur ulang dan 84% berakhir di tempat pembuangan akhir (landfill) (IAG, 2009). Pembuangan limbah peralatan listrik

dan elektronik (Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE) ke landfill ini sangat terkait dengan isu deteriorasi lingkungan. Beberapa bahan berbahaya dan beracun (hazardous and toxic materials) seperti lead, mercury, cadmium and beryllium, terkandung dalam limbah ini. Bahan-bahan berbahaya dan beracun ini dapat berpindah dan keluar dari landfill dan selanjutnya memberikan ancaman serius bagi kesehatan manusia dan merusak ekologi (TEC, 2008 dan ATSDR, 2011).

Situasi yang mengancam sustainability lingkungan ini telah mendorong berbagai pihak di beberapa negara maju yang berkepentingan dengan kondisi lingkungan, terutama pemerintah dan parlemen, untuk menekan dampak WEEE dengan mengeluarkan peraturan dan kebijakan terkait. Uni Eropa telah mengawali upaya meminimasi pencemaran lingkungan oleh WEEE melalui dua regulasi yaitu the Waste Electrical and Electronic Equipment Directive (WEEE Directive) dan the Restriction of Hazardous Substances Directive (RoHS Directive) yang ditetapkan pada tahun 2002 dan diberlakukan pada Februari 2003. Kedua kebijakan ini mendorong peningkatan tanggungjawab produsen dalam mengelola limbah peralatan listrik dan elektronik mereka sendiri. Demikian juga Australia, sejak 8 Agustus 2011 telah memberlakukan kebijakan serupa yang disebut

The Product Stewardship Act 2011. Legislasi ini ditujukan untuk “mengurangi limbah dan mencegah bahan-bahan berbahaya untuk dibuang ke landfill melalui peningkatan daur ulang (recycling) dan pemulihan bahan-bahan bernilai dalam produk” (DSEWPC, 2011).

Gejala-gejala ketidakberlanjutan lingkungan terkait limbah komputer tersebut telah menginspirasi Rasjidin (2014) untuk melakukan studi dalam rangka: memahami operasi reverse logistics daur ulang komputer; mengidentifikasi variabel-variabel penting dalam reverse logistics daur ulang komputer terkait sustainability lingkungan; dan merancang model konseptual pengelolaan reverse logistics daur ulang komputer dengan menggunakan sustainability lingkungan sebagai kriteria performansi atau kinerja sistem. Menindaklanjuti studi di atas, permasalahan dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut: (a) Bagaimana struktur Stock-and-Flow Diagram dari sistem?; (b) Apa formulasi persamaan-persamaan matematika untuk seluruh variabel pada Stock-and-Flow Diagram dari sistem?; (c) Apa exogenous variables dan skenario simulasi untuk menggali karakter dinamis pada sistem?; dan (d) Apa rekomendasi terkait perilaku dinamis sistem yang telah dievaluasi?

Kajian Literatur

Daur ulang (recycling) sebagai sebuah opsi pemulihan dalam reverse chain telah dikaji oleh beberapa peneliti yaitu Spengler dan Schroter (2003), Kumar dan Yamaoka (2007), Georgiadis dan Besiou (2008a), Georgiadis dan Besiou (2008b), Georgiadis dan Besiou (2010), dan Guizzi et al. (2012). Sebuah pengelolaan strategis suku cadang dalam closed loop supply chain yang terdiri atas supplier, manufacturer dan distributor pada forward channel dan aktifitas daur ulang pada backward channel telah diusulkan dengan menggunakan pendekatan Sistem Dinamis untuk memaksimalkan keuntungan sebagai sebuah kriteria evaluasi yang dipengaruhi oleh proses penuaan peralatan (Spengler dan Schroter, 2003). Kumar dan Yamaoka (2007) juga mengkaji opsi pemulihan dengan daur ulang dalam closed-loop supply chain dengan menggunakan metoda Sistem Dinamis. Namun, forward channel yang dilibatkan adalah manufacturer dan consumer; sementara reverse channel mencakup remanufacturer dan recycler. Evaluasi dilakukan terhadap kebijakan pemerintah yang mempengaruhi perilaku jangka panjang tiga elemen logistik pada industri otomotif Jepang yaitu ekspor mobil bekas, persediaan remanufacturer dan persediaan bahan baku. Sebuah model Sistem Dinamis untuk closed-loop supply chain dengan DfE (Design for Environment) dan aktifitas-aktifitas

daur ulang dibawah pengaruh legislasi lingkungan dan GIF (Green Image Factor) telah dikembangkan oleh Georgiadis dan Besiou (2008a) untuk memelihara ketersediaan sumber daya alamiah dan landfill. Aktifitas-aktifitas yang dilibatkan dalam sistem mencakup: pengadaan sumberdaya alamiah (bahan tidak terbarukan), produksi, distribusi, penggunaan produk, dan pengumpulan produk bekas, dismantling, sorting, recycling dan disposal. Studi ini dikembangkan lebih jauh oleh Georgiadis dan Besiou (2008b) dengan melibatkan beberapa faktor berpengaruh dan ukuran performansi yang berbeda. Faktor-faktor berpengaruh tersebut adalah beberapa bentuk legislasi lingkungan yaitu persentase pengumpulan (collection percentage), persentase daur ulang (recycling percentage), kemampuan mendaur ulang (recyclability) dan kandungan yang didaur ulang (recycled content). Sementara kinerja sistem diukur dengan sustainability lingkungan melalui konservasi sumber daya alamiah dan landfill.

