

## MODEL KONSEPTUAL 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

Peningkatan signifikan penggunaan komputer dan produksi limbah komputer dengan 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. Pada penelitian ini, dilakukan kajian sustainability lingkungan terhadap reverse logistics pada industri daur ulang komputer. Tahapan kualitatif dalam pendekatan sistem dinamis (SD) digunakan dalam membangun sebuah model konseptual sustainability lingkungan pada industri daur ulang komputer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat sejumlah operasi dalam reverse logistics pada pendaurulangan limbah komputer oleh pabrik. Disamping itu, sejumlah variabel penting dalam mengelola operasi reverse logistics pada industri daur ulang komputer telah diidentifikasi. Lebih lanjut, sebuah model konseptual terkait telah dirancang untuk merepresentasikan interaksi antara sejumlah variabel penting tersebut. Beberapa penelitian di masa datang 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

Peningkatan pesat penggunaan produk elektronik dunia khususnya komputer yang disertai limbah elektronik (*electronic waste, e-waste*) terjadi dari waktu ke waktu. Pada dekade dari tahun 2001 sampai 2011, pasar global *personal computer* (PC) meningkat hampir tiga kali lipat dari 128.1 juta unit menjadi 352.8 juta unit (Gartner, 2012). Demikian juga, produksi limbah elektronik dunia diperkirakan akan mengalami peningkatan 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). Padahal, 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).

Memperhatikan gejala-gejala ketidakberlanjutan lingkungan (*environmental unsustainability*) tersebut, maka penelitian ini dilaksanakan dengan tiga tujuan yaitu: 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. Diharapkan, *reverse logistics* daur ulang komputer yang dikelola dengan baik akan memberikan manfaat bagi perusahaan dan masyarakat sebagaimana berikut: memelihara keberadaan dan kesinambungan bisnis perusahaan diwaktu mendatang; merefleksikan tanggung jawab sosial perusahaan (*Company Social Responsibility, CSR*) yang dapat bermuara pada peningkatan daya saing dan citra baik perusahaan di mata konsumen domestik ataupun luar negeri; meningkatkan kualitas hidup masyarakat terkait kontribusi perusahaan dalam menurunkan pencemaran lingkungan; dan meningkatkan konservasi energi dan sumber daya alam terkait pemanfaatan kembali material yang terkandung pada limbah elektronik.

Pemahaman terhadap operasi *reverse logistics* pada industri daur ulang komputer dan variabel-variabel pentingnya dilakukan melalui kajian literatur dari berbagai sumber yang relevan.

Selanjutnya, model konseptual untuk mengukur sustainability lingkungan dikembangkan dengan menggunakan metodologi berbasis Sistem Dinamis. Interdependensi, interaksi mutual, feedback informasi, dan kausalitas sirkular terkandung dalam sistem reverse logistics yang 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; dan Richardson, 2008).

