

PERANCANGAN MODEL REDUKSI EMISI GAS RUMAH KACA DARI INDUSTRI BIODISEL KELAPA SAWIT

DESIGNING MODEL OF GREENHOUSE GAS EMISSION REDUCTION FROM PALM OIL BODIESEL INDUSTRY

Hermawan Prasetya^{1)*}, Yandra Arkeman²⁾, Erliza Hambali³⁾, M. Ikhwanuddin Mawardi⁴⁾, Rizaldi Boer⁵⁾

¹⁾Pusat Pengkajian Kebijakan Difusi Teknologi, BPPT
Gedung Manajemen Lt. 2, Kawasan Puspitek, Serpong, Banten, Indonesia
E-mail: hermawanprasetya@gmail.com

²⁾Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Indonesia

³⁾Surfactant and Bioenergy Research Center (SBRC), IPB, Indonesia

⁴⁾Pusat Pengkajian dan Penerapan Teknologi Lingkungan, BPPT, Indonesia

⁵⁾Centre for Climate Risk and Opportunity Management in Southeast Asia Pasific (CCROM - SEAP), IPB, Indonesia

Makalah: Diterima 2 Maret 2015; Diperbaiki 21 Agustus 2015; Disetujui 1 September 2015

ABSTRACT

Life cycle assessment (LCA) has been gaining popularity to measure environmental impacts including greenhouse gas emission. LCA employs system and comprehensive approach with static nature for a certain time limit. This research aimed to design a model greenhouse gas reduction from palm oil biodiesel industry which can simulate greenhouse gas emission until 2020 under application with some emission reducing technologies. Dynamic system method which deals with system approach and dynamic over time was employed to improve it. By employing the System Dynamic Life Cycle Model (SDLCM), greenhouse gas emission was simulated until 2020. Pattern of calculation greenhouse gas emission from SDLCM was non-linear pattern over 1990-2020. Also, SDLCM may be employed in calculation of emission reduction from several application of technologies.

Keyword: greenhouse gas, palm oil biodiesel, life cycle assessment, system dynamic

ABSTRAK

Pengkajian siklus hidup (*Life cycle assessment =LCA*) merupakan metode populer untuk menghitung dampak-dampak lingkungan termasuk emisi gas rumah kaca (GRK). LCA merupakan pendekatan sistem dan komprehensif, namun bersifat statis, sehingga tidak mampu menjelaskan perubahan dinamis seiring perubahan waktu. Tujuan dari penelitian ini adalah merancang model pengurangan emisi GRK dari industri biodiesel kelapa sawit yang dapat digunakan untuk mensimulasikan pengurangan emisi GRK hingga tahun 2020 melalui penerapan beberapa teknologi reduksi emisi. Metode sistem dinamis mampu menangkap dinamika perubahan seiring dengan perubahan waktu digunakan untuk pengembangan model siklus hidup yang dinamis (*System Dynamic Life Cycle Model =SDLCM*). Model yang dikembangkan ini dapat memprediksi emisi GRK dari industri biodiesel kelapa sawit yang menunjukkan pola yang tidak linear. Model ini juga dapat digunakan untuk menghitung besarnya reduksi emisi GRK dengan penerapan beberapa teknologi.

Kata kunci: gas rumah kaca, biodiesel kelapa sawit, kajian siklus hidup, dinamika sistem

PENDAHULUAN

Salah satu produk turunan dari minyak sawit yang mempunyai potensi besar di pasar internasional adalah biodiesel (*methyl ester*). Pada beberapa tahun terakhir, pertumbuhan produksi bioenergi dunia termasuk biodiesel mengalami pertumbuhan yang cepat. Selama kurun waktu 2000-2009 telah terjadi peningkatan produksi biodiesel meningkat dari 0,8 menjadi 14,7 milyar liter (Sorda *et al.*, 2010). Pertumbuhan bioenergi tersebut sangat dipengaruhi oleh intervensi pemerintah dengan berbagai kebijakan (Growth, 2011; Sorda *et al.*, 2010). Banyak negara saat ini mengadopsi kebijakan yang mendorong penggunaan bahan bakar hayati (Growth, 2011; Sheil *et al.*, 2009; Sorda *et al.*, 2010).

Beberapa negara tujuan import biodiesel kelapa sawit telah menetapkan pengurangan emisi gas rumah kaca dari proses produksi industri biodiesel kelapa sawit sebagai salah satu standar yang harus dipenuhi oleh negara eksportir. Pemerintah Amerika Serikat telah menetapkan standar pengurangan emisi siklus hidup gas rumah kaca (*reduction in lifecycle GHG emissions*) sebesar 20 % untuk bahan bakar yang terbarukan (*renewable fuel*), 50% untuk diesel yang diproduksi dari biomassa (*biomass-based diesel or advanced biofuel*), dan 60% untuk bahan bakar yang diproduksi dari selulos (*cellulosic biofuel*) (EPA, 2010b). Uni Eropa mensyaratkan pengurangan emisi gas rumah kaca dari bahan bakar nabati sebesar 35 % (Sheil *et al.*, 2009).

