

## **EKO-EFISIENSI DENGAN DAYA DUKUNG LINGKUNGAN SEBAGAI FAKTOR PENGENDALI KINERJA LINGKUNGAN KAWASAN INDUSTRI**

### **ECO-EFFICIENCY WITH ECOLOGICAL CARRYING CAPACITY AS A CONTROL FACTOR TO ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF ECO-INDUSTRIAL PARK**

---

**Esther S.M. Nababan**

Sekolah Pasca Sarjana - Program Studi Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan  
Universitas Sumatera Utara, Medan

Email: esther@usu.ac.id; esthernababan@yahoo.com

dikirim 22 Juli 2010, diterima setelah perbaikan 1 Maret 2011

**Abstrak:** Dalam suatu ekosistem kawasan industri, acuan untuk mengevaluasi seluruh kegiatan dalam kerangka menuju pembangunan berkelanjutan adalah 'kinerja lingkungan'. Kinerja lingkungan bagi kawasan industri adalah berdasarkan pada konsep 'eko-efisiensi' yang menghitung kombinasi kinerja ekonomi dan kinerja lingkungan. Komponen indikator ekonomi dalam perhitungan eko-efisiensi bergantung pada undang-undang, peraturan pemerintah serta tujuan dan target perusahaan, sehingga dapat menyebabkan terjadinya subjektivitas dalam perhitungan kinerja lingkungan, dimana nilai eko-efisiensi dapat meningkat meskipun kualitas lingkungan menurun. Turunnya kualitas lingkungan merupakan salah satu penyebab penurunan daya dukung lingkungan. Hal ini menunjukkan bahwa tingginya nilai kinerja lingkungan suatu perusahaan tidak menjamin terpeliharanya kualitas lingkungan dan daya dukung lingkungan. Oleh sebab itu diperlukan suatu faktor yang dapat mengatur, yaitu suatu faktor yang berfungsi sebagai pengendali. Dalam tulisan ini dianalisis bagaimana daya dukung lingkungan dapat difungsikan sebagai faktor pengendali dalam usaha meningkatkan kinerja lingkungan. Dengan menyertakan daya dukung lingkungan sebagai faktor pengendali, diharapkan setiap kegiatan yang bertujuan meningkatkan kinerja lingkungan dapat dilakukan dalam batas atau koridor keseimbangan daya dukung lingkungan sehingga kinerja lingkungan dapat ditingkatkan tanpa mengurangi kualitas lingkungan.

**Kata kunci:** daya dukung lingkungan, eko-efisiensi, kinerja lingkungan, pengendali, dan titik keseimbangan.

**Abstract:** In any industrial park ecosystem, all activities toward sustainable development are evaluated through its 'environmental performance'. Environmental performance of eco-industrial parks is based on concept of eco-efficiency which combine both, economic growth and environmental performance. Economy indicators and environmental indicators in evaluating eco-efficiency are related to an organization's control of its environmental aspects, based upon its environmental policy, objective and targets. This leads to subjectivity in performance measurement, in which both costs and gains are constructed from subjectively selected value-items. Consequently, it can happen that eco-efficiency increases while environmental quality reduces. Decrease on environmental quality causes depletion on environmental carrying capacity. This shows that increase on environmental performance does not guarantee no depletion on either environmental quality or on environmental carrying capacity. Hence, the existence of a constraint factor is required. This paper presents literature review and analysis of how carrying capacity can be functioned as control factor or dynamic constraint in endeavoring to increase environmental performance of eco-industrial parks. Constrained minimax optimization model is developed to maximize economic gain while minimizing waste in a region within the border where dynamic carrying capacity is maintained stable. By adding in carrying capacity as control factor, all activities to increase environmental performance can be conducted within a boundary or area within which balance of carrying capacity is maintained, in order to increase environmental performance without reducing quality of environment.

