

MASS BALANCE APPROACH AT PALM CARBON CYCLE

Abdul Kahar

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Mulawarman University
Gunung Kelua Jl. Sambaliung No. 9, Samarinda 75119, Indonesia
Telp./Faks: (0541) 736834/(0541) 749315

* E-mail: a.kahar@ft.unmul.ac.id

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><i>Article history:</i> Received: 11-05-2022 Received in revised form: 01-10-2022 Accepted: 21-10-2022 Published: 25-10-2022</p> <hr/> <p><i>Keywords:</i> Mass balance Palm carbon cycle</p>	<p><i>Development of Indonesian palm oil industry, not only contributes positively to economic sector. Biggest challenge lies in the negative issues of oil palm development, namely environmental issues. Land use change, forest clearing, deforestation, peat land for palm plantation expansion are environmental issues because they are considered to disturb the balance of greenhouse gases. The use of non-standard fertilizers and POME processing can also increase CO₂ emissions, which in turn will reduce carbon storage in vegetation and soil. Soil is the most potent organic carbon sink compared to plants. Soil is an organic carbon pool (reservoir) that accumulates organic carbon in and organic carbon out. The accumulated carbon is influenced by aboveground biomass, belowground biomass, necromass, litter and soil organic matter. So that the development of oil palm is accused of being one of the factors that play a role in soil organic carbon (SOC), soil carbon loss (SCL), net carbon balance (NCB), or greenhouse gasses (GHG) emissions. Where this is a very important component in the palm carbon cycle that has an impact on the global climate. The mass balance approach to the palm carbon cycle obeys the law of conservation of mass. The mass of palm carbon before and after processing is constant. This means that the total mass of palm carbon during the process does not change, only a phase change occurs, namely solid, liquid, and gas.</i></p>

PENDEKATAN NERACA MASSA PADA SIKLUS KARBON KELAPA SAWIT

Abstrak- Perkembangan industri kelapa sawit Indonesia, tidak hanya berkontribusi positif pada sektor ekonomi. Tantangan terbesarnya terletak pada isu-isu negative pengembangan sawit, yaitu isu lingkungan. Perubahan penggunaan lahan (*land use change*), pembukaan hutan, deforestasi, lahan gambut untuk ekspansi perkebunan sawit menjadi isu lingkungan karena dianggap mengganggu keseimbangan *greenhouse gasses*. Penggunaan pupuk dan pengolahan POME yang tidak sesuai standar juga dapat meningkatkan emisi CO₂, yang pada akhirnya akan membuat penyimpanan karbon pada vegetasi dan tanah menjadi berkurang. Tanah merupakan penambat karbon organik yang paling potensial dibanding tumbuhan. Tanah merupakan *organic carbon pool (reservoir)* yang mengakumulasi karbon organik masuk dan karbon organik keluar. Karbon yang terakumulasi dipengaruhi oleh biomassa diatas permukaan tanah, biomassa dibawah permukaan tanah, biomassa mati, pohon mati, serasah dan bahan organik tanah. Sehingga perkembangan sawit dituding sebagai salah satu faktor yang berperan pada *soil organic carbon (SOC)*, *soil carbon loss (SCL)*, *net carbon balance (NCB)*, atau emisi *greenhouse gasses (GHG)*. Dimana hal ini, merupakan komponen yang sangat penting dalam siklus karbon sawit yang berdampak pada iklim global. Pendekatan neraca massa pada siklus karbon kelapa sawit mematuhi hukum kekekalan massa. Massa karbon sawit sebelum dan sesudah proses adalah tetap. Artinya total massa karbon kelapa sawit selama proses tidak berubah, hanya terjadi perubahan fase, yaitu padat, cair, dan gas.

Kata kunci : neraca massa, siklus karbon sawit

PENDAHULUAN

Perkembangan industri kelapa sawit Indonesia, tidak hanya berkontribusi positif pada sektor ekonomi. Tetapi tantangan terbesarnya justru terletak pada isu-isu negative pengembangan lahan sawit, yaitu isu lingkungan, pembukaan hutan, deforestasi, penggunaan energi, pengolahan limbah, *soil carbon loss* (SCL), sampai emisi gas rumah kaca (GRK) (Sugirahayu and Rusdiana, 2011). Pembukaan hutan untuk ekspansi perkebunan sawit menjadi isu lingkungan dunia karena dianggap mengganggu keseimbangan *greenhouse gasses* (GHG), yaitu meningkatnya kadar CO₂ di udara dan dilain pihak penyimpanan karbon pada vegetasi dan tanah berkurang (Lamade and Bouillet, 2005; Wibowo *et al.*, 2014; Sarmah *et al.*, 2004).

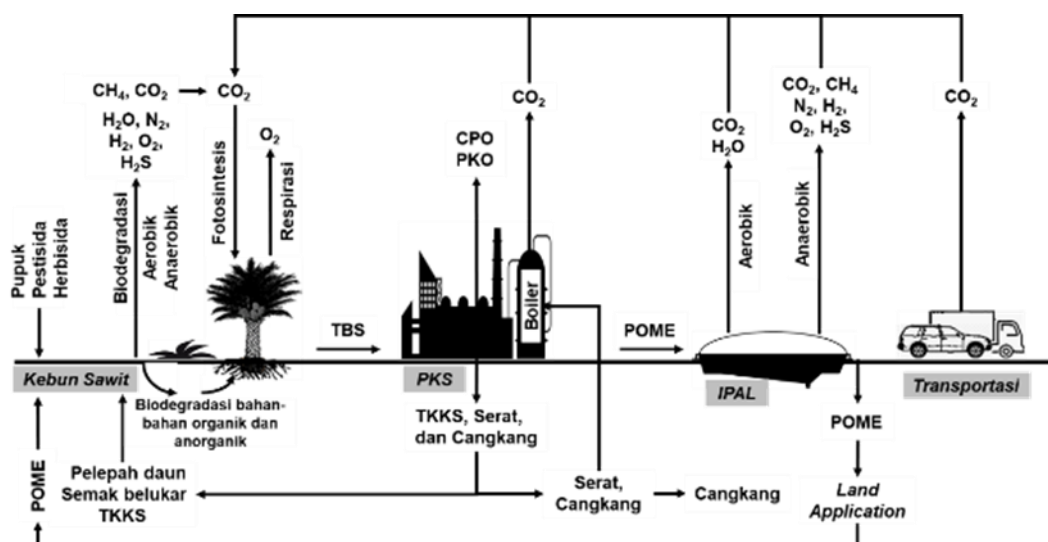
Carbon balance merupakan isu lingkungan yang terus menjadi perhatian dunia berkaitan dengan meningkatnya kadar GHG di udara akibat deforestasi. Perluasan lahan kelapa sawit di Indonesia dituding sebagai salah satu faktor yang berperan pada stok *soil organic carbon* (SOC). Stok SOC merupakan parameter paling penting dalam mitigasi *carbon balance* ini (Arjuna and Santosa, 2018, Sumarlin *et al.*, 2021).