Pengkajian siklus hidup (*life cycle assessment*=LCA) adalah metode yang populer digunakan untuk menghitung dampak lingkungan dari suatu produk (Hidayatno *et al.*, 2011). Salah satu dampak lingkungan yang sering dihitung adalah emisi gas rumah kaca. Penggunaan LCA untuk menganalisis dampak lingkungan dari produk bioenergi telah banyak dilakukan. Sebagai gambaran, Cherubini dan Strømman (2011) telah mereview 94 publikasi studi tentang LCA terhadap produk bioenergi selama 15 tahun terakhir.

Metode LCA sangat baik untuk memberikan informasi dampak lingkungan yang menyeluruh (*big picture*) (Hidayatno *et al.*, 2011) dan mampu menganalisis struktur yang kompleks (Davis *et al.*, 2009). Kelemahan dari LCA adalah sifatnya yang statis atau linear (Davis *et al.*, 2009; Hidayatno *et al.*, 2011). Sifat LCA yang linear ini tidak akan menggambarkan aspek dinamika waktu (Hidayatno *et al.*, 2011) dan ketidakpastian yang dihadapi dalam pengukuran emisi gas rumah kaca, yang berupa ketidakpastian perubahan penggunaan lahan dan amortisasinya seiring dengan perubahan waktu (Cherubini dan Strømman, 2011; EPA, 2010a), emisi nitrogen (N) karena penetapan kadar pupuk yang tepat (Cherubini dan Strømman, 2011) dan perubahan ekonomi terkait dengan pasar bahan baku biodiesel di pasar internasional (EPA, 2010a).

Metode sistem dinamis dapat digunakan untuk memperbaiki sifat statis dari LCA. Hal ini karena sistem dinamis mampu secara baik menggambarkan perilaku sistem yang kompleks sejalan dengan perubahan waktu (Turcksin dan Macharis, 2010). Beberapa studi sudah menggunakan model sistem dinamis untuk simulasi reduksi emisi gas yang dapat diterapkan untuk menyusun skenario, simulasi kebijakan dan memproyeksikan emisi gas CO₂ (Anand *et al.*, 2005; Changsirivathanathamrong *et al.*, 2002). Model sistem dinamis tersebut telah disusun pada tingkat kota (Lee, 2010; Lei *et al.*, 2012) dan tingkat industri (Anand *et al.*, 2005; Souza *et al.*, 2010).

Perbaikan LCA di tingkat industri dilakukan dengan mengembangkan model yang menggabungkan antara model industri yang memperhatikan aspek spasial (*industrial models with spatially explicit*) dan model ekosistem yang memperhatikan aspek lokasi dan dinamikanya (*dynamic and site-specific ecosystem models*) (Reap *et al.*, 2003). Perbaikan metode LCA di tingkat industri, juga dilakukan dengan memodelkan keterkaitan antar sektor terkait dengan rantai pasok biodiesel. Pemodelan sistem dinamis ini mencakup aspek budidaya, pengangkutan, pemrosesan, distribusi dan pemanfaatannya (Halog dan Manik, 2011).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang model LCA menggunakan dinamika sistem. Model sistem dinamis ini digunakan untuk melakukan simulasi emisi gas rumah kaca dari

industri biodiesel kelapa sawit dari tahun 2014-2020 melalui penerapan beberapa teknologi untuk mengurangi emisi tersebut.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metodologi sistem dinamis. Sistem dinamis dikembangkan oleh Professor Jay Forrester dari *The Sloan School of Management* pada tahun 1960-an. Sistem dinamis adalah metode efektif yang terkait dengan perubahan waktu atau interaksi dinamis dari komponen-komponen dalam sistem yang rumit (Ghazanfari *et al.*, 2009).

Identifikasi Model

Identifikasi model merupakan upaya mendefinisikan masalah, penentuan tujuan dan batasan model serta rentang waktu simulasi yang akan digunakan. Identifikasi model ini dilakukan dengan melakukan sintesis terhadap literatur dan kebijakan pengurangan emisi gas rumah kaca.

Perancangan Model

Berdasarkan identifikasi spesifikasi model, disusun model mental direpresentasikan ke dalam diagram sebab akibat (*causal loop diagram*). Diagram ini akan memberikan pemahaman hubungan antara elemen-elemen sistem dalam rangka merancang dan mengontrol kondisi yang diinginkan dimasa depan. Berdasarkan diagram ini disusun diagram bersifat kualitatif yaitu diagram stok-aliran (*stock flow diagram*) dan penentuan rumus laju perubahan (*differential equation*). Berdasarkan komponen-komponen dalam diagram stok-aliran tersebut dikumpulkan data sekunder dari industri kelapa sawit.

Kebutuhan Data

Data yang dibutuhkan dalam pengembangan model ini adalah data aktivitas yang berpotensi menimbulkan emisi GRK dan faktor emisinya untuk masing-masing sub model. Data aktivitas yang dikumpulkan untuk masing-masing sub model adalah sebagai berikut:

- Sub Model Budidaya TBS: perubahan lahan, perkebunan sawit, benih dan pembibitan, produksi kelapa sawit, pemupukan dan konsumsi bahan bakar.
- Sub Model Produksi Biodiesel: input material, produk utama dan produk sampingan dari PKS, refinari, transterifikasi dan pencampuran biodiesel.
- Sub Model Emisi GRK: faktor emisi material, energi dan bahan kimia pada proses produksi TBS, produksi CPO, RPO, biodiesel dan pencampuran biodiesel.
- Sub Model Transportasi: produksi yang diangkut, jumlah sarana angkut, dan konsumsi per sarana, jarak.