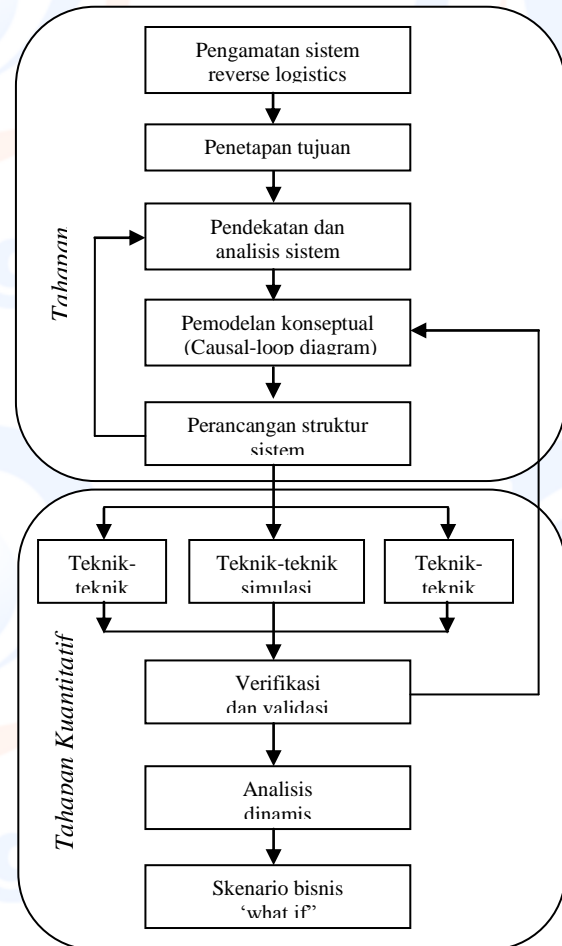
Kajian lebih lanjut dengan menggunakan metoda yang sama dilakukan oleh Georgiadis dan Besiou (2010) dengan melibatkan sustainability lingkungan dan ekonomi pada closed-loop supply chain limbah peralatan listrik dan elektronik (Waste Electric and Electronics Equipment, WEEE) dengan opsi recovery berbentuk daur ulang. Sustainability lingkungan diukur melalui ketersediaan sumberdaya alamiah dan landfill; dan sustainability ekonomi diwakili oleh total keuntungan supply chain. Pada studi berikutnya terkait industri peralatan listrik dan elektronik (Electric and Electronics Equipment, EEE), Guizzi et al. (2012) menguji rute kendaraan untuk meminimasi total jarak yang ditempuh dan jumlah kendaraan yang digunakan. Berbeda dengan studi-studi sebelumnya, forward channel tidak dilibatkan dalam studi ini. Sementara reverse channel terdiri dari waste generator, collection centre, dan treatment centre dimana dilakukan aktifitas daur ulang (recycling). Sebagaimana Guizzi et al. (2012), penelitian Rasjidin (2014) tentang model konseptual sustainability lingkungan pada industri daur ulang komputer mencakup sistem reverse logistics dengan opsi recycling pada industri elektrikal/elektronik. Model konseptual yang dihasilkan mencakup rancangan reverse logistics dan Causal Loop Diagram (CLD) sustainability lingkungan pada industri daur ulang komputer. Beberapa pengembangan dilakukan Rasjidin (2014) pada model konseptual tersebut dengan melibatkan kebijakan lingkungan sebagai variabel keputusan untuk mengevaluasi performansi berperspektif lingkungan.

Metodologi Sistem Dinamis

Pada penelitian ini, metodologi digunakan untuk mengembangkan sebuah model konseptual berbasis Sistem Dinamis tentang reverse logistics dengan daur ulang pada industri komputer untuk mengukur sustainability lingkungan. Interdependensi, interaksi mutual, feedback informasi, dan kausalitas sirkular terkandung dalam sistem reverse logistics yang akan dikaji. Sehubungan dengan karakteristik-karakteristik dinamis ini, maka metoda Sistem Dinamis dipertimbangkan sebagai metoda yang memadai untuk digunakan dalam merepresentasikan berbagai karakteristik esensial yang terlibat dalam sistem yang diobservasi (Sterman, 2000; Richardson, 2008). Secara umum, prinsip-prinsip Sistem Dinamis yang populer adalah sama. Dalam penelitian ini, metodologi Sistem Dinamis dari Sterman (2000) diadopsi dan dimodifikasi untuk perancangan model konseptual Sistem Dinamis terkait reverse logistics opsi daur ulang pada industri komputer, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 1. Adopsi model Sterman terutama berdasarkan presentasi yang lebih mudah dimana dapat dipahami dengan kemampuan formalisasi matematika yang minimum. Meskipun demikian, model Sterman ini tidak mengorbankan ketelitian sebuah scientific method. Pengadopsian model ini juga ditemui pada sejumlah kajian Sistem Dinamis seperti Georgiadis dan Vlachos (2004), dan Tan dan Kumar (2006).

