

POTENSI KARBON TANAH DARI GULMA DI BAWAH TEGAKAN KELAPA SAWIT**Halus Satriawan^{1,2)}, Zahrul Fuady³⁾, Ernawita⁴⁾**^{1,3,4)}Program Studi Agroteknologi Universitas Al-Muslim, Bireuen²⁾Program Studi Magister Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan Universitas Al-Muslim, Bireuen

Email: satriawan_80@yahoo.co.id

ABSTRAK

Perkebunan kelapa sawit umumnya memiliki tanaman pengganggu yang disebut gulma, dua jenis yang paling umum adalah *Nephrolepis biserrata* dan *Asystasia intrusa*. Gulma ini berpotensi untuk dijadikan tanaman penutup tanah di lahan kelapa sawit karena dinilai memiliki efek yang menguntungkan terutama dalam hal kontribusi bahan organik dalam bentuk cadangan karbon tanah. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis potensi sumbangan karbon tanah *Nephrolepis biserrata* dan *Asystasia intrusa* sebagai tanaman penutup tanah di perkebunan kelapa sawit. Penelitian dilakukan dengan rancangan petak terbagi, yaitu pada petak utama digunakan umur tanaman kelapa sawit, sedangkan anak petak berupa pemeliharaan *Nephrolepis biserrata* dan *Asystasia intrusa*, masing-masing perlakuan diulang sebanyak 3 kali. Parameter yang diamati adalah berat kering, kecepatan dekomposisi dan potensi cadangan karbon. Hasil penelitian menunjukkan *Nephrolepis biserrata* menghasilkan biomassa seberat 21,2 - 27,1 ton/ha, lama proses dekomposisi (30-60 hari), karbon dari tanaman (0,9 ton C/ha/tahun) dan stok karbon tanah (14,7-15,7 ton/ha/tahun). Sedangkan *Asystasia intrusa* menghasilkan biomassa seberat 17,6 - 17,9 ton/ha, lama proses dekomposisi (30-60 hari), karbon dari tanaman (0,9 ton C/ha/tahun) dan stok karbon tanah 13,2-13,9 ton/ha/tahun.

Kata Kunci: Gulma, Stok Karbon, Karbon Tanah, Kelapa Sawit.

PENDAHULUAN

Indonesia menjadi negara yang membudidayakan kelapa sawit terluas di dunia (12,3 juta ha) yang tersebar di 2 pulau utama yaitu Sumatera dan Kalimantan. Produksi minyak mentah kelapa sawit mencapai 45,8 juta ton CPO pada tahun 2019 (Ditjenbun, 2020), sehingga menjadikan sub sektor perkebunan ini sebagai salah satu penyumbang devisa terbesar nasional, terutama di tengah era pandemic Covid-19. Namun demikian kelapa sawit banyak mendapat tekanan internasional karena isu-isu negatif dari segi lingkungan (kekeringan, banjir, erosi dan biodiversitas SDA).

Di perkebunan kelapa sawit, umum ditemui tumbuhan pengganggu atau gulma yang terdiri dari puluhan spesies. Dua spesies gulma yang umum di perkebunan kelapa sawit adalah *Nephrolepis biserrata* dan *Asystasia intrusa*. Gulma ini umumnya tumbuh setelah kanopi kelapa sawit mempengaruhi pencahayaan di bawah tegakan (cahaya rendah), hingga memungkinkan menjadi gulma dominan. Hasil penelitian satriawan et al. (2019), *A. intrusa* mempunyai kerapatan relative 20-21%, sedangkan *N.biserrata* 6.06%. Gulma ini berpotensi untuk dijadikan tanaman penutup tanah di lahan kelapa sawit karena dinilai memiliki efek yang menguntungkan terutama dalam hal kontribusi terhadap kelembaban tanah. *N.biserrata* dan *A. gangetica* sebagai tanaman penutup tanah diasumsikan dapat meningkatkan kapasitas tanah mengikat air. Hal ini sesuai karakteristik akar serabut kelapa sawit yang dapat meningkatkan kemampuan pori-pori tanah mengikat air, terutama pada kedalaman lapisan olah tanah yang mempengaruhi cadangan air tanah. Hasil penelitian menyebutkan *N.biserrata* dapat mengurangi defisit kadar air tanah harian mencapai 40.3%. Hal ini disebabkan pada jangkauan kedalaman akar tumbuhan ini, air cenderung dapat tertahan (Ariyanti et al., 2015). Namun demikian potensinya dalam meningkatkan cadangan karbon tanah belum banyak diuji. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis

potensi sumbangan karbon tanah *Nephrolepis biserrata* dan *Asytasia intrusa* sebagai tanaman penutup tanah di perkebunan kelapa sawit.