- e. Sub Model Teknologi Reduksi: berupa jenis teknologi, varian teknologi dan spesifikasi teknologi terkait dengan emisi GRK.

Validasi dan Simulasi Model

Simulasi model menghasilkan luaran persentase pengurangan emisi GRK dan biaya mitigasi. Rumus pengurangan emisi GRK disajikan sebagai berikut:

$$RE = \frac{(E_F - E_B)}{E_F} \times 100 \%$$

dimana:

- RE = Pengurangan Emisi GRK (dalam %),
 E_F = Emisi GRK dari produksi dan penggunaan bahan bakar minyak ($grCO_{2eq}/MJ$ disel),
 E_B = Emisi GRK dari produksi dan penggunaan biodiesel kelapa sawit ($grCO_{2eq}/MJ$ biodisel).

Validasi model merupakan salah satu tahap penting dalam metode sistem dinamis (Ullah, 2005). Dalam penelitian ini, validasi dilakukan membandingkan data hasil simulasi dengan data kajian sejenis. Perbandingan tersebut hanya melihat besaran emisi GRK dan reduksinya, namun tidak bisa memvalidasi perilaku. Hal ini studi yang digunakan sebagai pembanding adalah perhitungan LCA yang bersifat statis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Identifikasi Model

Berdasarkan sintesis literatur dan peraturan maka diperoleh hasil identifikasi model sebagai berikut:

1. Model pengurangan emisi gas rumah kaca yang disusun merupakan model LCA yang menggunakan dinamika sistem. Integrasi LCA dengan sistem dinamis disebut dengan model sistem dinamis siklus hidup (*System Dynamic Life Cycle Model* = *SDLCM*) (Changsirivathanathamrong *et al.*, 2002).
2. Penyusunan model ini diarahkan untuk menghitung pengurangan emisi gas rumah kaca dari industri biodiesel kelapa sawit. Pengurangan emisi gas rumah kaca ini merupakan salah satu standar yang harus dipenuhi untuk bisa mengeksport biodiesel (EPA, 2010b; Sheil *et al.*, 2009). Model ini juga diarahkan untuk memprediksi reduksi GRK melalui penerapan teknologi reduksi emisi gas rumah kaca. Hal ini karena penerapan teknologi yang tepat mempunyai kontribusi yang besar (lebih dari 60%) dalam pengurangan emisi gas rumah kaca (Akashi *et al.*, 2012).
3. Tahun simulasi hingga 2020 dan model ini didesain mempunyai lingkup dari budidaya kelapa

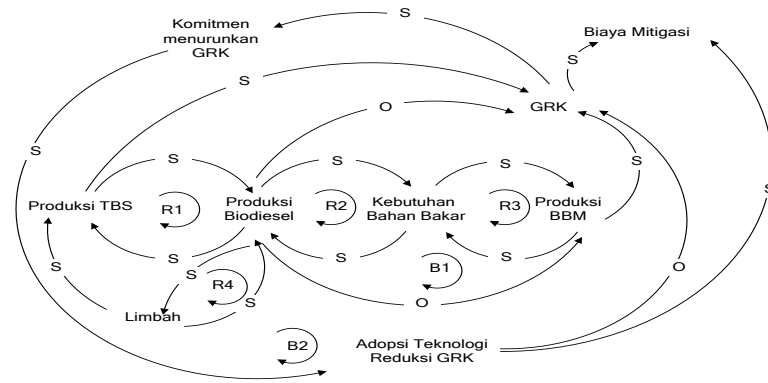
sawit sampai produksi biodiesel. Lingkup ini dalam terminologi LCA dikenal sebagai *cradle to gate*. Dalam SDLCM, dampak lingkungan yang dihasilkan dari proses produksi bioenergi dikaitkan dengan respon terhadap kebijakan yang diambil atau dibandingkan sistem bahan bakar fosil. LCA ini selanjutnya disebut dengan LCA konsekuensi (*consequential LCA*) (Cherubini dan Strømman, 2011).

Model Sistem dinamis Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca

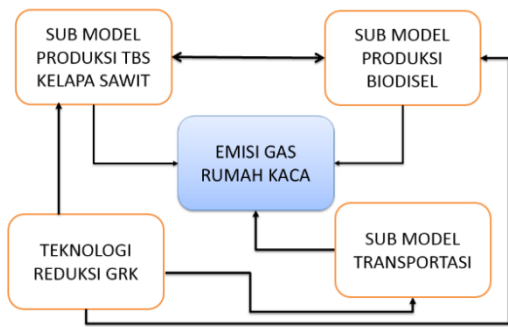
Rancangan model (1) sistem dinamis pengurangan emisi GRK diwujudkan dalam dua macam diagram, yaitu (1) Diagram sebab akibat yang bersifat kualitatif, dan (2) diagram stok-aliran yang bersifat kuantitatif. Diagram sebab akibat dibuat untuk menggambarkan komponen-komponen sistem dan keterkaitannya serta digunakan untuk menunjukkan batasan model. Sementara diagram stok-aliran digunakan untuk melakukan simulasi pengurangan emisi GRK dan biaya mitigasi dengan berbagai pilihan adopsi teknologi-teknologi untuk mengurangi emisi GRK. Diagram sebab akibat disajikan dalam Gambar 1.