Pada Gambar 1, terlihat bahwa keseluruhan prosedur pada metoda Sistem Dinamis dikategorikan atas dua fase analisis, yaitu kualitatif dan kuantitatif. Tahapan kualitatif diawali dengan pengamatan yang menyeluruh tentang sistem yang menjadi perhatian, yaitu sistem reverse logistics pada industri komputer, untuk memfasilitasi pengidentifikasian tujuan-tujuan penelitian dan pemodelan. Selanjutnya, pendekatan dan analisis sistem diterapkan pada sistem yang diobservasi dengan memilih dengan tepat semua entitas dan variabel yang terkait dengan tujuan-tujuan dalam rangka mendapatkan sebuah sistem yang sederhana dan terdefinisi dengan baik. Pada tahapan berikutnya, sistem tersebut digunakan untuk mengembangkan diagram sebab akibat (causal loop diagram) yang kemudian ditransformasikan menjadi diagram persediaan dan aliran (stock and flow diagram). Selama tahapan kuantitatif, stock and flow diagram ditranslasikan ke sebuah program simulasi dengan menggunakan perangkat lunak Sistem Dinamis untuk mengembangkan model-model dinamis. Setelah model awal diperoleh, lalu dilakukan verifikasi dan validasi secara iteratif untuk mendapatkan model yang memadai. Selanjutnya, eksekusi program dilakukan melalui berbagai skenario 'what-if' yang kemudian diikuti

dengan analisis terhadap hasil-hasil simulasi. Penelitian yang akan dilakukan ditujukan untuk membangun model sistem dinamis sustainability lingkungan pada industri daur ulang komputer sebagai bentuk pengembangan dari penelitian Rasjidin (2014b). Dengan demikian, metode Sistem Dinamis yang akan digunakan akan mencakup penyusunan Stock-and-Flow Diagram pada tahapan kualitatif dan diteruskan hingga tahapan kuantitatif.



Gambar 1
Metodologi sistem dinamis

(Sterman, 2000; Georgiadis and Vlachos, 2004; Rasjidin et al., 2012b)

Hasil dan Pembahasan Stock-and-Flow Diagram untuk Sustainability Lingkungan pada Industri Daur Ulang Komputer

Stock-and-Flow Diagram (SFD) pada penelitian ini dikembangkan berdasarkan hasil penelitian Rasjidin (2014) tentang model konseptual sustainability lingkungan pada industri daur ulang komputer yang mencakup rancangan reverse logistics dan Causal Loop Diagram (CLD) sustainability lingkungan pada industri daur ulang komputer. SFD, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2, menggambarkan aliran fisik pada sistem

daur ulang pada industri komputer. SFD dimulai pada variabel *Return Rate* dan berakhir pada variabel *Recycled Materials*, *Controlled Disposals*, *Replaced Parts*, dan *Uncontrolled Disposals*.

Setelah pelanggan menggunakan komputer untuk periode waktu tertentu, akan ditemui aliran balik (reverse flow) komputer terkait perbaikan komputer, masa pakai yang sudah memenuhi harapan pelanggan atau berakhirnya umur ekonomis komputer, yang diwakili oleh variabel *Return Rate*. Aliran part-part komputer ini diakumulasi melalui sebuah variabel *Part Returns*, yang menunjukkan level atau jumlah part komputer pada waktu tertentu. Berdasarkan variabel *Collection Percentage* sebagai bagian dari regulasi, level *Part Returns* akan dialirkan melalui variabel *Collecting Rate* yang menunjukkan aliran pengumpulan part dan variabel *Uncontrolled Disposing Rate* yang mewakili aliran pembuangan part secara tidak terkendali. Aliran part pada variabel *Collecting Rate* akan diakumulasi pada variabel *Collected Parts* yang merupakan level part-part komputer yang telah dikumpulkan, sementara aliran part pada variabel *Uncontrolled Disposing Rate* akan diakumulasi pada variabel *Uncontrolled Disposals*, yang menunjukkan jumlah part komputer yang dibuang secara tidak terkendali.

Part komputer yang telah dikumpulkan pada *Collection Center* selanjutnya dipilah atas *make part* yaitu part yang dibuat sendiri oleh perusahaan (*manufacturer*) atau *buy part* yaitu part yang dipasok oleh *vendor* atau *supplier* perusahaan. Part-part yang dikategorikan *make part* akan mengalirkan variabel *Collected Parts* ke variabel *Sorting Rate for Make Parts*. Sementara itu, part-part yang dikategorikan *buy parts* akan mengalirkan variabel *Collected Parts* ke variabel *Sorting Rate for Buy Parts*. Laju pemilahan untuk kedua tipe part ini ditentukan oleh variabel *Make Part Percentage* dan variabel *Sorting Time*. Part-part dengan kategori *make parts* diakumulasi pada variabel *Manufacturer's Return*, yang menunjukkan level *make parts* pada waktu tertentu. Setelah menunggu selama *Transportation Delay*, *make parts* dikirimkan ke *Recycling Center* yang dimiliki perusahaan dengan laju sesuai variabel *Make Part Return Rate* yang dipengaruhi oleh *Transportation Time*. *Make part* yang dikirimkan tersebut diakumulasi pada variabel *Recycleable Returns*, yang mewakili level pengembalian part komputer yang akan didaur ulang. Disamping itu, part-part dengan kategori *buy parts* diakumulasi pada variabel *Supplier's Return*, yang mewakili level *buy parts* pada waktu tertentu. Berdasarkan variabel *Replacement Percentage* dan parameter *Transportation Time*, jumlah *buy part* yang terakumulasi pada *Supplier's Returns* akan dialirkan