METODE PENELITIAN

Lokasi dan Perancangan Penelitian

Penelitian dilakukan di Kebun Kelapa Sawit Universitas Almuslim yang ditanam pada tahun 2012 (8 tahun), 2013 (7 tahun), dan 2014 (6 tahun) yang terletak di Desa Blang Mane, Kecamatan Peusangan Selatan, Kabupaten Bireuen. Pengamatan berat kering dilakukan di Laboratorium Pertanian Terpadu Universitas Almuslim. Susunan percobaan menggunakan rancangan petak terbagi, yaitu umur tanaman kelapa sawit digunakan pada petak utama (8, 7, dan 6 tahun), sedangkan anak petak terdiri dari *Nephrolepis biserrata* dan *Asytasia intrusa* yang dipelihara sebagai tanaman penutup tanah.

Parameter Penelitian

Berat kering

Berat kering (g) diperoleh dari seluruh bagian tanaman yang telah dikeringkan menggunakan oven pada suhu 80°C selama 48 jam. Berat kering diukur dari petak contoh berukuran 1 m x 1 m, misalnya berat kering per petak percobaan adalah $100 \text{ g} \times 5 \text{ m}^2 = 1000 \text{ g/petak}$.

Laju Dekomposisi dan Karbon

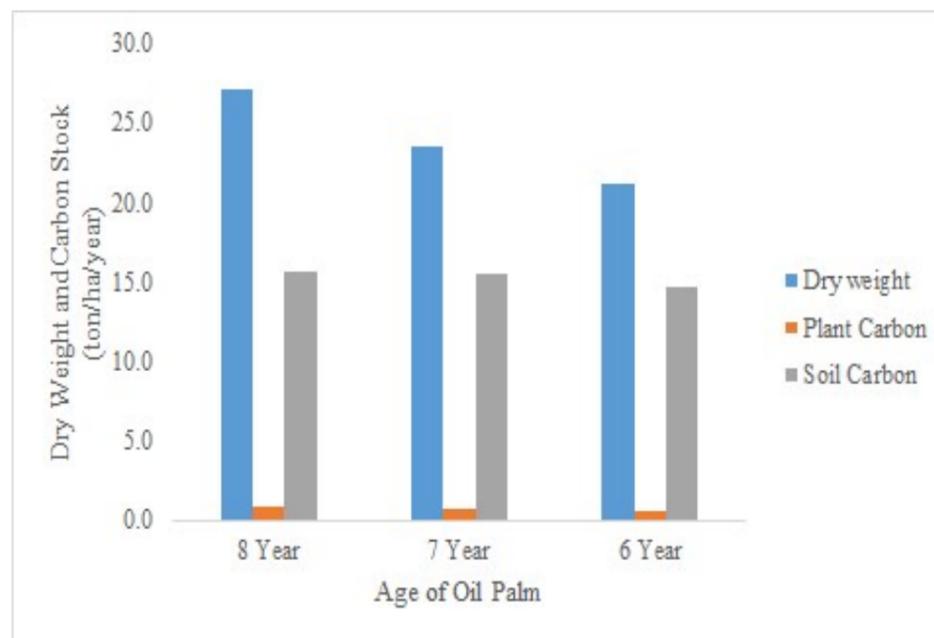
Laju dekomposisi dihitung dari penyusutan berat bahan tumbuhan yang terdekomposisi dalam satu satuan waktu dengan menggunakan persamaan: $R = (W_0 - W_t) / t$, dimana: R = laju penguraian (g/hari), W_0 = awal berat kering biomassa (g), W_t = berat kering biomassa setelah waktu pengamatan t (g), t = waktu pengamatan (hari). Kemudian dikonversikan ke dalam satuan kg/ha untuk mengetahui bobot biomassa total *N. biserrata* dan *A. intrusa* di perkebunan kelapa sawit. Analisis kandungan C-organik pada jaringan tanaman dilakukan dengan metode analisis destruksi basah sesuai petunjuk teknis Balai Penelitian Tanah. Selanjutnya, jumlah karbon yang tersimpan dari biomassa diperkirakan menggunakan persamaan sebagai berikut: $C = \text{biomassa (kg/ha)} \times \text{kandungan C tanaman}$.