## 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), Guizzi et al. (2012), dan Rasjidin et al. (2012a dan 2014). Namun, terdapat perbedaan karakteristik sistem pada penelitian-penelitian ini baik dalam hal *networks*, performansi, variabel keputusan dan industri. Guizzi et al. (2012) dan Rasjidin et al. (2014) telah melakukan kajian pada *networks* atau *channels* berbentuk *Reverse Logistics*, sementara Spengler dan Schroter (2003), Kumar dan Yamaoka (2007), Georgiadis dan Besiou (2008a, 2008b, 2010) dan Rasjidin et al. (2012a) melakukan studi terhadap *Closed-Loop Supply Chain*. Dalam hal performansi sistem, pengukuran dilakukan terhadap tiga performansi yaitu *operational* (Kumar dan Yamaoka, 2007; dan Guizzi et al., 2012); *economic* (Spengler dan Schroter, 2003; Georgiadis dan Besiou, 2010; dan Rasjidin et al., 2014); dan *environmental* (Georgiadis dan Besiou, 2008a, 2008b, 2010; dan Rasjidin et al., 2012a). Mengenai variabel keputusan, *technological innovations* dievaluasi oleh Georgiadis dan Besiou (2008a), *recovery policies* oleh Spengler dan Schroter (2003) dan Rasjidin et al (2014), *operational features* oleh Guizzi et al. (2012), dan *environmental policies* oleh Kumar dan Yamaoka (2007), Georgiadis dan Besiou (2008a, 2008b, 2010), dan Rasjidin et al (2012a). Terkait lingkungan industri yang dikaji, Kumar dan Yamaoka (2007) telah melaksanakan kajian pada *automotive industry*. Sementara para peneliti lainnya, Spengler dan Schroter (2003), Georgiadis dan Besiou (2008a, 2008b, 2010), Guizzi et al. (2012), dan Rasjidin et al (2012a, 2014) mengkaji *electrical and electronics industry*. Meskipun berbagai variasi karakteristik sistem terkait *recycling* dengan pendekatan sistem dinamis telah dikaji, namun belum pernah dilakukan studi untuk mengevaluasi *environmental policies*

terhadap performansi *environmental* pada *reverse chain networks* industri komputer.

## Metodologi Sistem Dinamis

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. Sebagaimana studi Rasjidin et al. (2012a, 2012b, 2014), model konseptual pada penelitian ini dirancang dengan menggunakan prosedur kualitatif dari metode Sistem Dinamis.

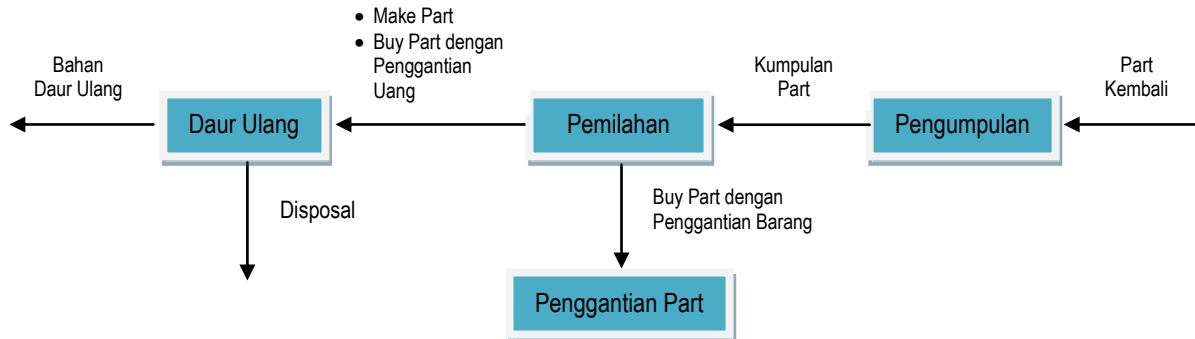
## Hasil dan Pembahasan

### Operasi *reverse logistics* pada industri daur ulang komputer

Rancangan aktivitas-aktivitas *backward chain* pada industri daur ulang komputer yang diusulkan, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 1, terdiri atas: pengembalian part, pengumpulan part, pemilahan part, pendaur-ulangan part dan penggantian part. Aktivitas pengembalian part terjadi setelah konsumen menggunakan komputer selama periode waktu tertentu dan mendapati kinerja atau fungsi komputer tidak memenuhi harapan dan kebutuhannya. Part-part yang dikembalikan oleh konsumen diperoleh melalui service atau perbaikan komputer yang dilakukan pada *service/repair centre* yang dimiliki oleh pabrikan (*manufacturer*). Sebagian komputer dengan kinerja yang tidak memuaskan konsumen tersebut akan dapat diperbaiki untuk berfungsi optimal kembali. Sementara itu, sebagian lainnya akan memerlukan penggantian part sehingga part