pada variabel *Credited Buy Part Rate*, yang mewakili laju *buy part* yang diganti dengan uang, dan pada variabel *Replaceable Buy Part Rate*, yang mewakili laju *buy part* yang diganti dengan part baru. Laju *buy part* pada variabel *Credited Buy Part Rate* diakumulasi pada *Recycleable Returns*, sementara laju *buy part* pada variabel *Replaceable Buy Part Rate* diakumulasi pada variabel *Replaceable Returns*, yang menunjukkan level *buy part* yang akan diganti oleh *supplier*. Aliran penggantian *buy part* diwakili oleh variabel *Replacement Rate*, dimana ditentukan oleh variabel *Replaceable Returns* dan parameter *Replacement Time*. Akumulasi *buy part* yang mendapat penggantian diwakili oleh variabel *Replaced Parts*.

Setelah menunggu sesuai *Delay in Recycling*, part-part yang sudah dikirimkan ke *Recycling Center* didaur-ulang dengan laju aliran daur ulang (*Recycling Rate*) yang ditentukan oleh variabel *Recycling Percentage* dan parameter *Recycling Time*. Hasil daur ulang diakumulasi pada variabel *Recycled Materials*, yang menunjukkan level material yang telah didaur-ulang pada waktu tertentu. Sementara itu, part-part yang tidak dapat didaur-ulang mempunyai laju aliran yang diwakili oleh variabel *Controlled Disposing Rate*, yang menunjukkan laju sisa daur ulang yang akan dibuang secara terkendali. Sisa daur ulang tersebut diakumulasi pada variabel *Controlled Disposals*, yang mewakili jumlah sisa daur ulang yang akan dibuang ke lingkungan secara terkendali.

Formulasi Persamaan Matematika pada Stock-and-Flow Diagram Sustainability Lingkungan pada Industri Daur Ulang Komputer

Setelah membuat struktur grafis SFD, hubungan antar variabel perlu digambarkan dengan sejumlah formulasi persamaan matematika. Struktur grafis SFD dan hubungan matematis antar variabel dan parameter dalam penelitian ini dirancang dengan menggunakan sebuah perangkat lunak sistem dinamis yaitu Vensim PLE for Windows version 6.00 Beta. Formulasi persamaan-persamaan matematika dan parameter-parameter yang digunakan dalam model ini berjumlah 47 sebagaimana ditampilkan pada Lampiran 1.

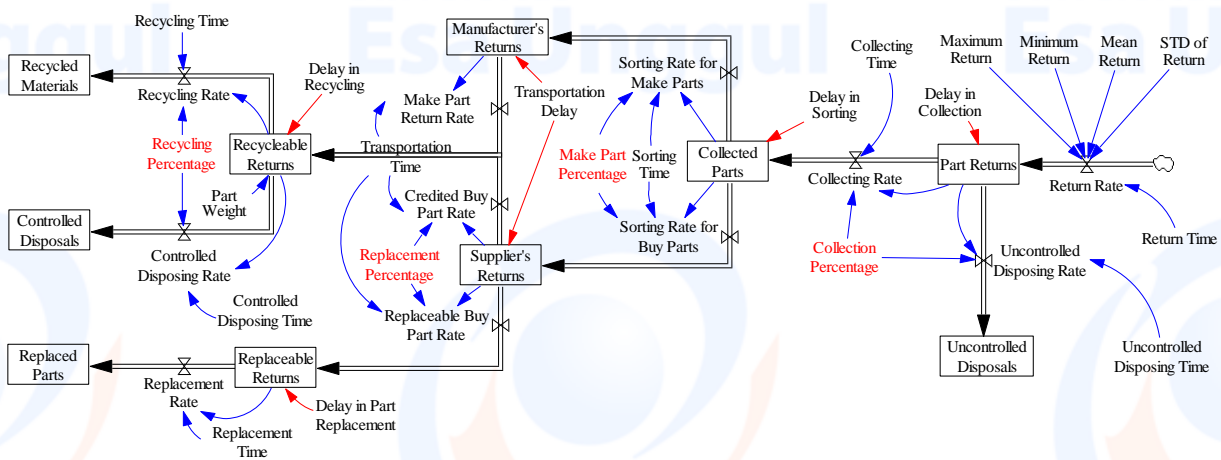
Exogenous variables dan skenario simulasi untuk menggali karakter dinamis pada Sistem Sustainability Lingkungan pada Industri Daur Ulang Komputer

Pada penelitian ini, terdapat empat variabel yang ditetapkan sebagai *exogenous variables* yaitu *Collection Percentage*, *Make Part Percentage*, *Replacement Percentage* dan *Recycling Percentage*.

Keempat faktor tersebut mempunyai dua level yaitu High dan Low. Dengan demikian terdapat 16 skenario simulasi untuk menggali karakter dinamis sistem dengan mengevaluasi 4 variabel yang terkait dengan sustainability lingkungan yaitu *Recycled Materials*, *Controlled Disposals*, *Replaced Parts*, dan *Uncontrolled Disposals*, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1 berikut ini.