Cadangan karbon tanah dihitung dengan menggunakan persamaan (Shofiyati et al. 2010) sebagai berikut: $C_{\text{Stok}} = BD \times C_{\text{org}} \times D \times A$, dimana: C_{Stok} = stok karbon tanah (t ha^{-1}), BD = massa jenis tanah (kg /m^3), C_{org} = kandungan C organik tanah (%), D = tebal lapisan tanah (m), A = luas lahan (ha).

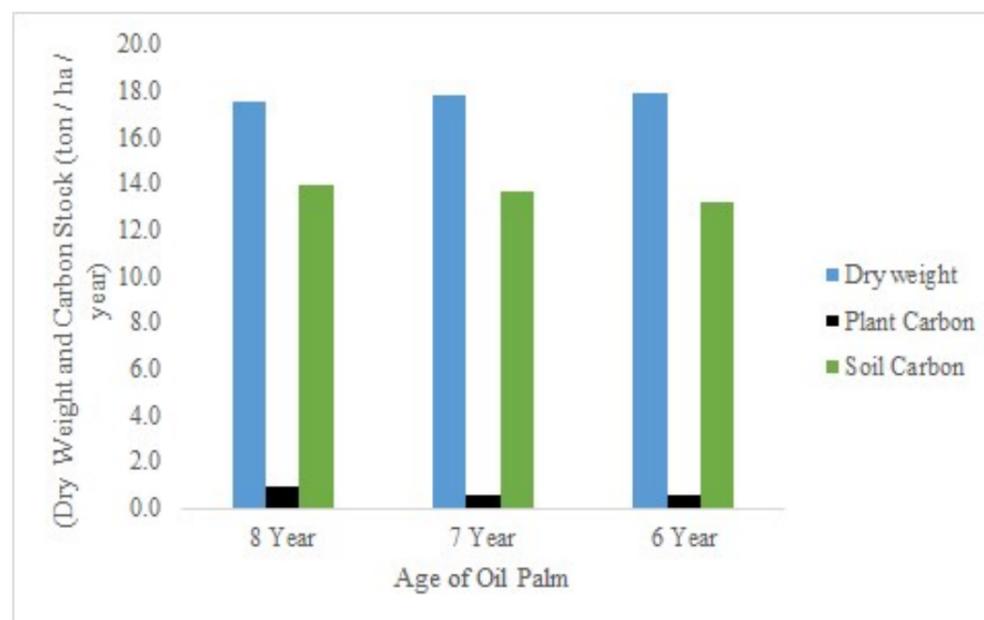
HASIL DAN PEMBAHASAN

Bobot Kering, karbon tanaman dan Laju Dekomposisi

Bobot kering tanaman merupakan gabungan antara bobot kering akar dan bobot kering tajuk. Bobot kering merupakan indikator pertumbuhan tanaman, semakin berat bobot kering tanaman dapat diartikan bahwa tanaman tersebut mempunyai pertumbuhan yang normal. Hasil analisis terhadap bobot kering *N. biserrata* dan *A. intrusa* per petak disajikan pada gambar 1 dan 2.