Isu lingkungan tentang pemanasan global, perubahan iklim, dan meningkatnya suhu udara dikaitkan dengan meningkatnya konsentrasi CO₂ dan gas rumah kaca (GRK) seperti metana (CH₄), nitrous oksida (N₂O), dan lain-lain di atmosfer. Emisi GRK agribisnis sawit diantaranya

diakibatkan oleh alih fungsi lahan (*land use change*) terutama lahan gambut, pengolahan POME dan kegiatan antropogenik lainnya. Proses antropogenik yang paling bertanggung jawab atas emisi karbon ke atmosfer adalah pembakaran bahan bakar fosil (batubara, minyak, dan gas alam) dan gangguan pada tanah akibat perubahan tataguna lahan/deforestasi (Siringoringo, 2014); Gunamantha and Suryaputra, 2016). Perubahan penggunaan lahan dari ekosistem alami ke ekosistem budidaya akan menyebabkan kehilangan karbon tanah (Gunamantha and Suryaputra, 2016, Nusantara *et al.*, 2014).

Siklus Karbon Sawit

Sejauh penelusuran yang dilakukan, penelitian tentang jejak karbon (*carbon footprint*) kebun sawit telah banyak dilakukan. Mulai dari pembukaan hutan untuk sawit, lahan gambut untuk sawit, biomassa sawit, karbon kelapa sawit, *soil carbon loss* (SCL), *soil carbon stock* (SCS) dan model *net carbon balance* (NCB). Akan tetapi, masih bersifat parsial, tidak menyeluruh (komprehensif) dan tidak melibatkan unit-unit proses yang berperan mengkonversi karbon dalam satu-kesatuan siklus carbon pada lahan perkebunan sawit (Arjuna and Santosa, 2018, Sumarlin *et al.*, 2021, Gunamantha and Suryaputra, 2016, Nusantara *et al.*, 2014).



Gambar 1. Siklus karbon kelapa sawit

Pada siklus karbon sawit terjadi aliran massa karbon dari suatu proses ke proses yang lain. Transfer dan perubahan ini akan membentuk suatu kesetimbangan karbon masuk dan keluar dalam rangkaian siklus. Sebagaimana disajikan pada gambar 1.1, terlihat siklus karbon pada lahan

perkebunan sawit. Siklus karbon ini, minimal melibatkan beberapa sub-sistem; yaitu lahan kebun sawit; Pabrik Kelapa Sawit (PKS), dan Instalasi Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit (IPAL).

Pertanyaan yang perlu dijawab dalam hal ini, adalah bagaimana gambaran model aliran

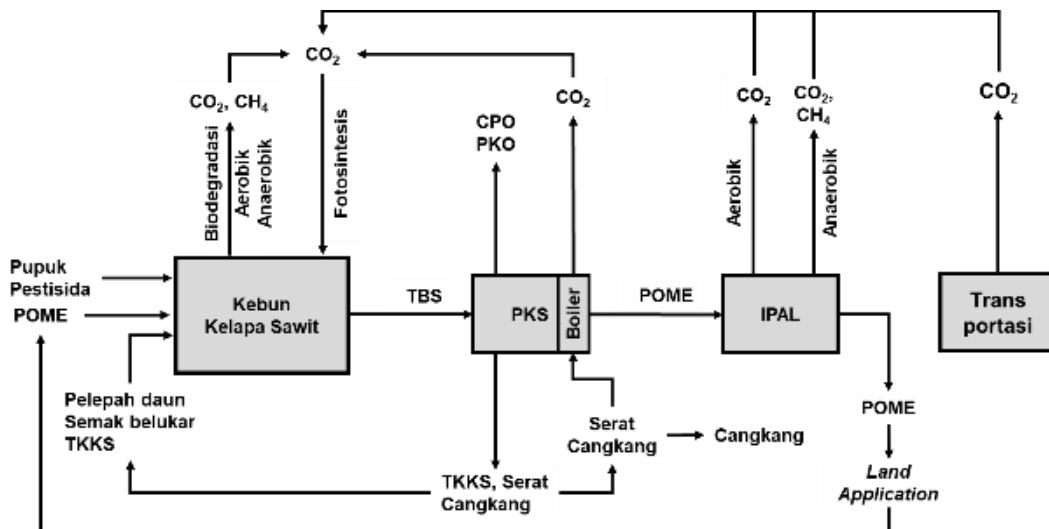
(perpindahan) organic carbon pada keseluruhan proses produksi yang terjadi pada lahan perkebunan kelapa sawit. Bagaimana pendekatan neraca massa menelusuri jejak karbon sawit.

Diagram Alir Karbon Sawit

Siklus karbon sawit, pada gambar 1, dapat disederhanakan menjadi diagram alir karbon sawit total, seperti pada Gambar 2. Terlihat, bahwa karbon terus-menerus mengalir di antara atmosfer, tanaman sawit, tanah melalui fotosintesis, respirasi

tanaman, proses produksi, pembakaran, pengolahan POME, biodegradasi dan transportasi.