**Keywords:** balance, carrying capacity, control, eco-efficiency, and environmental performance.

## PENDAHULUAN

Peningkatan keefisiensi merupakan hal penting bagi keberlanjutan suatu kegiatan industri, baik industri tunggal, industri lokal, maupun kawasan industri. Hal ini berkaitan dengan pertumbuhan industri yang semakin pesat untuk memenuhi kebutuhan populasi dunia yang terus meningkat dengan laju peningkatan yang relatif lebih cepat dari kecepatan sumberdaya alam dan energi terbarukan. Oleh sebab itu diperlukan suatu tata kelola industri yang berorientasi pada peningkatan kinerja ekonomi dan kinerja lingkungan dengan cara mengadopsi prinsip ekologi dalam operasinya. Prinsip ekologi akan lebih efektif diterapkan jika kegiatan berbagai jenis industri dilakukan dalam suatu kawasan. (Tibbs, 2005; Lowe, 2008). Tujuan dari kawasan industri berkelanjutan adalah untuk memperbaiki kinerja ekonomi bagi industri-industri didalamnya dengan cara meminimalkan dampak lingkungan. Pola pendekatan yang digunakan meliputi rancangan infrastruktur kawasan dan pabrik berwawasan lingkungan, produksi bersih, efisiensi energi, dan kemitraan antar perusahaan.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Zhang dkk. (2008) mengenai kinerja lingkungan dari 30 kawasan industri di China, terdapat inkonsistensi hasil dimana terdapat 2 lokasi dengan nilai kinerja tertinggi yang ternyata merupakan kawasan dengan tingkat emisi tertinggi pula. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun analisis keefisiensi merupakan bagian dari pengukuran pembangunan berkelanjutan, tetapi peningkatan keefisiensi tidak menjamin keberlanjutan. Jika nilai ekonomi meningkat lebih cepat, maka keefisiensi akan meningkat meskipun dampak lingkungan meningkat (Mickwitz dkk. 2006; Hukkinen, 2001). Peningkatan dampak lingkungan ini tentunya menyebabkan penurunan kualitas lingkungan yang mengakibatkan penurunan daya dukung lingkungan. Daya dukung lingkungan adalah maksimum “beban” atau “tanggungan” lingkungan (*maximum load*) yang dapat secara aman dimanfaatkan oleh manusia. Daya dukung lingkungan adakalanya didefinisikan mengacu pada hubungan dengan keseimbangan alam. Dengan kata lain, daya dukung ekologi merupakan tingkat maksimum (baik jumlah maupun volume) pemanfaatan suatu sumberdaya atau ekosistem yang dapat di akomodasi oleh suatu kawasan atau area sebelum terjadi penurunan kualitas ekologis. Pada daya dukung kawasan industri, faktor-faktor yang perlu dikaji antara lain daya dukung fisik kawasan dalam mendukung aktifitas industri, kemampuan kawasan menerima limbah industri, polusi udara akibat aktivitas industri, dan lain-lain.

Meskipun tekanan terhadap lingkungan relatif lebih rendah dibandingkan output ekonomi, tekanan absolut terhadap lingkungan tetap dapat melampaui daya dukung lingkungan dari ekosistem. Oleh sebab itu perlu dilakukan strategi untuk mengurangi kecepatan penurunan kualitas lingkungan dengan mempertimbangkan suatu faktor yang dapat berfungsi sebagai pengendali. Dalam tulisan ini dikaji suatu kemungkinan untuk memfungsikan titik stabil daya dukung lingkungan sebagai faktor pengendali dalam setiap usaha peningkatan eko-efisiensi. Titik stabil dimaksud adalah titik keseimbangan, yaitu suatu titik dimana terdapat keseimbangan antara kecepatan penurunan kualitas lingkungan dengan kecepatan peningkatan produktifitas lingkungan. Dengan adanya faktor pengendali, diharapkan setiap usaha peningkatan kinerja lingkungan dapat dilakukan dalam batas koridor titik stabil daya dukung lingkungan, sehingga kualitas lingkungan dan daya dukung lingkungan dapat dipertahankan.