Gambar 1 menunjukkan bahwa model yang disusun terdiri atas 4 *loop* positif dan 2 *loop* negatif. *Loop* positif terdiri dari (1) produksi TBS-biodiesel (R1), (2) Kebutuhan bahan bakar (R2), (3) produksi BBM (R3), dan produksi limbah (R4). Sementara *loop* negatif terdiri dari Produksi biodiesel-BBM (B1) dan Adopsi teknologi untuk reduksi GRK (B2). Sementara notasi *s* menunjukkan hubungan positif, sementara notasi *o* menunjukkan hubungan negatif. Berdasarkan diagram sebab-akibat tersebut disusun diagram stok-aliran untuk melakukan simulasi penurunan emisi GRK pada berbagai skenario adopsi teknologi. Diagram stok-aliran yang disusun terdiri dari 5 sub model utama, yaitu (1) sub model produksi TBS, (2) sub model produksi biodiesel, (3) sub model transportasi bahan baku dan produk antara untuk produksi biodiesel, dan (4) sub model emisi GRK serta (5) Sub Teknologi Reduksi yang berupa aplikasi teknologi mitigasi emisi GRK. Hubungan antar sub-sub model tersebut secara skematis digambarkan dalam Gambar 2.

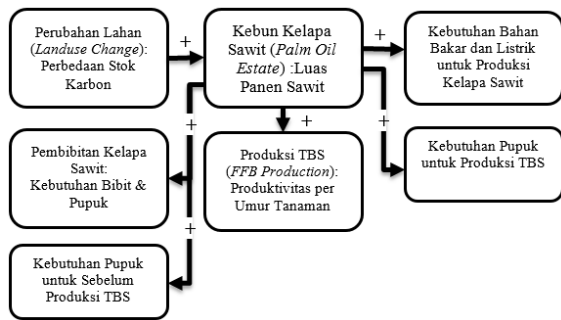
Sub model budidaya dibagi lagi ke dalam 7 bagian, yaitu penggunaan lahan, perkebunan kelapa sawit, produksi kelapa sawit, pembibitan kelapa sawit, kebutuhan pupuk untuk pembibitan, kebutuhan pupuk untuk tanaman menghasilkan dan kebutuhan pupuk untuk tanaman belum menghasilkan serta kebutuhan energi untuk budidaya kelapa sawit. Produksi kelapa sawit dalam sub model diprediksi dengan menggunakan fungsi luas lahan dan produktivitas tanaman sesuai dengan umurnya. Struktur model sub model ini disajikan pada Gambar 3.



Gambar 1. Diagram sebab akibat model pengurangan GRK dari industri biodiesel kelapa sawit



Gambar 2. Struktur model reduksi GRK dari industri biodiesel kelapa sawit



Gambar 3. Struktur sub model produksi tandan buah segar (TBS) kelapa sawit

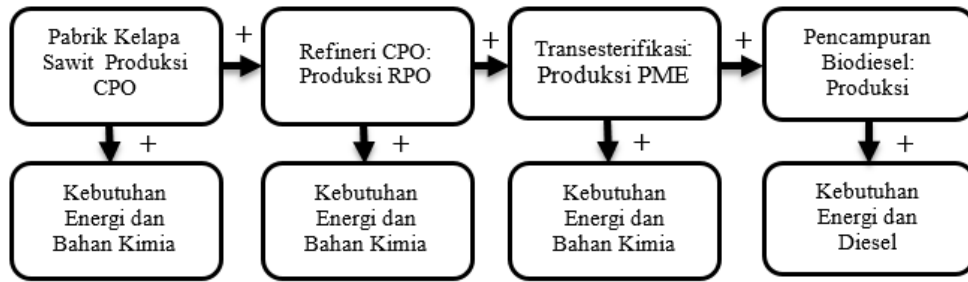
Submodel produksi biodiesel menggambarkan proses produksi kelapa sawit dari TBS yang dihasilkan dalam sub model sebelumnya. Proses produksi tersebut secara bertahap adalah (1) Pengolahan TBS untuk menghasilkan *Crude Palm Oil* (CPO), (2) Refineri CPO untuk menghasilkan *Refined Palm Oil* (RPO), (3) Transesterifikasi yang

mengolah RPO menjadi *Methyl Ester* (biodiesel) dan (4) proses pencampuran (*blending*) antara biodiesel dengan solar untuk mendapatkan biosolar dengan konsentrasi dengan kadar biodiesel yang telah ditetapkan. Dalam penyusunan sub model ini produksi biodiesel dirumuskan merupakan fungsi bahan baku, kapasitas produksi dan utilitas kapasitas produksi. Struktur sub model produksi biodiesel disajikan dalam Gambar 4.