Dari siklus karbon sawit tersebut akan membentuk kesetimbangan perpindahan massa (*mass transfer*) karbon organik, antara karbon yang masuk, keluar dan terakumulasi. Pada gambar 2, terlihat sub-sistem yang terlibat dalam siklus karbon sawit; yaitu lahan kebun kelapa sawit; pabrik kelapa sawit (PKS), instalasi pengolahan air limbah (IPAL) POME; dan transportasi.



Gambar 2. Diagram alir karbon organik total pada siklus karbon sawit

Pengolahan TBS di PKS selain menghasilkan produk utama CPO dan PKO, juga menghasilkan limbah padat berupa tandan kosong, serat, cangkang dan limbah cair yang disebut POME. Serat dan cangkang selanjutnya dimanfaatkan sebagai bahan bakar di boiler, tandan kosong dimanfaatkan di lahan kebun sawit sebagai pupuk. Sedangkan POME diolah terlebih dahulu di IPAL, untuk menurunkan konsentrasi bahan-bahan organik terlarut yang tinggi. IPAL POME umumnya merupakan sistem kolam terbuka yang terdiri dari kolam anerobik, fakultatif dan aerobik. Biodegradasi aerobik dan anaerobik bahan-bahan organik pada pelepah daun, semak belukar, TKKS dan POME menghasilkan CO_2 dan CH_4 . POME yang telah diolah di IPAL sebagai POME *effluent* selanjutnya akan dimanfaatkan sebagai pupuk di lahan kebun sawit (*land application*).

Kebun sawit juga melepaskan CO_2 dan CH_4 ke udara lewat respirasi dan biodegradasi tandan kosong, pelepah daun dan biodegradasi POME di IPAL secara aerobik dan anaerobik. Pada lahan kebun sawit, CO_2 yang dilepas merupakan proses biodegradasi bahan organik, yang berasal dari hasil proses respirasi akar, respirasi mikrobia di rizosfer, respirasi dari dekomposisi serasah dan organisme

(Sarmah *et al.*, 2004; Mubekti, 2014; Hasanudin & Haryanto, 2018; Sarmah *et al.*, 2004).

Neraca Massa Karbon Sawit

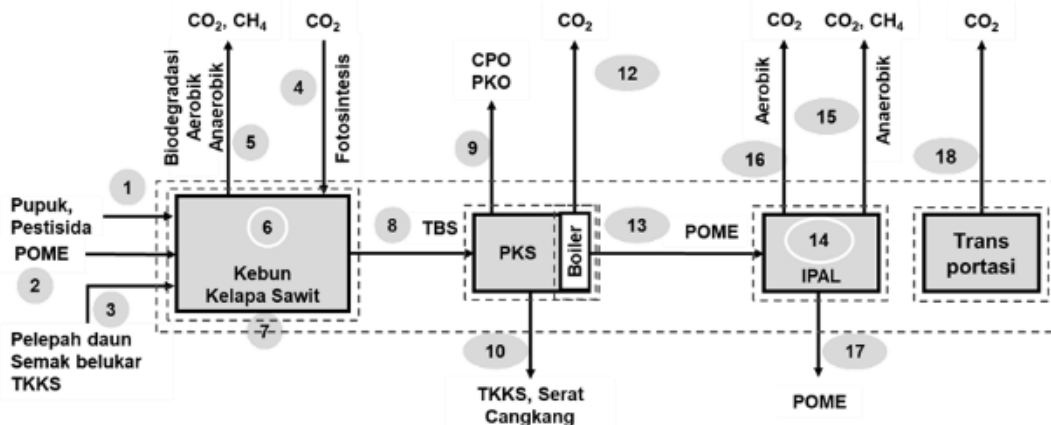
Neraca massa merupakan perhitungan kesetimbangan kuantitatif dari semua bahan masuk, bahan terakumulasi, bahan terbuang dan bahan keluar pada suatu sistem proses dalam waktu tertentu. Perhitungan neraca ini digunakan untuk mencari variabel proses yang belum diketahui berdasarkan data variabel-variabel proses yang telah diketahui. Persentase kehilangan massa diperoleh dengan cara membagi selisih jumlah massa bahan masuk (umpan) dan bahan keluar (produk) terhadap jumlah massa bahan masuk ke sistem proses (Hadiyarti *et al.*, 2018).

Untuk memudahkan penyelesaian perhitungan kesetimbangan karbon pada siklus karbon lahan kebun sawit, dilakukan dengan membuat neraca massa berdasarkan bahan input, produk dan waste. Siklus Karbon pada lahan PKS, sebagaimana Gambar 2, dapat disederhanakan seperti pada Gambar 3.

Pada perhitungan neraca massa karbon sawit, hanya bahan input dan bahan output dalam sistem proses (unit proses dan unit operasi) yang

akan dimasukkan. Artinya karbon yang dihitung pada neraca massa adalah karbon yang masuk ke dalam sistem proses. Misalkan pada pembakaran serat dan cangkang pada boiler untuk menghasilkan steam, karena serat dan cangkang tidak masuk dalam aliran proses. Hanya sebagai bahan bakar boiler. Sehingga memberi dampak pada akumulasi emisi karbon di lahan perkebunan sawit. Tetapi hasil pembakaran CO₂ yang dihasilkan merupakan bagian dari serapan karbon pada fotosintesis. Sedangkan transportasi pengangkutan di PKS tidak

masuk dalam perhitungan neraca massa karena bahan bakar yang digunakan berasal dari bahan bakar fosil (solar). Kecuali jika menggunakan biosolar (biodiesel) dari CPO, maka hasil pembakaran CO₂ transportasi menjadi bagian dari serapan karbon sawit pada fotosintesis. Sedangkan akumulasi karbon sawit terdapat pada pohon kelapa sawit, tanah pada perkebunan, POME dalam instalasi pengolahan limbah dan pada produk minyak sawit (CPO dan PKO).