Table 1
Exogenous Variables dan Skenario Simulasi

Exogenous Variables (Factors)	Level Faktor	Jumlah Skenario
A. Collection Percentage	High: 80 Low: 30	
B. Make Part Percentage	High: 75 Low: 25	2 * 2 * 2 *
C. Replacement Percentage	High: 75 Low: 25	2 = 16
D. Recycling Percentage	High: 90 Low: 10	



Gambar 2

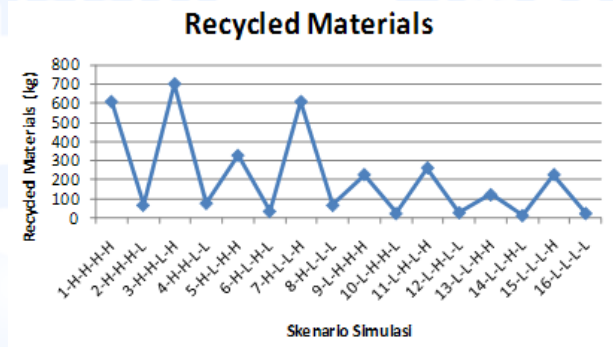
Stock and Flow Diagram untuk sistem sustainability lingkungan pada industri daur ulang komputer

Analisis hasil simulasi dinamis Sistem Sustainability Lingkungan pada Industri Daur Ulang Komputer

Dinamika variabel *Recycling Rate* selama 10 tahun atau 520 minggu pada 16 skenario sebagai kombinasi dari empat faktor (*exogenous variables*) dan dua level pada tiap faktor diakumulasikan sepanjang waktu pada variabel *Recycled Materials*. Total akumulasi *Recycled Materials* pada akhir tahun ke 10 untuk tiap skenario simulasi tersebut ditampilkan pada Gambar 3. Skenario simulasi 3 mempunyai total akumulasi *Recycled Materials* yang tertinggi yaitu 702 kg. Skenario simulasi 3 terdiri atas faktor pertama *Collection Percentage* berlevel High (H), faktor kedua *Make Part Percentage* berlevel High (H), faktor ketiga *Replacement Percentage* berlevel Low (L), dan faktor keempat *Recycling Percentage* berlevel High (H). Hal ini memberikan indikasi bahwa maksimasi pendaur-ulangan material dapat dilakukan pada kondisi persentase pengumpulan yang tinggi, persentase part buatan perusahaan sendiri yang

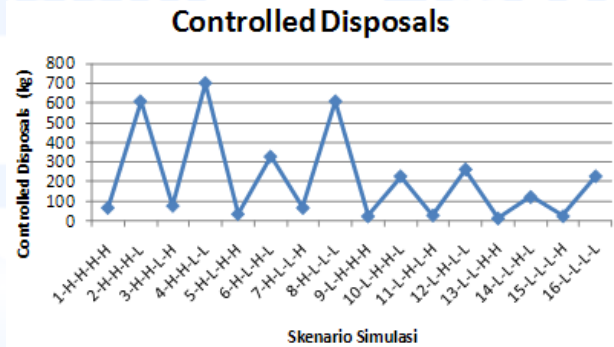
tinggi, dan persentase penggantian part oleh vendor atau supplier yang rendah, serta persentase pendaur-ulangan yang tinggi.

Sebaliknya, skenario simulasi 14 memiliki total akumulasi *Recycled Materials* yang terendah yaitu 14 kg. Skenario simulasi ke 14 ini terdiri atas faktor pertama *Collection Percentage* berlevel Low (L), faktor kedua *Make Part Percentage* berlevel Low (L), faktor ketiga *Replacement Percentage* berlevel High (H), dan faktor keempat *Recycling Percentage* berlevel Low (L). Hal ini menunjukkan bahwa jumlah material yang didaur-ulang akan rendah pada kondisi persentase pengumpulan yang rendah, persentase part yang dibuat perusahaan rendah, persentase penggantian part oleh vendor atau supplier yang tinggi, dan persentase pendaur-ulangan yang rendah.



Gambar 3

Total akumulasi *Recycled Materials* tiap skenario simulasi



Gambar 4

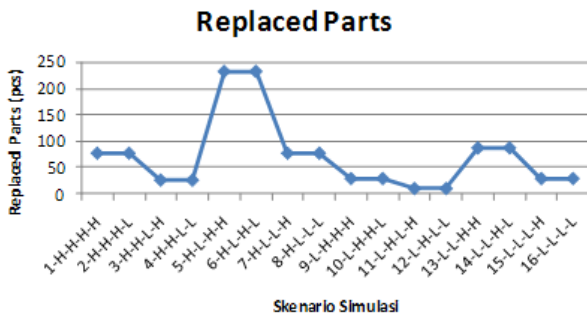
Total akumulasi *Controlled Disposals* tiap skenario simulasi

Total akumulasi *Controlled Disposals* pada akhir tahun ke 10 untuk 16 skenario simulasi sebagai kombinasi dari empat faktor (*exogenous variables*) dan dua level faktor ditampilkan pada Gambar 4. Total akumulasi *Controlled Disposals* pada tiap skenario ini merupakan penjumlahan *Controlled Disposing Rate* yang berdinamika sepanjang waktu selama 10 tahun atau 520 minggu. Skenario simulasi 4 mempunyai total akumulasi *Controlled Disposals* yang terbesar yaitu 702 kg. Skenario simulasi 4 terdiri atas faktor pertama *Collection Percentage* berlevel High (H), faktor kedua *Make Part Percentage* berlevel High (H), faktor ketiga *Replacement Percentage* berlevel Low (L), dan faktor keempat *Recycling Percentage* berlevel Low (L). Dengan demikian, pembuangan sisa daur-ulangan akan mencapai volume yang tinggi pada kondisi persentase pengumpulan yang tinggi, persentase part buatan perusahaan yang tinggi, persentase penggantian part yang rendah dan persentase daur-ulangan yang rendah.