## **DASAR TEORI**

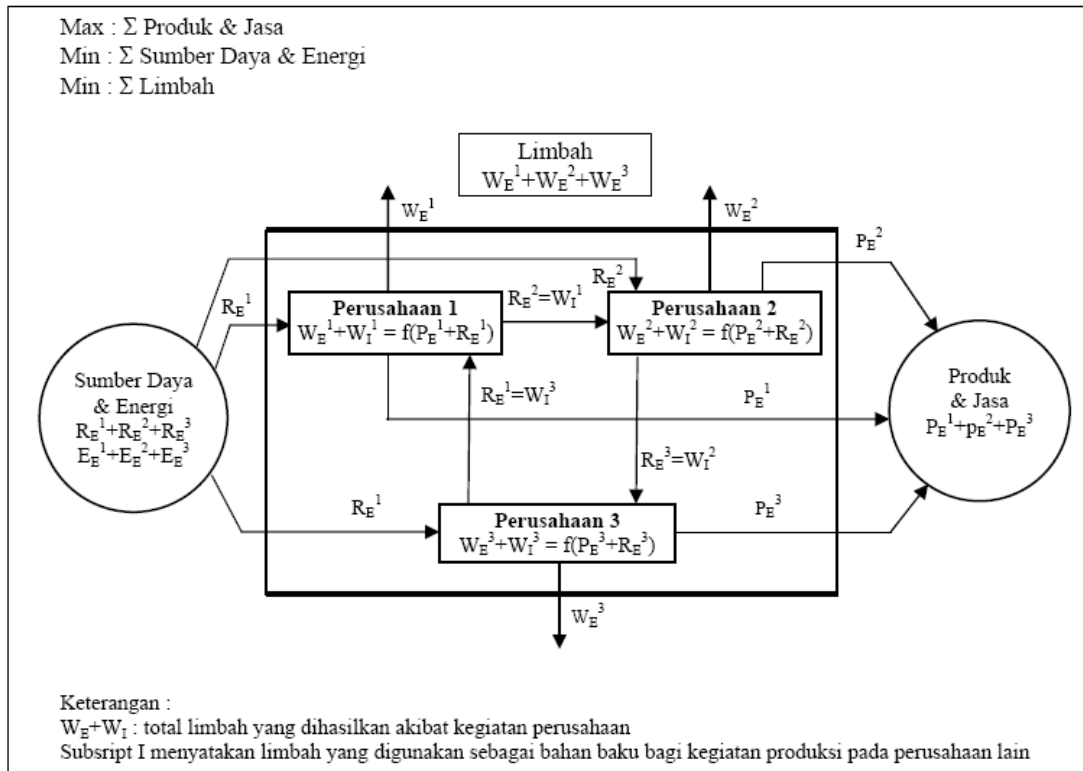
Berdasarkan definisinya, eko-efisiensi merupakan rasio antara nilai tambah dari suatu produk (pendapatan, peningkatan kualitas produk dan jasa, lapangan pekerjaan, GDP dll.); dengan penambahan dampak lingkungan dari suatu produk atau jasa. Terdapat banyak alternatif pengukuran dan indikator (Glauser dan Muller, 1997; Metti, 1999; Zang dkk., 2008; Carlson, 2009; Park, 2009; Nam, 2010). Indikator yang umum digunakan untuk menghitung nilai produk atau jasa adalah jumlah barang-barang atau jasa yang diproduksi atau disediakan bagi konsumen, dan penjualan bersih. Sedangkan indikator dampak lingkungan adalah konsumsi energi, air dan material; emisi gas rumah kaca (GHG); dan emisi substansi perusak ozon. (WBCSD, 2000). *United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD)* menggunakan indikator nilai tambah untuk merepresentasikan indikator kinerja (UNCTD, 2003). Kemajuan dalam keefisiensi dapat dicapai dengan menyertakan nilai tambah per unit dampak lingkungan atau per unit sumberdaya yang dikonsumsi.

Secara teknis, konsep pengukuran keefisiensi belum standar. Belum terdapat konsensus mengenai keefisiensi, tetapi usaha untuk membuat panduan yang mendekati standar internasional mengenai keefisiensi didalam ISO (International Standard Organization) telah dilakukan oleh beberapa lembaga riset. Sejak tahun 1996, standar internasional untuk meningkatkan kinerja lingkungan dari suatu organisasi telah dituangkan dalam ISO 14000. Dalam salah satu butir 4.3.1 dari ISO 14001 disebutkan bahwa: Indikator kinerja adalah suatu hal yang spesifik, merupakan pengukuran kuantitatif yang digunakan sebagai jalur dalam pengelolaan lingkungan menuju sasaran dan target. Perhitungan nilai keefisiensi dapat dilakukan dengan berbagai pendekatan. Komponen yang berperan untuk meningkatkan kinerja termasuk kebijakan, regulasi, tujuan/objektif, struktur penanggung jawab dan narasumber, kendali operasional, Environmental Management System (EMS) yang termasuk dalam ISO 14001; Tindakan preventif dan kuratif; Pemangku kepentingan; Pelatihan, kesadaran, kompetensi; Kepatuhan, motivasi; Pengambilan Keputusan organisasi dan perencanaan; Pengawasan dokumen; Evaluasi dan pengembangan secara kontinu (Glauser, 1997, Hukkinen, 2001; Eherenfielf, 2005).