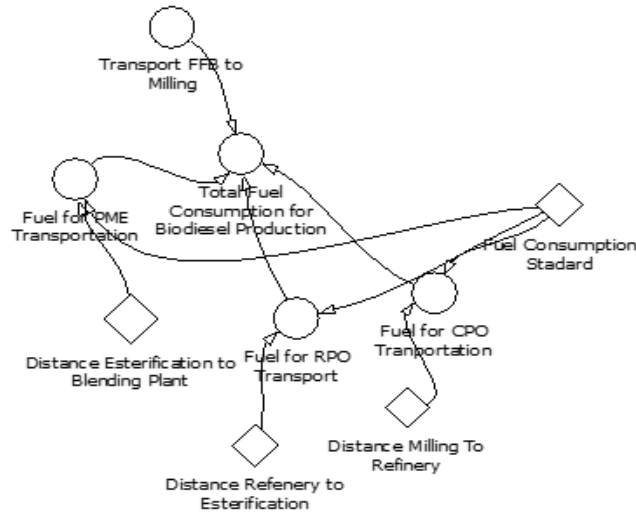
Sub model bahan bakar untuk transportasi berisi dua hal utama, yaitu (1) transportasi dalam bahan baku dan antara untuk produksi biodiesel dan (2) transportasi produk akhir biodiesel. Transportasi tersebut meliputi transportasi bahan baku biodiesel (TBS) ke PKS, bahan antara yang terdiri dari CPO dan RPO ke pabrik biodiesel serta transportasi biodiesel ke stasiun pencampuran biosolar.

Submodel emisi GRK berisi 10 bagian, yaitu (1) emisi dari perubahan lahan, (2) emisi dari pencembahan dan pembibitan kelapa sawit, (3) emisi dari budidaya tanaman belum menghasilkan, (4) emisi dari budidaya tanaman sudah menghasilkan, (5) emisi dari pabrik kelapa sawit, (6) emisi dari refinari CPO, (7) emisi dari transesterifikasi RPO, (8) emisi dari pencampuran biodiesel, (9) emisi dari transportasi, dan (10) emisi total dari rantai produksi biodiesel kelapa sawit. Struktur sub model ini disajikan dalam Gambar 6.

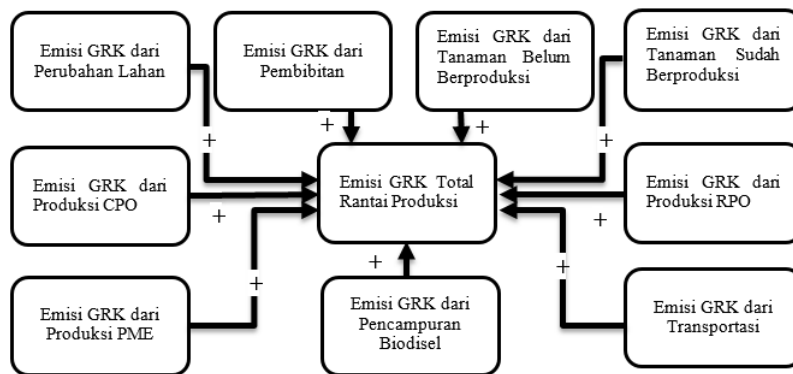
Sub model teknologi reduksi emisi terdiri dari penerapan beberapa teknologi reduksi emisi. Sub model teknologi berisi teknologi bibit unggul, kompos, penangkapan gas metana (*methan capture*), pembangkit listrik dari biomasa (sering disebut sebagai *combine heat power=CHP*) dan pemanfaatan campuran *palm oil fatty acid destilate* (PFAD) dengan gliserol sebagai bahan baku biodiesel.



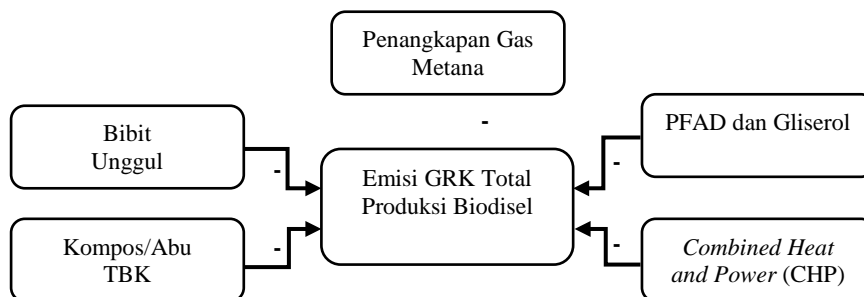
Gambar 4. Struktur sub model produksi biodiesel kelapa sawit



Gambar 5. Diagram stok-aliran sub model transportasi



Gambar 6. Struktur sub model emisi gas rumah kaca



Gambar 7. Sub model teknologi reduksi emisi

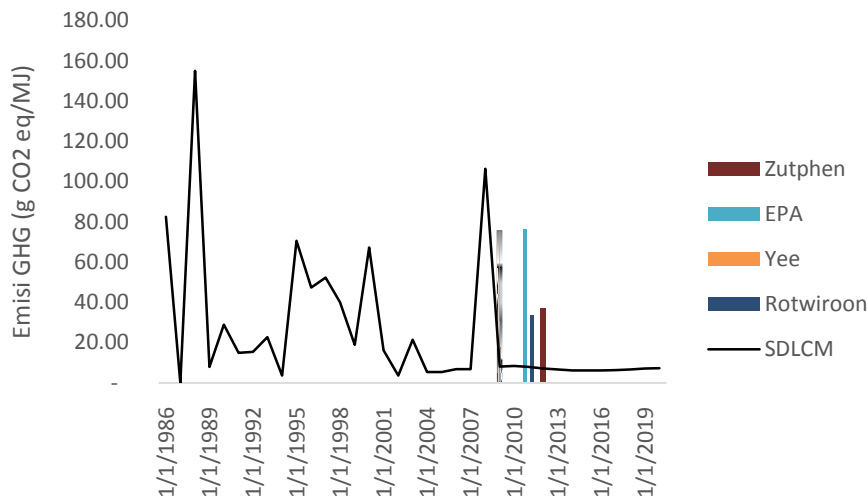
Validasi Model

Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi model ini dengan data perhitungan dari studi sejenis. Penggunaan perhitungan studi sejenis tersebut dilakukan karena tidak terdapat data pengukuran emisi GRK dari industri kelapa sawit. Perbandingan perhitungan dari model dan disajikan dalam Gambar 8.