Gambar 3. Neraca Massa Karbon Sawit Total

Dimana:

- 1: Pupuk/pestisida/herbisida
- 2: POME (*effluent*)
- 3: Pelepa daun, semak belukar dan TKKS
- 4: Serapan CO₂ pada Fotosintesis
- 5: Biodegradasi Aerobik-Anaerobik bahan organik (Emisi dan serapan CO₂ CH₄)
- 6: Akumulasi C Kelapa sawit
- 7: Stock C Tanah
- 8: Tandan Buah Segas (TBS)
- 9: CPO dan PKO
- 10: Tandan kosong, Serat dan Cangkang
- 11: Serat dan Cangkang
- 12: Emisi dan serapan CO₂ CH₄ PKS
- 13: POME *influent*
- 14: Akumulasi C di IPAL
- 15: IPAL Anaerobik
- 16: IPAL Aerobik
- 17: POME *effluent* (*Land application*)
- 18: Transportasi

Sebagaimana terlihat pada gambar 3, perhitungan karbon total sawit, bila tidak ada karbon terakumulasi, maka menggunakan persamaan 1 dan 2. Jika terdapat akumulasi karbon, maka menggunakan persamaan neraca 3 dan 4.

$$C_{input} = C_{output} \tag{1}$$

$$C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = C_5 + C_9 + C_{10} + C_{15} + C_{16} + C_{17} \tag{2}$$

$$C_{input} - C_{output} = C_{Accumulation} \tag{3a}$$

$$C_{input} = C_{output} + C_{Accumulation} \tag{3b}$$

$$C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = C_5 + C_9 + C_{10} + C_{15} + C_{16} + C_{17} + C_{6,PKS} + C_{7,AT} + C_{14,AT} \tag{4}$$

Sumber-sumber Karbon Sawit

Dari persamaan neraca massa karbon kelapa sawit total, terlihat bahwa karbon sawit terdiri atas 3 (tiga) sumber, yaitu karbon masuk, karbon keluar dan karbon terakumulasi. Pada sub-sistem lahan kebun sawit, karbon masuk berasal dari Pupuk, POME (*effluent*), Pelepa daun, semak belukar,

tandan kosong, dan Serapan C Fotosintesis (CO₂). Karbon terakumulasi berada di pohon kelapa sawit dan tanah lahan sawit, sedangkan karbon keluar adalah Tandan Buah Segas (TBS). Pada sub-sistem PKS, karbon masuk berasal dari TBS, karbon keluar adalah CPO, PKO, Tandan kosong, Serat, Cangkang dan POME. Dan pada sub-sistem IPAL, karbon masuk adalah POME *influent*, karbon terakumulasi adalah karbon POME yang diolah dalam IPAL. Karbon keluar adalah karbon hasil olahan IPAL secara Anaerobik dan Aerobik berupa CO₂, CH₄, dan karbon dalam POME *effluent* yang dimanfaatkan sebagai pupuk pada *Land application*.

Pupuk, Pestisida dan Herbisida

Pada perkebunan kelapa sawit, sumber emisi Gas Rumah Kaca (GRK) berasal dari penggunaan pupuk NPK, pestisida, dan fungisida. Total emisi Gas Rumah Kaca (GRK) adalah 0,50685 kg CO₂

eq/biji. Emisi dari penggunaan pupuk NPK adalah 0,1703 kg CO₂ eq/biji atau 33,6% dari total emisi Gas Rumah Kaca (GRK) pada pembibitan kelapa sawit. Emisi GRK penggunaan pestisida adalah 11,025 kg CO₂ eq/unit. Sedangkan emisi GRK dari penggunaan fungisida adalah 5,177 kg CO₂ eq/unit (Hakim *et al.*, 2014).

Tandan Kosong dan Serat

Untuk setiap ton tandan buah segar (TBS) yang diproses di Pabrik Kelapa Sawit, menghasilkan 120-200 kg minyak sawit mentah (CPO), 230-250 kg tandan buah kosong, serat 130-150 kg, dan 0,7 m³ limbah cair. Pada setiap ton pengolahan TBS, PKS akan menghasilkan 20-23% CPO, 5-7% PKO dan sisanya berupa limbah padat, yaitu 20-23% tandan kosong, 10-12% serat dan 7-9% cangkang (Nasution and Limbong, 2019).

Pengolahan 1 ton TBS akan menghasilkan limbah berupa tandan kosong kelapa sawit sebanyak 23% atau 230 kg, limbah cangkang (*shell*) sebanyak 6,5% atau 65 kg, *wet decanter solid* (lumpur sawit) 4 % atau 40 kg, serabut (fiber) 13% atau 130 kg serta limbah cair sebanyak 50%. Tandan kosong mengandung selulosa 41,3-46,5% (C₆H₁₀O₅)_n, hemiselulosa 25,3-32,5% dan lignin 27,6-32,5% (Susanto *et al.*, 2017).

Tabel 1. Pemanfaatan limbah PKS

Limbah	Persentase per ton TBS, %	Manfaat
Tandan kosong	20-22	Pupuk, land application
Wet decanter solid	3-4	Pupuk, land application
Cangkang	5-6	Bahan bakar boiler
Serat (fiber)	12-14	Bahan bakar boiler
Limbah cair pabrik kelapa sawit (POME)	60-65	Pupuk, land application

Selama proses pengolahan TBS menjadi CPO dan PKO, pabrik kelapa sawit juga mengemisikan CO₂ melalui limbah cair dan padatnya; yaitu POME dan pembakaran serat dan cangkang di boiler (Arjuna and Santosa, 2018). Semua jenis limbah yang dihasilkan oleh PKS dimanfaatkan kembali sebagai pupuk ataupun bahan bakar boiler, sebagaimana terlihat pada table 1.