Gambar 1. Berat kering *N. biserrata* pada berbagai umur tegakan kelapa sawit



Gambar 2. Berat kering *A. intrusa* pada berbagai umur tegakan kelapa sawit

Umur tegakan kelapa sawit mempengaruhi perkembangan dan pertumbuhan gulma *N. biserrata* dan *A. intrusa*, terutama berkaitan dengan pertumbuhan luas dan indeks luas daun (dalam makalah seminar ini tidak disajikan), sehingga berpengaruh langsung terhadap bobot biomassa kedua gulma ini. Ariyanti et al. (2016) menyatakan bahwa tanaman yang mempunyai luas daun yang lebih baik akan menambah kemampuan tanaman untuk berfotosintesis lebih optimal, hal ini karena lebih luasnya permukaan daun tanaman menerima cahaya matahari sebagai sumber energi utama dalam proses fotosintesis, dengan demikian hasil fotosintesis yang tertimbun berupa bobot kering bibit juga lebih besar yang ditunjukkan dengan bobot kering tanaman yang lebih besar. Gambar 1 dan 2 memperlihatkan bobot kering *N. biserrata* di bawah tegakan kelapa sawit umur 8, 7 dan 6 tahun sebesar 27,1 ton/ha, 23,5 ton/ha dan 21,2 ton/ha. Sedangkan bobot kering biomassa *A. intrusa* masing-masing 17,6 ton/ha, 17,8 ton/ha dan 17,9 ton/ha pada kelompok umur kelapa sawit 8, 7 dan 6 tahun.

Tabel 1. Laju Dekomposisi *Asystasia intrusa* di bawah tegakan kelapa sawit

Umur Kelapa Sawit	Berat awal (gr)	Berat 30 hari (gr)	Berat 60 hari (gr)	Laju dekomposisi 30 hari (%/hari)	Laju dekomposisi 60 hari (%/hari)	Biomassa terdekomposisi 30 hari (%)	Biomassa terdekomposisi 60 hari (%)
8 Tahun	50	20.1 ^c	7.2 ^c	1.00 ^a	0.71 ^a	59.8 ^a	85.6 ^a
7 Tahun	50	17.3 ^b	4.3 ^b	1.09 ^a	0.76 ^b	65.4 ^b	91.4 ^b
6 Tahun	50	13.5 ^a	2.7 ^a	1.22 ^b	0.79 ^b	73 ^c	94.6 ^b

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang sama tidak berbeda nyata pada uji LSD taraf α 5%.

Tabel 2. Laju Dekomposisi *N. biserrata* di bawah tegakan kelapa sawit

Umur Kelapa Sawit	Berat awal (gr)	Berat 30 hari (gr)	Berat 60 hari (gr)	Laju dekomposisi 30 hari (%/hari)	Laju dekomposisi 60 hari (%/hari)	Biomassa terdekomposisi 30 hari (%)	Biomassa terdekomposisi 60 hari (%)
8 Tahun	50	31.31 ^c	17.1 ^a	0.62 ^a	0.55 ^b	37.38 ^a	65.8 ^b
7 Tahun	50	27.5 ^b	16.2 ^a	0.75 ^b	0.56 ^{ab}	45 ^b	67.6 ^b
6 Tahun	50	23.8 ^a	13.4 ^b	0.87 ^c	0.61 ^a	52.4 ^c	73.2 ^a

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang sama tidak berbeda nyata pada uji LSD taraf α 5%.

Laju dekomposisi *Asystasia intrusa* dipengaruhi oleh kondisi tegakan kelapa sawit pada tiap umur, dalam hal ini dekomposisi yang terbanyak dan tercepat terdapat pada tegakan kelapa sawit umur 6 tahun, diikuti pada tegakan kelapa sawit umur 7 dan 8 tahun. Dalam penelitian ini, *Asystasia intrusa* tidak cukup mudah terdekomposisi dimana dalam waktu 30 hari baru 73 % dari keseluruhan biomassa yang telah terdekomposisi dengan laju dekomposisi sebesar 1.22% per hari, kemudian dalam waktu 60 hari tidak terdekomposisi 100%, namun 94.6%. Hasil lebih rendah diperoleh pada tegakan 7 dan 8 tahun yaitu 91.4% dan 85.6 % (Tabel 1). Hasil ini mengindikasikan bahwa semakin tua umur kelapa sawit, dapat menghambat laju dekomposisi seresah tumbuhan yang ada di bawahnya. Fenomena ini menjadi menarik jika dikaitkan dengan keberlanjutan simpanan atau cadangan sumber organik yang dapat menjaga kesuburan tanah. Disatu sisi, hasil penelitian ini menunjukkan karakteristik gulma *Asystasia* dan *Nephrolepis biserrata* dimana laju dekomposisi dan persentase bahan yang terdekomposisi lebih besar yaitu 1,2 – 1,57 % per hari dan 73,2 – 94,5% dari total biomasanya.