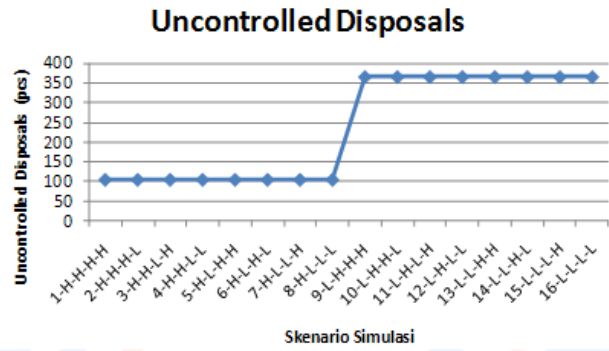
Sebaliknya, skenario simulasi 13 memiliki total akumulasi *Controlled Disposals* yang terkecil yaitu 14 kg. Skenario simulasi ke 13 ini terdiri atas faktor pertama *Collection Percentage* berlevel Low (L), faktor kedua *Make Part Percentage* berlevel Low (L), faktor ketiga *Replacement Percentage* berlevel High (H), dan faktor keempat *Recycling Percentage* berlevel High (H). Dengan demikian, pembuangan sisa daur-ulangan dapat diminimasi pada kondisi persentase pengumpulan yang rendah, persentase part buatan perusahaan sendiri yang rendah, persentase penggantian part oleh vendor atau supplier yang tinggi, dan persentase daur-ulangan yang tinggi.

Sementara itu, perubahan sepanjang 10 tahun atau 520 minggu simulasi untuk variabel *Replacement Rate* pada 16 skenario sebagai kombinasi dari empat faktor (*exogenous variables*) dan dua level diakumulasikan pada variabel *Replaced Parts*. Total akumulasi *Replaced Parts* pada akhir tahun ke 10 untuk tiap skenario simulasi tersebut disajikan pada Gambar 5. Total akumulasi *Replaced Parts* yang tertinggi adalah 232 pcs, dimana terjadi pada skenario simulasi 5 dan 6. Skenario simulasi 5 dan 6 mempunyai kesamaan pada tiga faktor yaitu faktor pertama *Collection Percentage* berlevel High (H), faktor kedua *Make Part Percentage* berlevel Low (L), dan faktor ketiga *Replacement Percentage* berlevel High (H), dan mempunyai perbedaan pada faktor keempat *Recycling Percentage*, dimana simulasi 5 berlevel High (H) dan simulasi 6 berlevel Low (L). Hal ini mengindikasikan bahwa maksimasi part-part yang diganti oleh vendor atau supplier diperoleh dengan kondisi persentase pengumpulan yang tinggi, persentase part buatan perusahaan sendiri yang rendah, dan persentase part mendapat penggantian yang tinggi, tanpa memperhatikan kondisi persentase daur-ulangan.

Sebaliknya, skenario simulasi 11 dan 12 memiliki total akumulasi *Replaced Parts* yang terendah yaitu 10 pcs. Skenario simulasi ke 11 dan 12 ini mempunyai kesamaan level pada tiga faktor yaitu faktor pertama *Collection Percentage* berlevel Low (L), faktor kedua *Make Part Percentage* berlevel High (H) dan faktor ketiga *Replacement Percentage* berlevel Low (L), serta memiliki perbedaan pada faktor keempat *Recycling Percentage*, dimana simulasi 11 berlevel High (H) dan simulasi 12 berlevel Low (L). Hal ini menunjukkan bahwa persentase pengumpulan part yang rendah, persentase part buatan perusahaan sendiri yang tinggi, dan persentase penggantian part oleh vendor atau supplier yang rendah akan meminimalkan jumlah part yang diganti, tanpa memperhatikan besaran persentase daur-ulangan.