Berbagai usaha dilakukan para pelaku industri untuk meningkatkan nilai keefisiensi yang merupakan salah satu persyaratan yang tertuang dalam ISO14001. Hal ini menimbulkan terjadinya pemilihan indikator ekonomi dan indikator dampak lingkungan dapat dilakukan secara subjektif sesuai keinginan para pemangku kepentingan. Indikator ekonomi dapat dipilih agar nilai keefisiensi menjadi tinggi, relatif terhadap dampak lingkungan. Padahal tujuan dari peningkatan kinerja lingkungan adalah untuk meningkatkan kesejahteraan sosial melalui peningkatan kinerja ekonomi, sekaligus mengurangi beban dan dampak lingkungan. Akibatnya peningkatan keefisiensi tidak selalu menjamin keberlanjutan (Mickwitz dkk. 2006; Hukkinen, 2001).

Saat ini cara melakukan pengukuran secara eksak pada bagian pembilang dan penyebut dalam "persamaan keefisiensi" masih bergantung pada penelitian dan pengembangan internasional (Seppala dkk., 2005). Tetapi konsensus mengenai keefisiensi telah ada, yaitu bahwa keefisiensi merupakan kombinasi dari nilai ekonomi dan nilai dampak lingkungan, yang diekspresikan sebagai rasio antara nilai ekonomi dengan nilai dampak lingkungan. Indikator dan pengukuran untuk nilai ekonomi dan nilai dampak lingkungan belum baku. Untuk bagian nilai ekonomi, WBCSD (2000) menentukan jumlah barang atau jasa (*quantity of goods or service*) dan penjualan bersih sebagai indikator umum dari nilai produk atau jasa; dan nilai tambah (*value added*) sebagai indikator tambahan (*supplement indicators*). Sedangkan *United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD)* menyarankan untuk menggunakan indikator nilai tambah, misalnya *Sales*

Revenue (UNTCED, 2003) untuk merepresentasikan indikator kinerja. Secara skematik, indikator keefisiensi dalam kawasan industri disajikan pada gambar 1.



**Gambar1.** Diagram ekoefficiensi dari kawasan industri.  
 (sumber: Park, 2009)

Persamaan baku versi WBSCD (Boosik, 2009), untuk menghitung nilai dan aspek ekologi kedalam rasio keefisiensi adalah rasio antara Nilai Produk dan/atau Jasa dengan Dampak Lingkungan, atau rasio antara Penjualan Bersih dengan Dampak Lingkungan dengan indikator secara umum adalah:

- Nilai produk dan jasa:
  - Kuantitas Produk/Jasa yang diproduksi atau yang terjual
  - Penjualan bersih (net sales)
- Dampak Lingkungan
  - Konsumsi energi
  - Konsumsi air
  - Konsumsi material
  - Emisi GHG
  - Emisi CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> (ozone depleting substance emissions)

Nilai produk dan jasa merupakan nilai fungsi dari variabel produk dan jasa, dimana variabel keputusan adalah kuantitas produk/jasa. Penjualan bersih/ net sales:

$$F(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij}^T x_{ij} \quad (1)$$

dengan  $a_{ij}$ : keuntungan per unit produk  $x_{ij}$

$x_{ij}$ : jumlah unit produk  $x_{ij}$

$x_{ij}$  merupakan variabel keputusan untuk menghasilkan keuntungan maksimum

$$\text{Dampak lingkungan: } G(Y) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^k b_{ij}^T y_{ij} \quad (2)$$

dimana  $b_{ij}$ : biaya dampak lingkungan  $y_{ij}$

$y_{ij}$ : jumlah unit  $y_{ij}$

$b_{ij}$ : biaya konsumsi per unit  $y_{ij}$

$y_{ij}$  merupakan variabel keputusan untuk menghasilkan biaya minimum.

**maks. ekoefisiensi** = rasio antara (**maks  $\Sigma$  Nilai Produk dan atau Jasa**)  
dengan (**min  $\Sigma$  Dampak Lingkungan**)

$$= \frac{\text{maks} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij}^T x_{ij}}{\text{min} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^k b_{ij}^T y_{ij}} \quad (3)$$

Pemilihan komponen indikator ekonomi dan indikator dampak lingkungan bergantung pada kebijakan dan target para pemangku kepentingan. Nilai ekoefisiensi tinggi karena kinerja ekonomi relatif lebih tinggi dari dampak lingkungan. Tetapi terjadinya dampak lingkungan akan mempengaruhi daya dukung lingkungan, dan hal ini tidak disertakan dalam perhitungan ekoefisiensi. Padahal dampak lingkungan yang terjadi akan mempengaruhi kelangsungan kehidupan dan aktivitas didalamnya.