yang rusak akan dikumpulkan dan disimpan di *service/repair centre* tersebut. Selanjutnya part-part tersebut akan dipilah berdasarkan dua tipe part yaitu part yang dibuat sendiri oleh pabrikan (*make part*) atau part yang dibeli oleh pabrikan dari pemasok (*supplier*) tertentu yang disebut sebagai *buy part*. *Make part* yang sudah dikumpulkan tersebut

dikirimkan ke fasilitas daur ulang (*recycling*) yang dimiliki oleh *manufacturer*. Demikian juga untuk kumpulan *buy part* yang tidak dapat diganti dengan part baru dari pemasok yang dikarenakan ketiadaan persediaan part sejenis atau melewati masa garansi maka akan dikirimkan ke fasilitas daur ulang tersebut.



Gambar 1  
Rancangan *reverse logistics* pada industri daur ulang komputer

Sebaliknya, kumpulan *buy part* yang dapat diganti akan dikirimkan ke pemasok untuk mendapatkan penggantian part. Aktivitas pendaur-ulangan akan menghasilkan produk utama berbagai jenis material daur ulang dan produk sampingan berupa limbah (*disposal*) yang dibuang secara terkendali agar meminimasi pencemaran lingkungan. Operasi *reverse logistics* pada industri daur ulang komputer ini dirancang berdasarkan pengamatan, kajian literatur dan analisis terhadap sistem *reverse logistics* pada industri daur ulang komputer.

### Variabel-variabel penting *reverse logistics* pada industri daur ulang komputer

Sebagai sebuah sistem, manajemen *reverse chain* yang dilakukan sendiri oleh pabrikan pada industri daur ulang komputer mengandung beragam variabel yang saling berinteraksi di dalamnya atau dengan variabel di luar sistem yang juga biasa disebut variabel di lingkungan. Namun tidak semua variabel tersebut perlu diperhatikan karena akan menyebabkan kompleksitas yang sangat tinggi dimana akan menyulitkan dalam penyelesaian permasalahan. Sebagian variabel tidak relevan atau tidak mempunyai peran penting terkait permasalahan, sebaliknya sebagian variabel lainnya punya kontribusi penting untuk dipertimbangkan dalam penyelesaian masalah. Sejumlah variabel penting tersebut akan memadai untuk mewakili atau merepresentasikan sistem yang sedang dikaji.

Demikian juga pada sistem pengelolaan *reverse logistics* pada industri daur ulang komputer ini, terdapat beberapa variabel yang dapat menggambarkan karakteristik utama sistem. Melalui analisis terhadap rancangan *reverse*

*logistics* pada industri daur ulang komputer yang diusulkan pada Gambar 1, beberapa variabel yang penting untuk mendeskripsikan sistem dan deskripsi tiap variabel tersebut dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

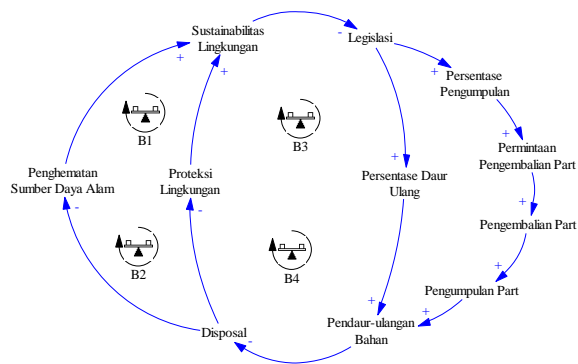
Tabel 1  
Deskripsi variabel penting sistem