Kehilangan bobot biomasa *N. biserrata* dan *A. intrusa* ini jauh lebih cepat dibandingkan dengan kehilangan bobot dari pelepah kelapa sawit serta gulma lain seperti *Melastoma malabathricum* L. Hasil penelitian Maswar (2009) menunjukkan bahwa pelepah kelapa sawit dan *M. malabathricum* membutuhkan waktu 14 bulan untuk terdekomposisi dengan kehilangan bobot biomasa 83.1% untuk pelepah kelapa sawit dan 87.6% untuk *M. malabathricum*. Demikian pula hasil penelitian (Sulistyanto et al., 2005) pada biomasa hutan rawa gambut di Kalimantan Tengah menunjukkan bahwa biomasa hutan di *mixed swamp forest* dan *low pole forest* membutuhkan waktu dekomposisi lebih lama dibandingkan dengan biomasa *A. gangetica*, yaitu 18 bulan dengan kehilangan bobot masing-masing sebesar 34.7% dan 27.6%.

Berkaitan dengan ini, kondisi lingkungan sangat berperan penting sebagai faktor yang mempengaruhi laju dekomposisi yaitu suhu (Quideau et al., 2001; Hevia et al., 2003). Pada keadaan ini intensitas cahaya dan suhu udara

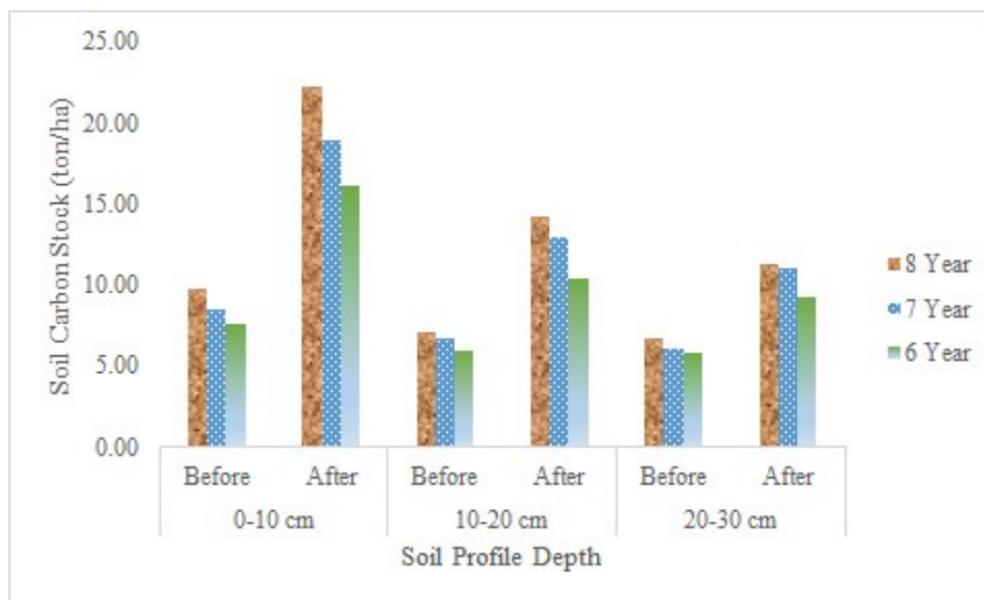
lebih berperan dibandingkan kelembaban udara, dimana pada intensitas cahaya dan suhu udara yang lebih tinggi tetapi kelembaban lebih rendah menyebabkan laju dekomposisi meningkat.