### Pengukuran Daya Dukung Lingkungan

Indikator daya dukung lingkungan dari suatu kawasan bergantung pada aktivitas yang dilakukan dikawasan dan sekitarnya. Setiap terjadinya perubahan aktivitas merupakan panduan untuk mengidentifikasi batas kemampuan lingkungan atau daya dukung lingkungan. Implikasi dari pengukuran indikator perlu dievaluasi dalam konteks tujuan (*objective*) yang telah ditentukan, demikian juga dengan sensitivitas dari kawasan. Indikator merupakan faktor penting, tetapi bukan satu-satunya faktor penting dalam mengelola kawasan industri. Indikator yang dipilih harus dapat merefleksikan komponen-komponen dari daya Dukung Lingkungan. Tiga jenis indikator untuk menggambarkan komponen daya dukung lingkungan adalah (Coccosis dkk., 2001):

- Indikator ekologis-fisik
- Indikator sosio-demografi
- Indikator politik-ekonomi

Menurut kakarakteristik dari sumber daya alam, serta tingkat perkembangan ekonomi dan kondisi ekosistem lingkungan, sistem indikator dari daya dukung ekosistem dapat dikategorikan dalam dua jenis (Xingfu, 2009), yaitu:

1. Sistem indikator pendukung produktifitas, yang mencakup lingkungan alam, potensi sumber daya dan pengembangan yang merefleksikan daya dukung ekologi lingkungan untuk perkembangan ekonomi dan sosial.
  - a. Lingkungan alam: Curah hujan, kawasan hijau, persentasi kawasan hijau pada daerah yang dibangun, ruang hijau jalan (*road green space*), dll.
  - b. Sumber daya alam: Total sumber daya air, Panjang pipa bahan bakar gas, produksi bahan bakar, Energi yang dihasilkan oleh pembangkit energi, kepemilikan tanah per kapita, kawasan terbangun per kapita, dll.
  - c. Potensi peningkatan: GDP per capita, Gross industrial output, Nilai output dari perkebunan, peternakan dan perikanan, total ekspor, Kecepatan pembuangan limbah

- industri, investasi pada konservasi air alam, investasi pada proyek penghijauan, panjang pipa drainase, dll.
2. Sistem indikator tekanan pada lingkungan atau penurunan kualitas lingkungan (*depletion indicators system*), mencakup polusi lingkungan, pertumbuhan populasi dan penurunan sumber daya alam, menggambarkan tekanan pada ekosistem lingkungan dari perkembangan ekonomi dan sosial.
    - a. Penurunan kualitas sumber daya alam: volume air yang terjual, volume bahan bakar gas yang terjual, supply energi listrik, supply energi panas, konsumsi energi per kapita, dll.
    - b. Tekanan pada lingkungan: Produksi abu industri, produksi limbah industri, pembuangan gas sisa industri, total pembuangan air limbah industri, dll.

Salah satu teknik perhitungan daya dukung lingkungan adalah dengan evaluasi kuantitatif seperti yang dilakukan oleh Xingfu dkk. (2009) pada kawasan baru Tianjin Binhai di China. Evaluasi dari sistem indikator produktifitas, maupun sistem indikator tekanan dirumuskan sebagai berikut:

$$F_k = \sum_{i=1}^n Z_i \times W_i \quad (4)$$

dimana:

$F_k$ : nilai evaluasi

$Z_i$ : nilai standar dari indikator ke-i

$W_i$ : bobot indikator ke-i

Selanjutnya nilai daya dukung lingkungan adalah:

$$K = \Delta s - \Delta p \quad (5)$$

dimana

$K$ : nilai dari daya dukung lingkungan

$\Delta s$ : kecepatan perubahan tahunan dari sistem indikator produktif.

$\Delta p$ : kecepatan perubahan tahunan dari sistem indikator tekanan

Pada kawasan industri, titik equilibrium dapat merupakan keseimbangan antara daya dukung produktif lingkungan dan tekanan pada daya dukung lingkungan, terhadap produktivitas lingkungan. Pada jumlah kegiatan yang relatif rendah atau jumlah produksi rendah ( $N \ll K$ ), kecepatan peningkatan produksi sama dengan  $r_0$ . Parameter  $r_0$  dapat digambarkan sebagai kecepatan peningkatan produksi dalam keadaan normal tanpa adanya faktor penghambat. Parameter  $K$  adalah batas atas kecepatan peningkatan kegiatan atau produksi, yaitu Daya Dukung Lingkungan.