Berdasarkan basis bobot kering TKKS mengandung bahan organik N, P, K dan Mg berturut-turut 0,8%; 0,1-0,7%; 2,4-2,8%; dan 0,2-0,8%. Karenanya, TKKS dapat digunakan sebagai pupuk organik yang dapat langsung disebar ke lahan perkebunan sawit atau diinsenerasi terlebih dahulu (Bantacut and Pasaribu, 2015).

Serapan Karbon Kelapa Sawit

Serapan karbon sawit terjadi pada fotosintesis, kelapa sawit akan menyerap CO₂ dari udara dan akan melapas O₂ ke udara. Karenanya,

kelapa sawit memiliki potensi menyimpan cadangan karbon yang besar (*carbon sink*). Pada fotosintesis kelapa sawit menyerap sekitar 161 ton CO₂/Ha/tahun. Bila dikurangi CO₂ yang diserap pada respirasi, maka kebun kelapa sawit menyerap CO₂ sebesar 64,5 Ton CO₂/Ha/tahun. CO₂ yang diserap selanjutnya diubah menjadi karbohidrat, selanjutnya disebarkan ke seluruh tubuh tanaman dan akhirnya disimpan dalam tubuh tanaman. Proses penyimpanan karbon dalam tubuh tanaman hidup dinamakan sekuestrasi (*C-sequestration*) (Mubekti, 2014; PASPI-Monitor, 2021).

Jumlah karbon tersimpan dalam tubuh tanaman hidup (biomassa) pada lahan perkebunan sawit dapat menggambarkan banyaknya CO₂ di atmosfer yang diserap. Sedangkan pengukuran cadangan karbon yang tersimpan dalam tanaman mati (nekromassa) secara tidak langsung menggambarkan CO₂ yang tidak dilepaskan ke udara (Mubekti, 2014; PASPI-Monitor, 2021).

Pada perkebunan kelapa sawit bahwa biomass production, CO₂ fixation, photosynthesis, absorbed radiation, respiration dan produksi O₂ production berturut-turut adalah 36,5 t DM ha⁻¹ yr⁻¹; 25,7 t CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹; 21-24 μmol m⁻² s⁻¹; 82,9 MJ m⁻² yr⁻¹; 96,5 t CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹; dan 18,7 t O₂ ha⁻¹ yr⁻¹ (Lamade and Bouillet, 2005). Selama 10-15 tahun, kelapa sawit mampu menyimpan lebih dari 80 ton C ha⁻¹. Jumlah karbon rata-rata yang ditambat oleh tanaman kelapa sawit sekitar 60,4 t ha⁻¹ atau rata-rata sekitar 2,44 t C ha⁻¹ tahun⁻¹ dan ekuivalen dengan 8,95 t CO₂ ha⁻¹ tahun⁻¹ (Mubekti, 2014).

Soil Organic Carbon (SOC)

Tanah merupakan *organic carbon pool (reservoir)* yang mengakumulasi karbon organik masuk dan karbon organik keluar dalam tanah (Siringoringo, 2014). Karbon yang terakumulasi dipengaruhi oleh biomassa diatas permukaan tanah, biomassa dibawah permukaan tanah, biomassa mati, pohon mati, serasah dan bahan organik tanah.

SOC adalah salah satu bagian dari dinamika siklus karbon global yang melibatkan siklus karbon melalui tanah, tumbuh-tumbuhan, lautan dan atmosfer. Tanah mempunyai kapasitas penyimpanan karbon yang sangat potensial dibanding tumbuhan diatasnya (Clara *et al.*, 2017).

Perhatian terhadap stok SOC menjadi hal yang serius karena emisi karbon yang semakin meningkat dari tanah akibat aktivitas pengolahan lahan untuk pertanian (Rahman *et al.*, 2018). Pengolahan lahan merupakan salah satu penyebab menurunnya SOC karena pembalikan tanah menyebabkan SOC mudah tercuci (*leaching*) dan meningkatnya kehilangan karbon akibat respirasi (Berhongeray *et al.*, 2017).

Kandungan *soil organic carbon* (SOC) lahan perkebunan sawit yang telah berumur 29 tahun

didapatkan 36% lebih rendah dibandingkan jumlah SOC pada hutan tropis (Rahman *et al.*, 2018). Karbon organik merupakan salah satu parameter kesuburan tanah disamping menjadi mitigasi keseimbangan GHG. Tanah merupakan penambat karbon organik yang paling potensial dibanding tumbuhan (Clara *et al.*, 2017).

Cadangan karbon merupakan jumlah karbon yang tersimpan di dalam berbagai tempat penyimpan (*pool*). *Pool* yang terpenting adalah tanah, biomassa tanaman, dan jaringan tanaman yang mati (nekromassa). C organik tanah tersimpan dalam bentuk senyawa organik dan sebagian kecil dalam bentuk karbonat. Tanah dan tanaman mempunyai cadangan karbon yang bervariasi. C organik di dalam tanah gambut berkisar antara 300-800 t C/ha untuk setiap meter ketebalan gambut. Pada gambut dengan ketebalan 0,5-8 m, cadangan C organik berkisar antara 200-6.400 t C/ha. Pada tanah mineral, C organik umumnya terkonsentrasi pada lapisan 0-100 cm. Cadangan karbon tanah mineral berkisar antara 15-200 t C/ha, namun adakalanya dari 1 t sampai 900 t C/ha (Agus, 2013).

Palm Oil Mill Effluent (POME)

POME merupakan limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS) yang sangat berpotensi menyebabkan masalah serius bagi lingkungan karena kandungan pencemarnya yang sangat tinggi (Hasanudin and Haryanto, 2018). POME terdiri dari campuran air, serpihan kulit sawit dan residu lemak yang dihasilkan pada proses awal *crude palm oil* (CPO) dari buah sawit. POME bersuhu panas, pH asam, kental, berwarna kecoklatan dengan kandungan padatan, minyak dan lemak, suspensi koloid mengandung bahan organik dan padatan yang sangat tinggi. Bahan-bahan organik yang terdapat dalam POME umumnya diekspresikan sebagai *Biological Oxygen Demand* (BOD); *Volatile Fatty Acid* (VFA) atau *Chemical Oxygen Demand* (COD), suatu bagian bahan organik yang sulit didegradasi (Kahar *et al.*, 2018; Zaiat *et al.*, 2000).