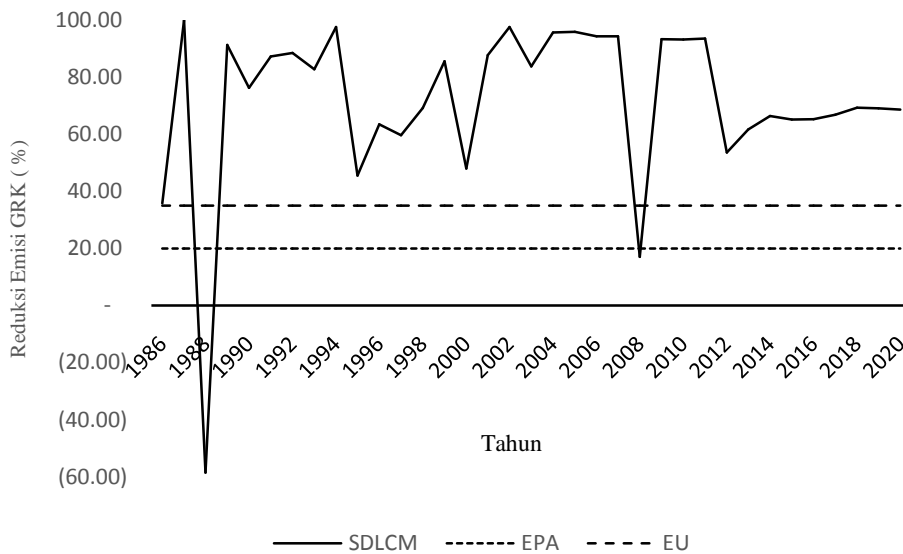
Berdasarkan Gambar 9, diatas dapat dilihat bahwa perhitungan emisi GRK hasil simulasi SDLCM pada tahun 2011, terletak diantara hasil perhitungan LCA statis. Hasil studi emisi GRK biodiesel kelapa sawit ada yang berada diatas model, yaitu 76,31 gr CO₂eq/MJ biodiesel (EPA, 2011) dan 75,68 gr CO₂eq/MJ biodiesel (Yee *et al.*, 2009).

Sementara hasil perhitungan yang lebih kecil dari SDLCM sebesar 37,15 grCO₂eq/MJ biodiesel (Rotwiroon *et al.*, 2012) dan 33,64 grCO₂eq/MJ biodiesel (Zutphen dan Wijbrans, 2011).

Selanjutnya model ini diarahkan untuk memprediksi reduksi emisi GRK dari industri biodiesel kelapa sawit. Perbandingan prediksi dengan model SDLCM dengan standar EPA dan Uni Eropa (EU) disajikan dalam Gambar 9. Dari prediksi tersebut, pada sebagian besar tahun simulasi reduksi emisi GRK diprediksikan dapat memenuhi standar EPA maupun EU. Nilai ini jauh lebih besar dibanding kajian reduksi emisi GRK dari biodiesel kelapa sawit yang hanya 17 % (EPA, 2011).



Gambar 8. Perbandingan perhitungan emisi GRK dari industri biodiesel kelapa sawit berdasarkan hasil simulasi Tahun 2015



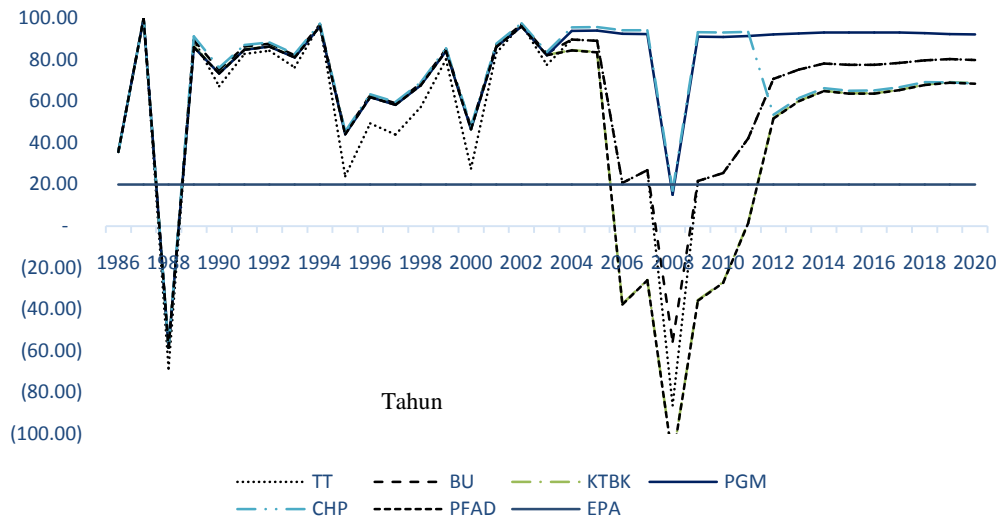
Gambar 9. Perbandingan perhitungan reduksi emisi GRK model dengan standar EPA dan EU berdasarkan hasil simulasi Tahun 2015