| Nama Variabel                       | Deskripsi  |
|-------------------------------------|--|
| <i>Sustainability Lingkungan</i>    | Keberlanjutan kondisi ekologi yang dapat memberikan kualitas hidup yang baik bagi makhluk hidup                                      |
| <i>Legislasi</i>                    | Kebijakan dan peraturan perundang-undangan yang diberlakukan   |
| <i>Persentase Pengumpulan</i>       | Persentase limbah yang dapat dikumpulkan oleh pabrikan   |
| <i>Penghematan Sumber Daya Alam</i> | Pemenuhan kebutuhan sumber daya tanpa mengeksploitasi sumber daya alamiah ( <i>natural resources</i> )                               |
| <i>Proteksi Lingkungan</i>          | Pencegahan kerusakan ekologi dari limbah berbahaya dan beracun   |
| <i>Persentase Daur Ulang</i>        | Persentase bahan-bahan yang dapat diperoleh pada proses daur ulang   |
| <i>Permintaan Pengembalian Part</i> | Kebutuhan para pemangku kepentingan agar limbah atau produk bekas dikembalikan kepada pabrikan sesuai prosedur yang telah ditetapkan |
| <i>Pengembalian Part</i>            | Kuantitas part yang dikembalikan konsumen kepada pabrikan  |
| <i>Pengumpulan Part</i>             | Kuantitas part yang dapat dikumpulkan oleh pabrikan  |
| <i>Pendaurulangan Bahan</i>         | Kuantitas bahan bermanfaat dan bernilai yang dapat diperoleh pada proses daur ulang  |
| <i>Disposal</i>                     | Kuantitas hasil sampingan dari proses daur ulang yang dibuang ke lingkungan secara terkendali  |

**Model konseptual sustainability lingkungan pada industri daur ulang komputer**

Pada penelitian ini, sebuah model konseptual tentang *reverse logistics* dengan daur ulang pada industri komputer untuk mengukur sustainability lingkungan dikembangkan dengan menggunakan Causal Loop Diagram yang merupakan bagian kualitatif dari pendekatan Sistem Dinamis. Sejumlah variabel penting yang telah diidentifikasi sebelumnya, sebagaimana Tabel 1, digambarkan relasinya dalam sebuah *Causal Loop Diagram* dengan menggunakan perangkat lunak sistem dinamis Vensim sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2. Interaksi variabel-variabel pada *Causal Loop Diagram* membentuk empat loop, Loop B1, Loop B2, Loop B3 dan Loop B4, yang berupa *Balancing Loop* dengan arah *Clockwise*. Klasifikasi *Balancing Loop* disebabkan interaksi sebab akibat antar dua variabel yang berpolaritas negatif dalam loop berjumlah ganjil. Sementara itu, kategori *Clockwise* dikarenakan arah semua interaksi sebab akibat di dalam loop mengikuti arah jarum jam.

Interaksi sebab akibat antar dua variabel di dalam loop mempunyai dua bentuk polaritas yaitu positif dan negatif. Tanda polaritas positif menunjukkan interaksi yang berbanding lurus antara variabel sebab dan variabel akibat. Jika variabel sebab meningkat maka variabel akibat juga akan mengalami peningkatan. Demikian juga, jika variabel sebab menurun maka variabel akibat juga akan mengalami penurunan. Sementara itu, tanda polaritas negatif mengindikasikan relasi yang berbanding terbalik antara variabel sebab dan variabel akibat. Bila variabel sebab bertambah maka variabel akibat akan berkurang. Sebaliknya, bila variabel sebab berkurang maka variabel akibat akan bertambah. Polaritas hubungan sebab akibat antar variabel pada tiap loop disajikan pada Tabel 2.



Gambar 2

*Causal Loop Diagram* sustainability lingkungan pada industri daur ulang komputer