Jika jumlah produksi melebihi daya dukung lingkungan  $K$ , maka peningkatan mengikuti persamaan dinamis berikut:

$$\frac{dN}{dT} = rN = r_0 N \left(1 - \frac{N}{K}\right) \quad (6)$$

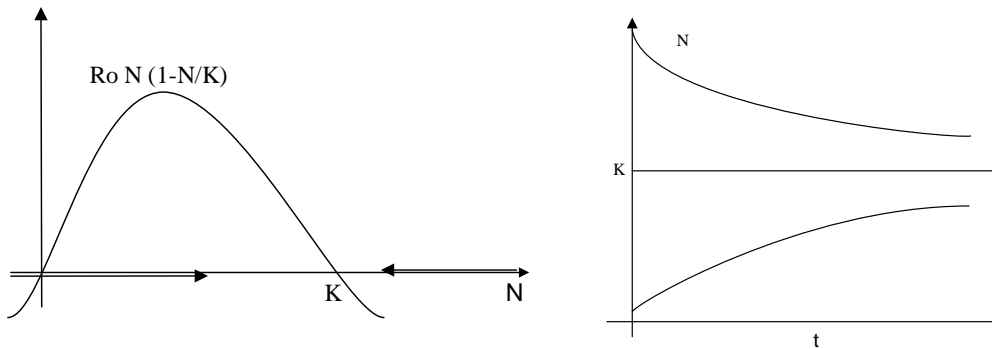
dengan solusi:

$$N_t = \frac{N_0 K}{N_0 + (K - N_0) \exp(-r_0 t)} \quad (7)$$

Terdapat tiga kemungkinan:

- Jumlah produksi meningkat dan mencapai fase stagnan atau stabil ( $N_0 < K$ ).
- Jumlah produksi menurun dan mencapai fase stabil ( $N_0 > K$ )
- Jumlah produksi tidak berubah ( $N_0 = K$  atau  $N_0 = 0$ )

Diagram 'fase' dan solusi dapat dilihat pada gambar 2.



**Gambar 2.** Diagram 'fase' dan solusi.

Maka titik stationer atau titik 'equilibrium' adalah:  $N(1 - \frac{N}{K}) = 0 \Rightarrow N = 0, K$ .

Dengan demikian, titik equilibrium  $N = K$  adalah stabil dan  $N = 0$  tidak stabil

Dalam konteks kawasan industri, titik keseimbangan daya dukung lingkungan dapat dihasilkan dengan menyertakan perilaku kegiatan di kawasan, perilaku jangka panjang, dugaan perilaku secara umum, kondisi awal, dan parameter.

Sebagai contoh, misalkan kecepatan peningkatan produksi  $R$ , menurun secara linier.

$$R = R(N_i) = r(1 - N_i / K) \quad (8)$$

Misalkan  $x_i = N_i / K$  dan  $x_{i+1} = rx_i(1 - x_i)$ .

Titik stabil atau 'steady-state':  $N_i = N$  untuk semua  $i$ ,  $N$  konstanta dan memenuhi

$$N = f(N) \text{ sehingga } \lim_{i \rightarrow \infty} N_i = R = R(N_i) = N$$

$x_i = x \rightarrow x = rx(1 - x) \rightarrow x = 0$  atau  $x = 1 - 1/r$  merupakan titik tetap atau "fixed points"

Untuk mengevaluasi stabilitas, maka dikaji apa yang terjadi jika dalam tahun ke- $i$ , produksi mendekati nilai stabil.

$$N_i = N + n_i; n_i \text{ kecil}$$

$$N_i = f(N_{i-1}) \text{ mengakibatkan } N + n_i = f(N + n_{i-1})$$

Karena  $n_{i-1}$  kecil, maka pengembangan deret Taylor:

$f(N + n_{i-1}) \approx f(N) + f'(N).n_{i-1} \rightarrow N + n_i = f(N) + f'(N).n_{i-1} \rightarrow n_i = f'(N).n_{i-1}$  sehingga  $n_i = n_0[f'(N)]^i$ . Maka perilaku atau karakter stabilitas bergantung pada  $f'(N)$ .

Perilaku dari  $n_i / n_0$  dapat dilihat dan dikaji untuk setiap nilai  $f'(N)$ , yaitu jika

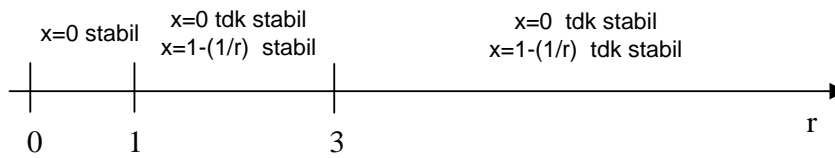
$$f'(N) > 1; f'(N) = 1; 0 < f'(N) < 1; f'(N) = 0; -1 < f'(N) < 0; f'(N) = -1; f'(N) < -1$$

Sedangkan untuk  $|f'(N)| < 1$ , perilaku  $n_i / n_0$  stabil, dan untuk  $|f'(N)| > 1$  perilaku  $n_i / n_0$  tidak stabil.

$$\text{Untuk persamaan } x_{i+1} = rx_i(1 - x_i), f(x) = rx(1 - x) \rightarrow f'(x) = r(1 - 2x)$$

Stabilitas dari  $x = 0$ ;  $f'(0) = r$ , maka jika  $0 < r < 1$ , stabil.