Gambar 5
Total akumulasi *Replaced Parts* tiap skenario simulasi



Gambar 6
Total akumulasi *Uncontrolled Disposals* tiap skenario simulasi

Gambar 6 menyajikan total akumulasi *Uncontrolled Disposals* pada akhir tahun ke 10 untuk 16 skenario simulasi sebagai kombinasi dari empat faktor (*exogenous variables*) dan dua level pada tiap faktor. Total akumulasi *Uncontrolled Disposals* pada tiap skenario ini merupakan penjumlahan *Uncontrolled Disposing Rate* yang berdinamika sepanjang waktu selama 10 tahun atau 520 minggu. Skenario simulasi 1 sampai 8 mempunyai total akumulasi *Uncontrolled Disposals* yang terendah yaitu 105 pcs. Skenario-skenario ini mempunyai kesamaan level pada faktor pertama *Collection Percentage* dengan level High (H), namun berbeda level pada satu atau lebih dari ketiga faktor lainnya, yaitu faktor kedua *Make Part Percentage*, faktor ketiga *Replacement Percentage*, dan faktor keempat *Recycling Percentage*. Sebaliknya, skenario simulasi 9 hingga 16 memiliki total akumulasi *Uncontrolled Disposals* yang paling tinggi yaitu 366 pcs. Skenario-skenario simulasi ini mempunyai kesamaan level pada faktor pertama *Collection Percentage* dengan level Low (L), namun berbeda level pada satu atau lebih dari ketiga faktor lainnya, yaitu faktor kedua *Make Part Percentage*, faktor ketiga *Replacement Percentage*, dan faktor keempat *Recycling Percentage*. Hal ini menunjukkan bahwa pembuangan part komputer secara tidak terkendali dapat diturunkan dengan meningkatkan regulasi persentase pengumpulan. Pada sisi lainnya, akan terjadi peningkatan pembuangan part komputer secara tidak terkendali jika regulasi persentase pengumpulan diturunkan. Sementara itu, tiga faktor lainnya, *Make Part Percentage*, *Replacement Percentage*, dan *Recycling Percentage*, tidak berpengaruh terhadap tingkat pembuangan part komputer secara tidak terkendali.

Kesimpulan dan Saran

Beberapa hal dapat disimpulkan dari penelitian yang dilakukan terkait sustainability lingkungan pada industri daur ulang komputer. Pertama, struktur *Stock-and-Flow Diagram* untuk sustainability lingkungan pada industri daur ulang komputer telah dirancang dengan menggunakan software sistem dinamis VENSIM yang mencakup aktivitas pengembalian part, pengumpulan part, pemilahan part, pengiriman part, pendaur-ulangan part dan penggantian part. Kedua, sejumlah 47 persamaan matematika telah diformulasikan untuk merepresentasikan interaksi variabel dan parameter pada *Stock-and-Flow Diagram* untuk sustainability lingkungan pada industri daur ulang komputer. Ketiga, empat *exogenous variables* atau faktor yaitu *Collection Percentage*, *Make Part Percentage*, *Replacement Percentage* dan *Recycling Percentage*, dengan dua level tiap faktor yaitu High dan Low digunakan sebagai kombinasi skenario simulasi pada sustainability lingkungan pada industri daur ulang komputer terhadap *Recycled Materials*, *Controlled Disposals*, *Replaced Parts* dan *Uncontrolled Disposals*. Keempat, rekomendasi operasional pengelolaan sustainability lingkungan pada industri daur ulang komputer terkait evaluasi terhadap perilaku dinamis sistem adalah (i) maksimasi pendaur-ulangan material dapat dilakukan pada kondisi persentase pengumpulan yang tinggi, persentase part buatan perusahaan sendiri yang tinggi, dan persentase penggantian part oleh vendor atau supplier yang rendah, serta persentase pendaur-ulangan yang tinggi. Kondisi sebaliknya akan meminimasi pendaur-ulangan material; (ii) pembuangan sisa daur ulang dapat diminimasi pada kondisi persentase pengumpulan yang rendah, persentase part buatan perusahaan sendiri yang rendah, persentase penggantian part oleh vendor atau supplier yang tinggi, dan persentase pendaur-ulangan yang tinggi. Kondisi sebaliknya akan memaksimalkan pembuangan sisa daur ulang; (iii) part-part yang diganti oleh vendor

atau supplier dapat ditingkatkan pada kondisi persentase pengumpulan yang tinggi, persentase part buatan perusahaan sendiri yang rendah, dan persentase part mendapat penggantian yang tinggi, tanpa memperhatikan kondisi persentase pendaur-ulangan. Kondisi sebaliknya akan meminimalkan part yang diganti oleh vendor atau supplier; dan (iv) pembuangan part komputer secara tidak terkendali dapat diturunkan dengan meningkatkan regulasi persentase pengumpulan. Kondisi sebaliknya akan menyebabkan peningkatan pembuangan part komputer secara tidak terkendali.

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan dengan sejumlah batasan dan asumsi yang digunakan, maka beberapa hal dapat disarankan untuk penelitian lanjutan adalah sebagaimana berikut ini: (i) mengembangkan *Stock-and-Flow Diagram* dan formulasi matematika lanjutan untuk secara dinamis mengukur tingkat sustainability lingkungan pada industri daur ulang; dan (ii) melibatkan tingkat kepatuhan terhadap regulasi dalam sistem dan perbedaan kemampuan proses daur ulang terhadap *make part* dan *buy part*.