Tabel 2

Variabel dan polaritasnya dalam *Causal Loop Diagram*

| Nama Loop | Nama dan Polaritas Variabel  |
|-----------|--|
| B1        | Sustainability Lingkungan (+),<br>Legislasi (-), Persentase Daur Ulang (+),<br>Pendaaur-ulangan Bahan (+),<br>Disposal (-), Penghematan Sumber Daya Alam (-)   |
| B2        | Sustainability Lingkungan (+),<br>Legislasi (-), Persentase Pengumpulan (+),<br>Permintaan Pengambilan Part (+),<br>Pengembalian Part (+), Pengumpulan Part (+),<br>Pendaaur-ulangan Bahan (+),<br>Disposal (-), Penghematan Sumber Daya Alam (-)  |
| B3        | Sustainability Lingkungan (+),<br>Legislasi (-), Persentase Daur Ulang (+),<br>Pendaaur-ulangan Bahan (+),<br>Disposal(-), Proteksi Lingkungan(-)<br>Sustainability Lingkungan (+),<br>Legislasi(-), Persentase Pengumpulan (+),<br>Permintaan Pengambilan Part (+),<br>Pengembalian Part (+),<br>Pengumpulan Part(+),<br>Pendaaur-ulangan Bahan (+),<br>Disposal (-), Proteksi Lingkungan (-) |
| B4        | Sustainability Lingkungan (+),<br>Legislasi(-), Persentase Pengumpulan (+),<br>Permintaan Pengambilan Part (+),<br>Pengembalian Part (+),<br>Pengumpulan Part(+),<br>Pendaaur-ulangan Bahan (+),<br>Disposal (-), Proteksi Lingkungan (-)  |

**Kesimpulan**

Struktur operasi *reverse logistics* atau aktivitas-aktivitas *backward chain* pada industri daur ulang komputer yang telah dirancang meliputi pengembalian part, pengumpulan part, pemilahan part, pendaaur-ulangan part dan penggantian part. Sejumlah variabel penting yang telah diidentifikasi terkait sustainability lingkungan *reverse logistics* daur ulang komputer tersebut mencakup sustainability lingkungan, legislasi, persentase pengumpulan, penghematan sumber daya alam, proteksi lingkungan, persentase daur ulang, permintaan pengembalian part, pengembalian part, pengumpulan part, pendaaur-ulangan bahan, dan disposal. Interaksi antar variabel pada sistem digunakan untuk mengembangkan model konseptual pengelolaan *reverse logistics* daur ulang komputer dengan menggunakan sustainability lingkungan sebagai kriteria performansi sistem. Model konseptual diperoleh melalui tahapan kualitatif pada pendekatan Sistem Dinamis dan berbentuk sebuah *Causal-Loop Diagram* yang didesain dengan menggunakan software sistem dinamis VENSIM.

## Saran

Penelitian lanjutan terhadap model konseptual hasil studi ini perlu dilakukan untuk pengembangan *stock-and-flow diagram* yang disertai sejumlah persamaan matematika dan skenario nilai-nilai kritis variabel-variabel eksogenus untuk memperoleh hasil simulasi yang dapat digunakan dalam mengevaluasi sustainability lingkungan operasi *reverse logistics* industri daur ulang komputer. Disamping itu, kajian sustainability lingkungan terhadap operasi *reverse logistics* daur ulang komputer yang dilakukan oleh pihak ketiga yang pada umumnya bertujuan untuk mengambil manfaat keuangan juga perlu dilakukan.

## 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>
- Gartner. (2012). *Gartner says worldwide PC shipments in fourth quarter of 2011 declined 1.4 per cent; year-end shipments increased 0.5 Percent*. Diakses dari: <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, p: 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*, p: 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.
- 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/>
- Kumar, S. & Yamaoka, T. (2007). Systems dynamics study of the Japanese automotive industry closed loop supply chain. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 18(2), 115-138.
- 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. (2014). *Conceptual modelling on economic sustainability of computer part recovery systems*. 4th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 7 – 9 January, 2014, Bali, Indonesia.
- Richardson, G.P. (2008). The Core of System Dynamics. In: R.A. Meyers (ed.), *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, Springer.
- 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.
- Total Environment Centre (TEC). (2008). *Tipping Point: Australia's E-Waste Crisis*. Diakses dari: <http://www.tec.org.au/images/e-waste%20report%20updated.pdf>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2010). *Urgent need to prepare developing countries for surge in e-wastes*. Diakses dari: <http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?DocumentID=612&ArticleID=6471>.