Stabilitas untuk  $x = 1 - 1/r \rightarrow f'(1 - 1/r) = 2 - r$ , maka jika  $1 < r < 3$ , stabil.



Gambar 3. Diagram stabilitas.

**Ekoefisiensi Optimal dalam Batas Keseimbangan Daya Dukung Lingkungan**

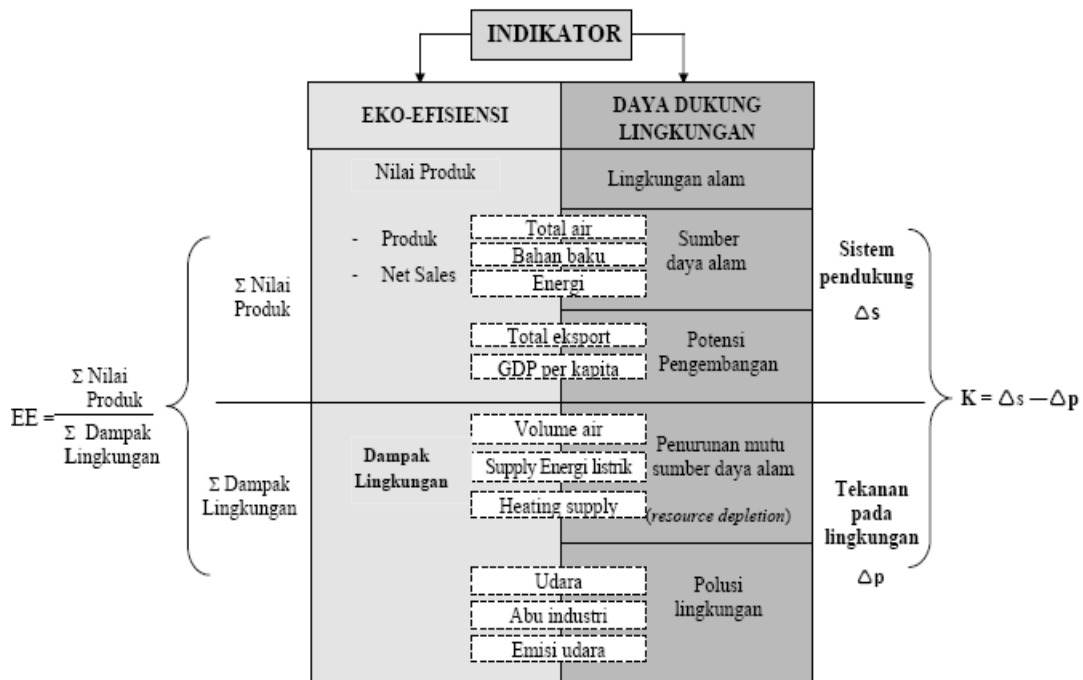
Dalam bentuk masalah optimisasi, maka peningkatan ekoefisiensi dapat dilakukan secara optimal dalam batas daya dukung lingkungan dengan bentuk persamaan sebagai berikut:

$$\text{maks } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij}^T x_{ij} \text{ (bagian pembilang pada rasio ekoefisiensi)}$$

$$\text{min } \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^k b_{ij}^T y_{ij} \text{ (bagian penyebut pada rasio ekoefisiensi)}$$

yang merupakan fungsi tujuan dengan variable keputusan adalah  $x_{ij}$  dan  $y_{ij}$ ;

Bagan berikut menggambarkan hubungan daya dukung lingkungan dan ekoefisiensi secara konseptual.



Gambar 4. Diagram hubungan ekoefisiensi dengan daya dukung lingkungan.

Dengan formulasi masalah optimisasi dengan kendala, maka perlu dicari hubungan  $x_{ij}$  dan  $y_{ij}$  dengan titik keseimbangan daya dukung lingkungan sebagai batas atas dari fungsi kendala. Fungsi kendala terdiri atas  $G_i(X,Y) \leq K_D$  dan  $H_i(X,Y) \leq K_S$  dimana  $K_D$  merupakan titik keseimbangan tekanan pada daya dukung lingkungan,  $K_S$  merupakan titik keseimbangan produktif pada daya dukung lingkungan.