POME berasal dari air kondensat pada proses sterilisasi, air dari proses klarifikasi, air *hydrocyclone* (*claybath*) dan air pencucian (Rambe, 2015; Hasanudin & Haryanto, 2018). POME

merupakan campuran air, serpihan kulit sawit dan residu lemak yang dihasilkan pada proses awal *crude palm oil* (CPO) (Poh & Chong, 2009; Gunawan & Kahar, 2019).

POME bersifat asam dengan pH 3.8-4.5, konsentrasi senyawa organik yang tinggi sehingga COD dan BOD juga tinggi. POME mengandung karbohidrat, protein, dan lemak berturut-turut dalam jumlah besar dengan komposisi 29.55%, 12.75%, dan 10.21% (Trisakti *et al.*, 2017).

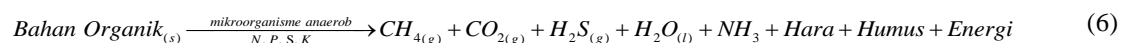
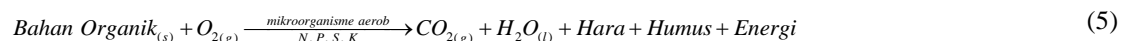
Setiap ton POME akan mengemisikan sekitar 19,4 kg CO₂ ke udara (Arjuna and Santosa, 2018). Pengolahan anaerobik konvensional memiliki waktu tinggal 20-200 hari, memerlukan lahan yang luas dan methane capture yang sulit dilakukan (Shintawati *et al.*, 2017).

PKS dengan kapasitas produksi CPO sebesar 35 juta ton/tahun menghasilkan POME ± 135 juta m³/tahun, CH₄ sekitar 1.215 juta kg/tahun, yang setara dengan emisi GRK sebesar 18.970 juta kg CO₂ eq/tahun. Jadi untuk CPO mempunyai faktor emisi GRK sebesar 542 kg CO₂eq/ton CPO, dan untuk limbah POME mempunyai faktor emisi GRK sebesar 140 kg CO₂eq/m³ POME (Wijono, 2017).

Tumbuhan Bawah Dan Nekromassa

Biodegradasi bahan organik anorganik, pada lahan perkebunan kelapa sawit, dapat berlangsung pada kondisi aerobik dan anaerobik. Bahan organik dan anorganik yang terbiodegradasi dalam tanah akan melepaskan unsur hara makro dan mikro sehingga dapat diserap oleh tanaman. Proses ini melibatkan mikroorganisme yang mendegradasi bahan-bahan organik anorganik menjadi humus. Sehingga biodegradasi bahan organik dan anorganik ini akan menambah stok SOC dan memperbaiki sifat kimia, fisik, dan biologis tanah.

Biodegradasi anaerobik bahan organik dan anorganik merupakan reaksi biokimia kompleks dan spesifik melalui empat tahap reaksi, yaitu; hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis dan metanogenesis yang terjadi secara seri maupun paralel (Appels *et al.*, 2008; Abdelgadir *et al.*, 2014). Reaksi biodegradasi aerobik dan anaerobik bahan-bahan organik, sebagaimana persamaan 5 dan 6.



Sedangkan emisi CO₂ perkebunan kelapa sawit pada lahan gambut berkisar 66,87±47,53 ton CO₂ ha⁻¹ th⁻¹ dan pada tumbuhan bawah (semak belukar) berkisar 43,73±27,16 ton CO₂ ha⁻¹ th⁻¹ (Sarmah *et al.*, 2004).

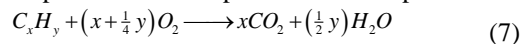
Hasil akhir biodegradasi bahan organik dan anorganik, merupakan senyawa sederhana sebagai berikut: 1. Karbon: CO₂, CO₃²⁻, HCO₃⁻, CH₄; 2. Nitrogen: NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻; 3. Belerang: S, H₂S, SO₃²⁻, SO₄²⁻, CS₂; 4. Fosfor: H₂PO₄⁻, HPO₄²⁻; dan 5.

Lainnya: K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H_2O , H^+ , OH^- , dan lain-lain (Anonim, 2012; KLH, 2012).

Serat dan Cangkang

Serat kelapa sawit mengandung selulosa, lignin, protein kasar, lemak, abu dan impurities berturut-turut adalah 59,6%, 28,5%, 3,6%, 1,9%, 5,6% dan 8% (Koba and Ishizaki, 1990). Kandungan selulosa serat kelapa sawit berkisar 43%-65% dan lignin berkisar 13%-25%. Sedangkan cangkang kelapa sawit mengandung selulosa, hemiselulosa, lignin, dan abu berturut-turut adalah 26,27 %, 12,61 % 42,96 % dan 18,1 %. Kandungan C, H, O, N, dan S cangkang berturut-turut adalah 49,79; 5,58; 34,06; 0,72; dan < 0,08% (Nasution and Limbong, 2019).

Reaksi pembakaran cangkang dan serat di boiler akan menghasilkan gas baru, udara lebih dari sejumlah energi. Senyawa-senyawa yang merupakan hasil dari reaksi pembakaran disebut gas asap. Reaksi untuk pembakaran sempurna adalah:



Nilai dari x dan y di atas bergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan. Nilai x adalah fraksi massa Karbon, dan y fraksi massa Hidrogen dalam bahan bakar.

Serat dan cangkang kelapa sawit, biasanya digunakan sebagai bahan bakar pada boiler. Konsumsi bahan bakar untuk boiler PKS dengan kapasitas olah 30 ton TBS/jam adalah 3,8 ton/jam serat dan 1,5 ton cangkang. Dari proses produksi PKS diperoleh rata-rata 3,0-3,6 ton serat dan 2,4 ton/jam cangkang kelapa sawit. Semua serat kelapa sawit dipakai untuk bahan bakar boiler, sedangkan cangkang masih tersisa sekitar 0,9 ton/jam (Nasution and Limbong, 2019).