Simulasi Reduksi Emisi GRK Melalui Penerapan Beberapa Teknologi

Model SDLCM yang telah divalidasi, selanjutnya digunakan untuk melakukan simulasi reduksi emisi GRK melalui penerapan beberapa teknologi. Beberapa teknologi tersebut dipilih untuk mewakili setiap proses produksi biodiesel, baik pada saat budidaya, produksi dan penggunaan untuk transportasi. Pada proses budidaya dipilih teknologi pengomposan tandan buah kosong (TBK) kelapa sawit. Mulsa TBK ini dapat mensubstitusi beberapa pupuk yang digunakan dalam budidaya kelapa sawit seperti UREA, MOP dan Kiserit sebesar 0,61%, 0,59% dan 0,33% (Loekito, 2002). Pada proses produksi CPO (yang merupakan bagian dari produksi biodiesel), dipilih teknologi penangkapan gas metana (*methane capture*). Teknologi penangkap gas metana ini berperan sangat signifikan dalam mengurangi emisi gas rumah kaca, hingga lebih dari 70% (Prasetya *et al.*, 2013). Disamping itu pada pada pabrik kelapa sawit (PKS), juga berpotensi untuk dikembangkan pembangkit listrik dengan menggunakan limbah kelapa sawit baik berupa limbah padat (tandan buah kosong, cangkang dan fiber) atau limbah cair pabrik kelapa sawit (*palm oil mill effluent* = POME). Sementara dalam bidang transportasi, penggunaan biodiesel diharapkan mampu mengurangi emisi gas rumah kaca, khususnya emisi CO₂. Perbandingan emisi CO₂

dalam penggunaan dalam kilogram per 100 Km antara disel dan biodiesel adalah 13,4 dan 0,74 (Nanaki dan Koroneos 2012). Penggunaan CHP dapat mengurangi emisi GRK dengan mengurangi konsumsi listrik dari grid (PLN). Sementara penggunaan PFAD dan gliserol sebagai bahan baku biodiesel diasumsikan dapat mengurangi emisi GRK dengan penambahan produktivitas TBS dan mengurangi laju perubahan lahan.

Hasil simulasi reduksi emisi GRK dengan penerapan penerapan teknologi tersebut disajikan dalam Gambar 10. Dari gambar tersebut dapat dilihat hasil simulasi reduksi emisi GRK dari penerapan lima teknologi. Dari kelima teknologi tersebut teknologi penangkap metana, penggunaan bibit unggul dan CHP berperan secara signifikan dalam menurunkan emisi GRK. Teknologi penangkapan gas metana (*methane capture*) berperan memberikan tambahan reduksi sebesar rata-rata 19,33%, sementara penggunaan bibit unggul menambah reduksi sebesar 4,47% dan 13,7% CHP. Reduksi karena penggunaan CHP tersebut tidak jauh beda dengan penelitian yang sejenis, yang menunjukkan reduksi sebesar 10,3% pada transesterifikasi katalitik dan 12,0% pada transesterifikasi non katalitik (Rosmeika *et al.*, 2014). Sementara penggunaan kompos TBK dan penggunaan PFAD kurang berperan secara signifikan dalam menambah reduksi emisi GRK.



Keterangan: TT = tanpa teknologi, BU=bibit unggul, KTBK=kompos TBK, PGM=penangkapan gas metana, CHP=combined heat and power, PFAD=PFAD dan Gliserol sebagai bahan baku biodiesel

Gambar 10. Simulasi reduksi emisi GRK dengan SDLCM tahun 1986-2020 pada berbagai skenario penerapan teknologi berdasarkan hasil simulasi Tahun 2015

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penyusunan model SDLCM yang menggunakan sistem dinamis dapat lebih menggambarkan dan memprediksi emisi GRK, reduksi emisi dan penurunan emisi GRK dengan berbagai skenario penerapan teknologi reduksi GRK secara dinamis dari waktu ke waktu. Hasil prediksi penurunan emisi GRK menunjukkan bahwa hampir di setiap tahunnya reduksi emisi tersebut dapat memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh Amerika Serikat dan Uni Eropa.