Cadangan karbon merupakan jumlah karbon yang tersimpan di dalam suatu ekosistem pada waktu tertentu, baik berupa biomasa tanaman, tanaman yang mati, maupun karbon di dalam tanah (Agus et al., 2011). Pendugaan cadangan karbon biomasa *Asystasia intrusa* menggunakan petak contoh berukuran 1 m x 1 m. Cadangan karbon yang diduga di dalam penelitian ini adalah kandungan karbon yang terdapat di dalam biomasa tanaman dan di dalam tanah. Pendugaan cadangan karbon dalam suatu lahan dapat dilihat dari besarnya potensi bobot kering biomasa yang tumbuh di atasnya. Umumnya, biomasa tanaman tersusun atas 45%-50% karbon, sehingga pendugaan seberapa besar suatu tanaman mampu menyimpan karbon (sebagai cadangan karbon) dapat diduga dari setengah jumlah bobot kering biomasanya (Maswar et al., 2011).

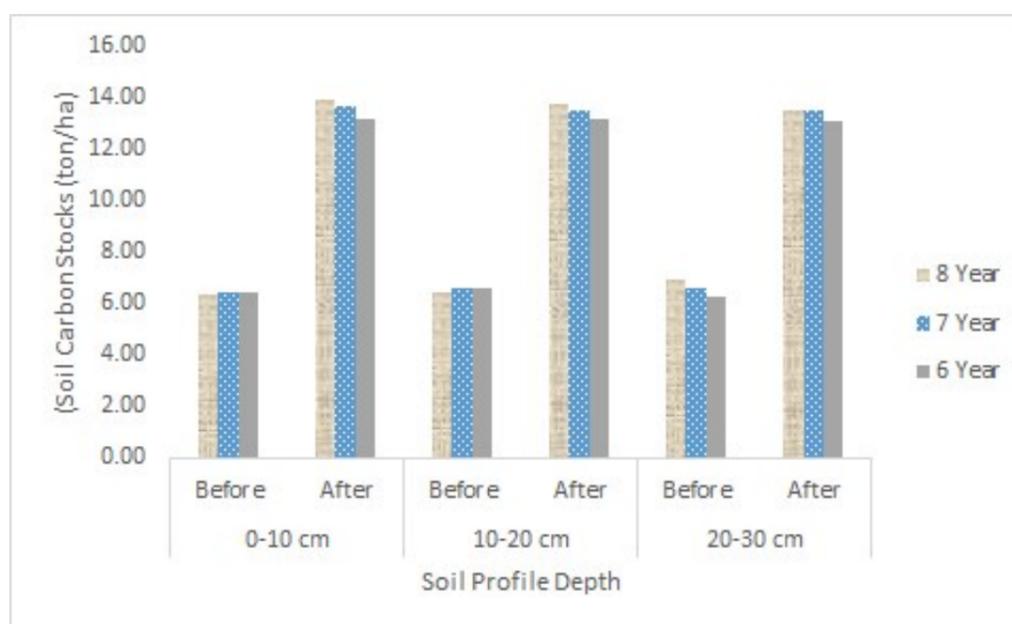
Oleh karena itu, cadangan karbon yang dimiliki oleh setiap bagian biomasa *N. biserrata* dan *A. intrusa* hampir mencapai setengah dari jumlah bobot kering biomasanya (Gambar 1-2). Hal ini juga berarti bahwa peningkatan jumlah biomasa suatu tanaman akan meningkatkan jumlah cadangan karbon di dalam suatu sistem pertanian. Dari Gambar 1 dan 2 terlihat bahwa, biomasa *N. biserrata* dan *A. intrusa* mampu menyimpan 0.6 - 0.9 ton C/ha/tahun di dalam jaringan tanaman. Pendugaan cadangan karbon biomasa *N. biserrata* dan *A. intrusa* ini sangat rendah apabila dibandingkan dengan pendugaan cadangan karbon biomasa pelepah kelapa sawit, *M. malabatricum* dan *Cycas* sp di perkebunan kelapa sawit rakyat Nanggroe Aceh Darussalam (lahan gambut) sebesar 9.4-12.2 t ha⁻¹ tahun⁻¹ (Maswar, 2009; Lasco, 2002), dan cadangan karbon biomasa di hutan tropis Asia yang berkisar antara 40-250 t ha⁻¹ (Tarnocai et al., 2009).