Emisi GRK Boiler untuk 1 ton CPO, dengan biogas capture adalah 41.28 kg CO_2eq sedangkan tanpa biogas capture adalah 67.68 kg CO_2eq (Vijaya, Ma and Choo, 2010)

KESIMPULAN

Adapun kesimpulan yang dapat diambil bahwa pendekatan neraca massa karbon sawit pada siklus karbon kelapa sawit mematuhi hukum kekekalan massa. Massa karbon sawit sebelum dan sesudah proses adalah tetap. Artinya total massa karbon kelapa sawit selama proses tidak berubah, hanya terjadi perubahan fase, yaitu padat, cair, dan gas. Berdasarkan pendekatan neraca massa, terdapat tiga sumber karbon sawit pada siklus karbon kelapa sawit, yaitu karbon masuk, karbon keluar dan karbon terakumulasi. Pada kebun kelapa sawit, karbon masuk berasal dari pupuk atau pestisida atau herbisida, POME (*effluent*), pelepah daun, semak belukar, TKKS, dan serapan CO_2 pada fotosintesis. Karbon terakumulasi berada di pohon kelapa sawit dan tanah lahan sawit, sedangkan

karbon keluar adalah TBS. Pada PKS, karbon masuk berasal dari TBS, karbon keluar adalah CPO, PKO, TKKS, serat, cangkang dan POME. Dan pada IPAL, karbon masuk adalah POME *influent*, karbon terakumulasi adalah karbon POME yang diolah dalam IPAL. Karbon keluar adalah CO_2 , CH_4 , dan POME *effluent*.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelgadir, A., Xiaoguang Chen, Jianshe Liu, Xuehui Xie, Jian Zhang, Kai Zhang, Heng Wang, and Na Liu. (2014) 'Characteristics, process parameters, and inner components of anaerobic bioreactors', *BioMed Research International*, 2014. doi: 10.1155/2014/841573.
- Agus, F. (2013) 'Konservasi Tanah Dan Karbon Untuk Mitigasi Perubahan Iklim Mendukung Keberlanjutan Pembangunan Pertanian. Soil and Carbon Conservation for Climate Change Mitigation and Enhancing Sustainability of Agricultural Development.', *Pengembangan Inovasi Pertanian*, 6(Maret 2013), pp. 23–33.
- Anonim (2012) 'Draft Petunjuk Teknis Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) Di Sektor Industri', *Kepala Badan Pengkajian Kebijakan Iklim dan Mutu Industri*, (Jakarta), p. Mei 2012.
- Arjuna, R. T. and Santosa, E. (2018) 'Asesmen Carbon Footprint pada Produksi Minyak Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) di Kebun Sei Lukut, Kabupaten Siak, Riau', *Buletin Agrohorti*, 6(2), pp. 287–295. doi: 10.29244/agrob.6.2.287-295.
- Bantacut, T. and Pasaribu, H. (2015) 'Aliran Tertutup Massa Dan Potensi Mandiri Energi Pada Produksi CPO. Closed Mass Flows and Energy Self Sufficiency in CPO Production.', *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 25(3), pp. 215–226.
- Berhongaray, G., Melanie S. Verlinden, Laura S. Broeckx, Ivan A. Janssens And Reinhart Ceulemans. (2017) 'Soil carbon and belowground carbon balance of a short-rotation coppice: assessments from three different approaches', *GCB Bioenergy*, 9(2), pp. 299–313. doi: 10.1111/gcbb.12369.
- Clara, L., Rekik Fatma, Alcantara Viridiana, Wiese Liesl. (2017) *Soil Organic Carbon: the hidden potential*. FAO 2017, *Nature Reviews Genetics*. FAO 2017. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. doi: 10.1038/nrg2350.
- Gunamantha, I. M. and Suryaputra, I. G. N. A. (2016) 'Estimasi Stok Karbon Organik Tanah Di Bawah Berbagai Penggunaan Lahan Pertanian Di Kabupaten Buleleng