Daftar Pustaka

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2011). *Information about contaminants found at hazardous waste*. Diakses dari: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxfaqs/index.asp>
- Australian Government Department of Sustainability, Environment, Water, Population and Communities (DSEWPC). (2011). *Product Stewardship Act 2011*. Available at <http://www.environment.gov.au/wastepolicy/publications/pubs/fs-product-stewardship-act.pdf>.
- Beamon, M. B., & Fernandes, C. (2004). Supply-chain network configuration for product recovery. *Production Planning and Control* 15: 270–81.
- De Brito, M.P., & Dekker, R. (2004). A framework for reverse logistics. In: Dekker, R., Fleischmann, M., Inderfurth, K. and Van Wassenhove, L.N. (Editors). *Reverse logistics: quantitative models for closed-loop supply chains*. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag.
- Forrester, J.W. (1961). *Industrial dynamics*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Gartner. (2012). *Gartner says worldwide PC shipments in fourth quarter of 2011 declined 1.4 per cent; year-end shipments increased 0.5 percent*. Available at <http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=1893523>
- Georgiadis, P. & Besiou, M. (2008a). Sustainability in electrical and electronic equipment closed-loop supply chains: A System Dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*, 16: 1665–1678.
- Georgiadis, P. & Besiou, M. (2008b). The importance of feedback loops designing environmental policies for sustainable development. In: Proceedings, *The 2008 International Conference of the System Dynamics Society*, 1-16.
- Georgiadis, P., & Besiou, M. (2010). Environmental and economical sustainability of WEEE closed-loop supply chains with recycling: a system dynamics analysis. *Int. J. Adv. Manuf. Techno.*, 47: 475-493.
- Georgiadis, P., & Vlachos, D. (2004). The effect of environmental parameters on product recovery. *European Journal of Operational Research*, 157: 449-464.
- Guizzi, G., Revetria, R., Chiocca, D. & Romano, E. (2012). A dynamic milk run in WEEE reverse logistics. *Advances in Computer Science*, ISBN: 978-1-61804-126-5, 478-484.
- Infoactiv Group (IAG). (2009). *Reverse logistics: e-waste to be recovered*. Available at <http://infoactiv.com.au/2009/11/06/reverse-logistics-e-waste-to-be-recovered/>
- Krones, S.J. (2007) *Reverse Logistics and Large-Scale Material Recovery from Electronic Waste*. [Thesis]. MIT.
- Kumar, S. and Yamaoka, T. (2007). Systems dynamics study of the Japanese automotive industry closed loop supply chain. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 18(2), 115-138.
- Lee, C-H., Chang, C-T., Fan, K-S. and Chang, T-C. (2004). An overview of recycling and treatment of scrap computers. *Journal of Hazardous Materials*, B114: 93-100.
- Mangan, J., Lalwani, C. & Butcher, T. (2008). *Global logistics and supply chain*

- management. London: John Wiley & Sons, Ltd.
- Meinhardt Infrastructure & Environment Group (MIEG). (2001). *Computer & peripherals material project*. Prepared for Environment Australia.
- Pochampally, K.K., Nukala, S. & Gupta, S.M. (2009). *Strategic planning models for reverse and closed-loop supply chains*. Boca Raton: CRC Press.
- Rasjidin, R., Kumar, A., Alam, F. & Abosuliman, S.S. (2011a). A reverse logistics profitability system dynamics model of high volume returns with deterioration in computer industry. *The International Conference on Applied Sciences, Mathematics and Humanities – ICASMH*, 14-15 November 2011, Seremban, Negeri Sembilan, Malaysia.
- Rasjidin, R., Kumar, A., Alam, F. & Abosuliman, S.S. (2011b). A reverse logistics profitability system dynamics model of perishable medium volume returns in computer industry. *International Conference on Advances in Industrial and Production Engineering – AIPE*, 14-15 November 2011, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Rasjidin, R., Kumar, A. & Alam, F. (2012a). Conceptual modeling on environment sustainability of part recovery systems in computer industry. *10th ANZAM Operations, Supply Chain and Services Management Symposium*, 14-15 June 2012, Melbourne, Australia.
- Rasjidin, R., Kumar, A., Alam, F. & Abosuliman, S.S. (2012b). A system dynamics conceptual model on retail electricity supply and demand system to minimize retailer's cost in eastern Australia. *Procedia Engineering*, 49: 330-337.
- Rasjidin, R., Kumar, A. & Alam, F. (2013). Exploring system characteristics of system dynamics models on reverse logistics in the last decade. *International Conference on Economics and Social Science, 20-21 January 2013, Melbourne, Australia*. *Advances in Education Research*, 13: 115-120.
- Rasjidin, R. (2014). Model konseptual sustainability lingkungan pada industri daur ulang komputer. *Laporan Penelitian Hibah Internal, Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat*. Universitas Esa Unggul, Jakarta.
- Richardson, G.P. (2008). The Core of System Dynamics. In: R.A. Meyers (ed.), *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, Springer.
- Rogers, D.S. & Tibben-Lembke, R.S. (1999). *Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices*. Pittsburgh: RLEC Press.
- Scott, C., Lundgren, H. & Thompson, P. (2011). *Guide to Supply Chain Management*. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag.
- Socolof, M., Overly, L. K., & Greibig, J. (2003). *Desktop computer displays: A lifecycle assessment*. EPA 744-R-01-004. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- Spengler, T. & Schroter, M. (2003). Strategic management of spare parts in closed-loop supply chains – A system dynamics approach. *Interfaces*, 33(6), 7-17.
- Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. New York: McGraw-Hill.
- Tan, A.W.K. & Kumar, A. (2006). A decision-making model for reverse logistics in the computer industry. *Int. J. Logistics Management*, 17, 331–354.
- Thierry, M.C., Salomon, M., Van Nunen, J. & Van Wassenhove, L.N. (1995). *Strategic Issues in Product Recovery Management*. *California Management Review*, 37(2), 114–135.
- Total Environment Centre (TEC). (2008). *Tipping Point: Australia's E-Waste Crisis*. Available at <http://www.tec.org.au/images/e-waste%20report%20updated.pdf>
- Williams, E. (2003). Environmental impacts in the production of personal computers. In: R. Kuehr and E. Williams (Eds.), *Computers and the environment: Understanding and managing their impacts*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 41-72.