Cadangan Karbon Tanah

Selain cadangan karbon biomasa, pendugaan cadangan karbon tanah sangat penting untuk mengetahui berapa banyak karbon tanah yang dapat disimpan, baik secara alami maupun yang dikelola dalam sistem pertanian. Tanah merupakan gudang karbon terpenting dalam jangka panjang pada ekosistem daratan, karena tanah mengakumulasi karbon lebih besar daripada jumlah karbon di dalam biomassa tanaman dan atmosfer (Follet et al., 2009). Selain itu, karbon yang tersimpan di dalam tanah dapat berkontribusi untuk pencegahan emisi gas rumah kaca (Islam dan Weir, 2000), dan sebagai salah satu indikator penting dalam menentukan kualitas tanah (Hou et al., 2012), karena peranannya dalam menentukan sifat fisik, kimia, maupun biologi tanah (Liu et al., 2011), sehingga karbon yang tersimpan dalam tanah harus dipelihara dan dipertahankan.



Gambar 3. Cadangan Karbon Tanah *N. biserrata* pada tegakan kelapa sawit



Gambar 4. Cadangan Karbon Tanah *A. intrusa* pada tegakan kelapa sawit

Gambar 3 dan 4 menunjukkan bahwa tanah yang ditanami *N. biserrata* dan *A. intrusa* di bawah tegakan kelapa sawit 8 tahun mampu meningkatkan cadangan karbon tanah sebesar 119% - 127,72%. Pada tegakan kelapa sawit umur 7 tahun, penanaman *Asystasia intrusa* mampu memperbaiki kandungan C organik tanah sebesar 113% - 123,87%. Sedangkan pada tegakan kelapa sawit umur 6 tahun, terjadi peningkatan cadangan C organik sebesar 105.2% - 111,25%. Hal ini menunjukkan bahwa dengan adanya tanaman *N. biserrata* dan *Asystasia intrusa* mampu meningkatkan cadangan karbon tanah hampir 2 kali lipat untuk setiap kedalaman profil tanah. (Ohkura et al., 2003 dan Robert, 2001) menyatakan bahwa kandungan karbon tanah dipengaruhi oleh sifat fisik tanah (terutama bulk density), serta jenis vegetasi yang tumbuh di atasnya. Tanaman merupakan tempat penyimpanan karbon dengan menyerap karbon dari udara melalui proses fotosintesis menjadi bahan penyusun jaringan tanaman. Pada saat daun, ranting, atau keseluruhan tanaman mati, bahan ini kemudian dikembalikan ke tanah, dan mengalami dekomposisi.

Peningkatan cadangan karbon tanah di bawah tegakan kelapa sawit akibat penanaman *N. biserrata* dan *A. intrusa* dapat memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah sehingga memungkinkan untuk dapat meningkatkan cadangan air tanah. Kandungan karbon absolut dalam biomassa pada waktu tertentu dikenal dengan istilah cadangan karbon (*carbon stock*) (Hikmat, 2005). Separuh dari jumlah CO₂ yang diserap tanaman dari udara bebas masuk ke dalam tanah melalui

pengembalian residu tanaman (serasah), akar tanaman yang mati, dan organisme tanah lainnya yang mengalami dekomposisi sehingga terakumulasi dalam lapisan tanah (Sugirahayu dan Rusdiana, 2011).

KESIMPULAN

Kedua jenis gulma endemic di perkebunan kelapa sawit Universitas Almuslim (*N.biserrata* dan *A.intrusa*) berpotensi sebagai pengikat karbon. Ditinjau dari aspek ekologi, gulma ini berpotensi sebagai tanaman penutup tanah di bawah tegakan kelapa sawit.