Saran

Model SDLCM ini baru hanya mampu melakukan simulasi penurunan emisi GRK dengan berbagai skenario penerapan teknologi. Model ini disarankan untuk dilengkapi dengan prediksi biaya mitigasi (*mitigation cost*) sehingga dapat dilakukan pemilihan teknologi yang tepat baik dari segi kemampuan menurunkan emisi GRK dan biaya yang dikeluarkan untuk penurunan tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Akashi O, Hijioka Y, Masui T, Hanaoka T, Kainuma M. 2012. GHG emission scenarios in asia and the world: The key technologies for significant reduction. *Energy Econ.* 34: S346–S358.
- Anand S, Vrat P, dan Dahiya RP. 2005. Application of a system dynamics approach for assessment and mitigation of Co2 emissions from the cement industry. *J Environ Mgmt.* 79 (4) : 383–398.
- Changsirivathanathamrong A, Moore S, dan Linard K. 2002. Integrating system dynamic with life cycle assessment : A framework for improved policy formulation and analysis. [on line]. <http://www.mssanz.org.au/MODSIM01/Vol%203/Changsirivathanathamrong.pdf>. [28 Juni 2015].
- Cherubini F dan Strømman AH. 2011. Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. *Bioresour Tech.* 102: 437–451.
- Davis C, Nikoli I, dan Dijkema GPJ. 2009. Integration of life cycle assessment into agent-based modeling. *J Indust Ecol.* 13(2).
- EPA. 2010a. 40 CFR Part 80 Regulation of fuels and fuel additives: changes to renewable fuel standard program; final rule. federal register 75 (58). Friday, March 26.
- EPA. 2010b. Regulation of fuels and fuel additives: changes to renewable fuel standard program; final rule. 40 CFR Part 80[EPA–HQ–OAR–2005–0161; FRL–9112–3] RIN 2060–A081.
- EPA. 2011. Memorandum to air and radiation docket EPA-HQ-OAR-2011-0542 On calculation of lifecycle ghg emissions related to renewable fuels from palm oil-based biodiesel and renewable diesel. EPA, Washington DC.
- Ghazanfari M, Jafari M, dan Alizadeh S. 2009. An approach to solve fuzzy system dynamic problem. [online] <http://www.systemdynamics.org/conferences/2003/proceed/PAPERS/240.pdf> [27 Juli 2014].
- Growth W. 2011. *Prospek dan Arah Pengembangan Agribisnis Kelapa Sawit di Indonesia*. Laporan World Growth, Februari 2011.
- Halog A dan Manik Y. 2011. Advancing integrated systems modelling framework for life cycle sustainability assessment. *Sustainability.* 3 :469-499.
- Hidayatno A, Zagloel TYM, Purwanto WW, Carissa, Angraini L. 2011. Cradle to gate simple life cycle assessment of biodiesel production in Indonesia. *Makara Teknol.* 15(1): 9-16.
- Lee YM. 2010. Modeling causes and impacts of greenhouse gas emission in a city. [on line]. <http://www.systemdynamics.org/conferences/2010/proceed/papers/P1046.pdf>. [12 Juli 2015].
- Lei X, Jianhui Zhang, dan Li J. 2012. A system dynamics model for urban low-carbon transport and simulation in the city of shanghai, china. *Adv Inform Sci Serv Sci.* 4 (1) : 11-15.
- Loekito H. 2002. Teknologi pengelolaan limbah industri kelapa sawit. *J Tek Lingk.* 3 (3): 242-250.
- Nanaki EA dan Koroneos CJ. 2012. Comparative lca of the use of biodiesel, diesel and gasoline for transportation. *J Clean Prod.* 20 : 14-19.
- Prasetya H, Arkeman Y, dan Hambali E. 2013. Role of methane capture for sustainable biodiesel production from palm oil: A life cycle assessment approach. *Int J Adv Sci Eng Inform Tech.* 3 (5) : 13-17.
- Reap J, Bras B, Newcomb PJ, Carmichael C. 2003. Improving Life Cycle Assessment By Including Spatial, Dynamic And Placebased Modeling. Di dalam *Proceedings of DETC 03 ASME 2003 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Chicago, Illinois, USA, September 2-6, 2003.
- Rosmeika, Yuwono AS, dan Tambunan AH. 2014. Comparison of biodiesel production by conventional and superheated methanol vapor technologies using life cycle assessment method. *Environ Eng Sci.* 31(3) : 51-58.

- Rotwiroon P, Chatchupong T, Malakul P, Papong S. 2012. Energy and greenhouse gas evaluation of biodiesel and bio-hydrogenated diesel from palm oil in a life cycle perspective. *Int J Chem Environ Eng.* 3 (4) :73-78.
- Sheil D, Casson A, Meijaard E, Noordwijk Mv, Gaskell J, Sunderland-Groves J, Wertz K, Kanninen M. 2009. The impacts and opportunities of oil palm in southeast asia : What do we know and what do we need to know? CIFOR, Bogor.
- Sorda G, Banse M, dan Kemfert C. 2010. An overview of biofuel policies across the world. *Energy Policy.* 38 :6977–6988.
- Souza SP, Pacca S, Ávila MT, Borges JLB. 2010. Greenhouse gas emissions and energy balance of palm oil biofuel. *Renew Energy* 35 :2552-2561.
- Turcksin L dan Macharis C. 2010. Biodiesel In Belgium: A System-Dynamics Model. Di dalam. Pelkmans L. (ed.), *Biofuels Sustainable End Use Bioses*, Belgian Science Policy, Brussel pp. 99-117.
- Yee KF, Tan KT, Abdullah AZ, Lee KT. 2009. Life cycle assessment of palm biodiesel: Revealing facts and benefits for sustainability. *App Energy.* 86 :S189–S196.
- Zutphen Jv dan Wijbrans R. 2011. LCA GHG emissions in production and combustion of malaysian palm oil biodiesel. *J Oil Palm The Environ.* 2:86-92.