- Provinsi Bali. Estimating Soil Organic Carbon Stock Under Different Agricultural Landuses in Bulleleng District of Bali province.', *Prosiding Seminar Nasional Penguatan Pengajaran dan Penelitian Perubahan Iklim*, (Jakarta, September 2016), pp. 79–93.
- Gunawan, R. and Kahar, A. (2019) 'Pengaruh Laju Alir Resirkulasi Pada Seeding Dan Aklimatisasi Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit (LCPKS) Dalam Bioreaktor Anaerobik', *PROSIDING SEMINAR NASIONAL TEKNOLOGI V*, (V), pp. 122–129. Available at: <http://e-journals.unmul.ac.id/index.php/SEMNASTEK/article/view/2817>.
- Hadiyarti, Y., Akbar, A. R. and Udiantoro (2018) 'Kajian Neraca Massa pada Industri Kelapa Sawit Studi Kasus Di PT. Alam Tri Abadi Kec. Murung Pudak, Kab. Tabalong, Kalimantan Selatan', *JTAM Inovasi Agroindustri*, 1(2), pp. 1–11. Available at: <http://jtam.ulm.ac.id/index.php/inoagro/article/view/212>.
- Hakim, H. M. Al, Supartono, W. and Suryandono, A. (2014) 'LIFE CYCLE ASSESSMENT PADA PEMBIBITAN KELAPA SAWIT UNTUK MENGHITUNG EMISI GAS RUMAH KACA. Life Cycle Assessment Of Palm Oil Seedlings For Calculating The Greenhouse Gas Emissions.', *ZIRAA'AH, E-ISSN 2355-3545*, 39, pp. 72–80.
- Hasanudin, U. and Haryanto, A. (2018) 'Palm Oil Mill Effluent Recycling System for Sustainable Palm Oil Industries', *Asian Journal of Environmental Biotechnology*, 2(1), pp. 52–62. Available at: <http://journal.bioremediation-forum.org/index.php/jeb/article/view/18>.
- Kahar, A., Warmadewanthi, I. and Hermana, J. (2018) 'EFFECT OF pH ON LIQUID-PHASE MASS TRANSFER AND DIFFUSIVITY COEFFICIENT AT LEACHATE TREATMENT OF MUNICIPAL WASTE LANDFILL IN ANAEROBIC BIOREACTOR', *Eksergi*, 15(2), p. 24. doi: 10.31315/e.v15i2.2327.
- Koba, Y. and Ishizaki, A. (1990) 'Chemical composition of palm fiber and its feasibility as cellulosic raw material for sugar production', *Agricultural and Biological Chemistry*, 54(5), pp. 1183–1187. doi: 10.1080/00021369.1990.10870116.
- Lamade, E. and Bouillet, J. P. (2005) 'Carbon storage and global change: The role of oil palm', *OCL - Oleagineux Corps Gras Lipides*, 12(2), pp. 154–160. doi: 10.1051/ocl.2005.0154.
- Mubekti (2014) 'Estimasi Jejak Karbon Industri Minyak Kelapa Sawit. Carbon Estimation in Palm Oil Industry.', *Jurnal Teknologi Lingkungan ISSN 1411-318X*, 15(1), pp. 35–42. doi: 10.29122/jtl.v15i1.1455.
- Nasution, Z. A. and Limbong, H. P. (2019) 'Karakterisasi Arang Cangkang Kelapa Sawit Sebagai Bahan Pembantu Untuk Meningkatkan Kesuburan Tanah Berdasarkan Kromatografi GC-MS. Characterization of Palm Oil Charcoal as an Assistant Material to Improve The Fertility of Plants Based on GC-MS Chromatogr', *Jurnal Industri Hasil Perkebunan*, 14(1), pp. 62–68. doi: 10.33104/jihp.v14i1.4406.
- PASPI-Monitor (2021) 'MULTI FUNGSI EKOLOGIS DARI PERKEBUNAN SAWIT INDONESIA', *Palm Oil Journal*, II(43), pp. 547–556.
- Poh, P. E. and Chong, M. F. (2009) 'Development of anaerobic digestion methods for palm oil mill effluent (POME) treatment', *Bioresource Technology*, 100(1), pp. 1–9. doi: 10.1016/j.biortech.2008.06.022.
- Rahman, N., Andreas de Neergaard, Jakob Magid, Gerrie WJ van de Ven, Ken E Giller and Thilde Bech Bruun. (2018) 'Changes in soil organic carbon stocks after conversion from forest to oil palm plantations in Malaysian Borneo', *Environmental Research Letters*, 13(10), pp. 1–10. doi: 10.1088/1748-9326/aade0f.
- Sarmah, Nurhayati, Hery Widyanto, Ai Dariah. (2004) 'Emisi CO2 Dari Lahan Gambut Budidaya Kelapa Sawit (*Elaeis Guineensis*) Dan Lahan Semak Belukar Di Pelalawan, Riau', *Indonesian peatland map: method, certainty and uses*, 16(4), pp. 295–305.
- Shintawati, Hasanudin, U. and Haryanto, A. (2017) 'Karakteristik Pengolahan Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit Dalam Bioreaktor Cigar Semi Kontinu Characteristic of Palm Oil Mill Waste Water Treatment Using Semicontinue Anaerobic Cigar Bioreactor', *Teknik Pertanian Lampung*, 6(2), pp. 81–88.
- Siringoringo, H. H. (2014) 'Peranan Penting Pengelolaan Penyerapan Karbon Dalam Tanah. The Important Roles of Managing Carbon Sequestration in Soils.', *Jurnal Analisis Kebijakan Kehutanan*, 11(2), pp. 175–192. doi: 10.20886/jakk.2014.11.2.175-192.
- Sugirahayu, L. and Rusdiana, O. (2011) 'Perbandingan Simpanan Karbon Pada Beberapa Penutupan Lahan Di Kabupaten Paser, Kalimantan Timur Berdasarkan Sifat Fisik Dan Sifat Kimia Tanahnya', *Jurnal*

- Silvikultur Tropika*, 2(3), pp. 149–155.
- Susanto, J. P., Santoso, A. D. and Suwedi, N. (2017) 'Perhitungan Potensi Limbah Padat Kelapa Sawit untuk Sumber Energi Terbaharukan dengan Metode LCA', *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 18(2), pp. 165–172. doi: 10.29122/jtl.v18i2.2046.
- Trisakti, B., Irvan, H Adipasah, Taslim and M Turmuzi. (2017) 'Effect of Agitation on Acidogenesis Stage of Two-Stage Anaerobic Digestion of Palm Oil Mill Effluent (POME) into Biogas', *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 180(1st Annual Applied Science and Engineering Conference), pp. 1–9. doi: 10.1088/1742-6596/755/1/011001.
- Vijaya, S., Ma, A. N. and Choo, Y. M. (2010) 'Capturing Biogas: A Means to Reduce Green House Gas Emissions for the Production of Crude Palm Oil', *American Journal of Geoscience*, 1(1), pp. 1–6. doi: 10.3844/ajgsp.2010.1.6.
- Wibowo, H., Tuti Sugiyarti, Setiari Marwanto, Fahmuddin Agus. (2014) 'Emisi Gas CO₂ Pada Lahan Gambut Yang Dibuka Untuk Lahan Budidaya: Studi Kasus Di Provinsi Kalimantan Barat. CO₂ Emission From Agricultural Peatland: A Case Study In West Kalimantan.', *Balai Penelitian Tanah, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian*, pp. 273–284.
- Wijono, A. (2017) 'Dampak Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca Pada Pemanfaatan POME Untuk Pembangkit', *Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2017, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jakarta , 1-2 November 2017*, pp. 1–9.