DAFTAR PUSTAKA

- Agus F, Hairiah K, Mulyani A. 2011. Pengukuran Cadangan Karbon Tanah Gambut. Petunjuk Praktis. World Agroforestry Centre-ICRAF, SEA Regional Office dan Balai Besar Penelitiandan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian (BBSDL), Bogor, Indonesia. 58 p.
- Ariyanti M, Yahya S, Murtiaksono K, Suwanto, Siregar HH. 2015. Study of The Growth of *Nephrolepis biserrata* Kuntze and Its Utilization as Cover Crop under Mature Oil Palm Plantation. International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR). 19(1):325-333.
- Ariyanti, M., Yahya, S., Murtiaksono, K., Suwanto, Siregar, H.H. 2016. The influence of cover crop *Nephrolepis biserrata* and ridge terrace against run off and the growth of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). Jurnal Kultivasi, 15(2): 121-127. DOI: <http://dx.doi.org/10.24198/kltv.v15i2.11889>
- Follett RF, Kimble JM, Pruessner EG, Samson-Liebig S, Waltman S. 2009. Soil Organic Carbon Stocks with Depth and Land Use at Various U.S. Sites. Chapter 3 In 'Soil Carbon Sequestration and the Greenhouse Effect'. (Coeditors, Lal R and Follett RF), Soil Science Special Publication 57, second edition pp 29-46.
- Hevia GG, DE Buschiazza, EN Heppera. 2003. Organic matter in size fractions of soils of the semiarid Argentina. Effects of climate, soil texture and management. Geoderma 116: 265-277
- Hikmat A. 2005. Biomass estimation, carbon storage and energy content of three virgin jung reserves in Peninsular Malaysia. Media Konservasi. 10 (2): 1-8.
- Islam KR, Weil RR. 2000. Soil quality indicator properties in Mid-Atlantic Soils as influenced by conservation management. *J. Soil and Water Cons.* 55(1): 69-78.
- Lasco RD. 2002. Forest carbon budgets in Southeast Asia following harvesting and land cover change. In: Impacts of land use Change on the Terrestrial Carbon Cycle in the Asian Pacific Region. Science in China 45, 76-86.
- Liu Z, Shao M, Wang Y. 2011. Effect of environmental factors on regional soil organic carbon stock across the losses plateau region, China. Agriculture, Ecosystems, and Environment 142: 184-194.
- Maswar. 2009. Kecepatan dekomposisi biomassa dan akumulasi karbon pada konversi lahan gambut menjadi perkebunan kelapa sawit. Prosiding dan Lokakarya Nasional Inovasi Sumberdaya Lahan. Buku II: Teknologi Konservasi, Pemupukan, dan Biologi Tanah. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian. <http://balittanah.litbang.pertanian.go.id/ind/dokumentasi/prosiding2009pdf/13-II-2009-Maswar-%20set%20final.pdf>.
- Maswar, Haridjaja O, Sabiham S, van Noordwijk M. 2011. Cadangan, kehilangan, dan akumulasi karbon pada perkebunan kelapa sawit di lahan gambut tropika. *J. Solum*, VIII (1):1-10. DOI: <https://doi.org/10.25077/js.8.1.1-10.2011>
- Ohkura T, Yokoi Y, Imai H. 2003. Variations in soil organic carbon in Japanese arable lands. p273-280. In Smith, C.A.S. (ed.) Soil Organic Carbon and Agriculture: Developing Indicators for Policy Analyses. Proceedings of an OECD expert meeting, Ottawa Canada.
- Quideau SA, Chadwick, Benesi A, Graham RC, Anderson MA. 2001. A direct link between forest vegetation type and soil organic matter composition. Geoderma 104: 41-60.
- Robert M. 2001. Soil Carbon Sequestration for Improved Land Management. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. Rome. 75p.
- Satriawan H, Fuady Z. 2019. Analysis of weed vegetation in immature and mature oil palm plantations Biodiversitas 20: 3292-3298. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d201123>
- Shofiyati R, Las I, Agus F. 2010. Indonesian Soil Data Base and Predicted Stock of Soil Carbon. Proc. of Int. Workshop on Evaluation and Sustainable Management of Soil Carbon Sequestration in Asian Countries. Bogor (ID): 73-84.
- Sulistiyanto Y, Rieley JO, Limin SH. 2005. Laju dekomposisi dan pelepasan hara dari serasah dari dua sub-tipe hutan rawa gambut di Kalimantan Tengah. Jurnal Manajemen Hutan Tropika XI (2): 1-14.
- Tarnocai C, Canadell JG, Schuur EAG, Kuhry P, Mazhitova G, Zimov S. 2009. Soil organic carbon pools in the northern circum polar permafrost region. Global Biogeochemical Cycles 23(2): 1-11.