## **KESIMPULAN**

Titik stabil daya dukung lingkungan dapat disertakan dalam usaha peningkatan keefisiensi, dengan memfungsikan titik stabil daya dukung lingkungan sebagai faktor pengendali. Dalam menentukan titik stabil daya dukung lingkungan pada kawasan industri, perlu dievaluasi perilaku kegiatan di kawasan. Perilaku kegiatan mencakup perilaku jangka panjang, dugaan perilaku secara umum, kondisi awal, dan parameter. Keefisiensi yang optimal dapat dihitung dengan menggunakan formulasi masalah optimisasi dengan kendala, dimana fungsi daya dukung lingkungan merupakan kendala atau domain untuk setiap variabel keputusan pada fungsi tujuan. Pada kawasan industri, titik equilibrium dapat merupakan keseimbangan antara daya dukung produktif lingkungan dan tekanan pada daya dukung lingkungan terhadap produktivitas lingkungan. Konsep evaluasi keefisiensi dengan 'daya dukung ekologi' sebagai indikator utama bermanfaat sebagai rujukan dalam pengembangan suatu kawasan industri, agar setiap kebijakan dan perencanaan program kegiatan dalam kawasan industri merujuk pada daya dukung lingkungan. Dengan demikian keberadaan kawasan industri dapat menghasilkan tujuan ekonomi secara maksimal dalam koridor daya dukung lingkungan sehingga kualitas lingkungan tidak menurun.

## **Daftar Pustaka**

- Boosik, K. "Development of Indicators for Eco-efficient Water Infrastructure." Workshop on Eco-Efficient Water Infrastructure Planning and Management for Climate Change Adaptation, Bangkok, 2009.
- Carlson, R., "Eco-Efficiency: The Conceptual Model, The Concept Model and Operational Data Structure." CPM Report Sweden, 2009.
- Glauser, M., Muller, P. "Eco-efficiency: A Prerequisite for Future Success." CHIMIA 51 (1997): 201–206.
- Hukkinen, J. "Eco-Efficiency as Abandonment of Nature." Ecological Economics 38 (2001): 311–315.
- Lowe, E. "Eco-Industrial Park: A Foundation for Sustainable Communities." A Lecture Notes, Indigo Department, 2002.
- Metti, G. "Global Environmental Factors and Eco-Efficiency." Beverage World (1999): 82–83.
- Mickwitz, P., Melanen, M., Rosenström, U., Seppälä, J. "Regional Eco-efficiency Indicators: a Participatory Approach." Journal of Cleaner Production 14 (2006): 1603–1611.
- Park, H. S. Development of Eco-Efficiency Indicators for Eco-Industrial Park: A Case Study of Ulsan. Ulsan Eco-Center, KICOX, South Korea. 2009.
- Seppälä, J., Melanen, M., Mäenpää, I., Koskela, S., Tenhunen, J., dan M. Hiltunen. "How Can the Eco-efficiency of a Region be Measured and Monitored?" Journal of Industrial Ecology 9 (2005): 117–130.
- Tibbs, H. Industrial Ecology: An Environmental Agenda for Industry. 2005
- World Business Council For Sustainable Development (WBCSD). Measuring Eco-efficiency: A Guide to Reporting Company Performance. 2000.
- Xingfu, L. dan Xu He. "Quantitative Evaluation on Urban Ecosystem Carrying Capacity in Tianjin Binhai New Area." Chinesse Journal of Population Resources and Environment 7 4 (2000).
- Zhang, B., Jun Bi, Ziyang Fan, Zengwei Yuan and Junjie Ge. "Eco-efficiency Analysis of Industrial System in China: A Data Envelopment Analysis Approach." Journal of Ecological Economics 68 (2008): 306-361.
- [http://ec.europa.eu/environment/iczm/pdf/tcca\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/environment/iczm/pdf/tcca_en.pdf); Akses 20 April 2010.
- [http://www.greengrowth.org/capacity\\_building/Download/Hanoi/Eco\\_Efficiency\\_Vietnam\\_workshop.pdf](http://www.greengrowth.org/capacity_building/Download/Hanoi/Eco_Efficiency_Vietnam_workshop.pdf); Akses 18 Mei 2010.
- <http://www.sustainable.doe.gov/articles/indexs/shtml>; Akses 30 Nopember 2009.

