

Estimasi Jejak Karbon pada Budidaya Ubi kayu dari Berbagai Dosis Pupuk NPK dan Karbon Organik Tanah

Estimated Carbon Footprint in Cassava Cultivation from Various Levels of NPK Fertilizer and Soil Organic Carbon

Edi Santosa^{1*}, Syaiful Anwar¹, Arief Hartono², Gatot Pramuhadi³, Ridwan Diaguna¹, Sofyan Zaman¹
dan Herdhata Agusta¹

¹Departemen Agronomi dan Hortikultura, Institut Pertanian Bogor (IPB University),
Jl. Meranti, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680, Indonesia

²Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Institut Pertanian Bogor (IPB University),
Jl. Meranti, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680, Indonesia

³Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor (IPB University),
Jl. Lingkar Akademik, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680, Indonesia

*Penulis Korespondensi: edisang@gmail.com

Disetujui : 17 Maret 2024 / *Published Online* Mei 2024

ABSTRACT

Cassava is an industrial commodity and as important component in food security in Indonesia, but amount of carbon footprint from its cultivation activity is still unclear. Carbon footprinting is one of approaches to understanding sources of greenhouse gas emissions (GHG) that is valuable for mitigating global warming. The research aimed to assess the carbon footprint of cassava cultivation at various levels of NPK fertilizer and soil organic carbon (SOC). The research was conducted from September 2022 to May 2023 at the IPB Jonggol Experimental Farm. Emission data was estimated using the tier 1 scenario. Carbon emission depend on the rate of NPK fertilizer and SOC, ranging from 2,511.2 to 10,641.4 kg CO₂-eq ha⁻¹. On average, cassava cultivation emitted 6,455.5 kg CO₂-eq ha⁻¹ with a direct emission of 4,532.3 kg CO₂-eq ha⁻¹ and an indirect emission of 1,923.2 kg CO₂-eq ha⁻¹. NPK and manure contributed to the largest direct emissions, i.e., 36.99% and 54.96%, respectively. At the same time, the cultivation sequestered 27,445.1 to 61,684.2 kg CO₂-eq ha⁻¹ (average 51,032.4 kg CO₂-eq ha⁻¹) resulted in cassava growing had positive carbon balance (offsets) that reduced of global GHG emission of 24,933.9 to 54,493.1 kg CO₂-eq ha⁻¹ (average 44,577.0 kg CO₂-eq ha⁻¹). Based on regression formula, maximum GHG offsets was attained at level of SOC 4.8% and NPK 440.7 kg ha⁻¹. Efforts to achieve low-emission in cassava cultivation are suggested through reducing fertilizer input through incorporating biomass waste.

Keywords: carbon offsets, cassava, food security, GHG emission, low emission

ABSTRAK

Ubi kayu atau singkong merupakan komoditas industri dan komponen penting pada ketahanan pangan di Indonesia, tetapi informasi jejak karbon dari kegiatan budidaya masih terbatas. Jejak karbon adalah salah satu pendekatan untuk memahami sumber emisi gas rumah kaca (GRK) yang berguna untuk mitigasi pemanasan global. Penelitian bertujuan melakukan asesmen jejak karbon budidaya ubi kayu pada berbagai taraf pupuk NPK dan karbon organik tanah (C-org). Penelitian dilakukan pada September 2022 hingga Mei 2023 di Kebun Percobaan IPB Jonggol. Data emisi diestimasi menggunakan skenario tier 1. Budidaya ubi kayu memiliki jejak karbon 2,511.2-10,641.4 kg CO₂-eq ha⁻¹ tergantung dosis NPK dan C-org. Budidaya mengemisikan karbon rata-rata 6,455.5 kg CO₂-eq ha⁻¹ dengan emisi langsung 4,532.3 kg CO₂-eq ha⁻¹ dan tidak langsung sebesar 1,923.2 kg CO₂-eq ha⁻¹. Input NPK dan pupuk kandang menyumbang emisi langsung terbesar yakni berturut-turut 36.99% dan 54.96%. Pada waktu yang bersamaan, budidaya menskuestrasi karbon 27,445.1- 61,684.2 kg CO₂-eq ha⁻¹ (rata-rata 51,032.4 kg CO₂-eq ha⁻¹) sehingga budidaya memiliki neraca karbon positif yang berarti mengurangi GRK, yakni sebesar 24,933.9-54,493.1 kg CO₂-eq ha⁻¹ (rata-rata 44,577.0 kg CO₂-eq ha⁻¹). Berdasarkan regresi, tingkat C-org 4.8% dan dosis NPK (15-15-15) 440.7 kg ha⁻¹ memberikan pengurangan (*offsets*) emisi GRK maksimum. Upaya mencapai budidaya ubi kayu rendah emisi diprioritaskan melalui pengurangan input pupuk misalnya dengan mengembalikan limbah biomasa budidaya.

Kata kunci: emisi karbon, emisi GRK, ketahanan pangan, rendah emisi, singkong

PENDAHULUAN

Ubi kayu atau singkong (*Manihot esculenta* Crantz.) merupakan komoditas terpenting ke-8 di Indonesia setelah padi sawah, ayam kampung, sapi potong, kelapa, jagung hibrida, kambing, dan kelapa sawit; dan budidaya ubi kayu melibatkan sebanyak 2.05 juta rumah tangga atau 6.97% dari total 29.3 juta rumah tangga pertanian dalam arti luas pada 2023 (BPS, 2023). Produksi ubi kayu utamanya untuk menopang kebutuhan industri baik industri pangan maupun industri lain seperti kertas, kayu lapis, tekstil, penstabil pada pangan, industri obat, dan pengental (Verma *et al.*, 2022). Selain itu, ubi kayu juga menjadi bagian penting pada pembangunan ketahanan pangan di Indonesia (Herlina dan Nuraeni, 2014).

Produksi ubi kayu di Indonesia pada 2019 adalah 16.3 juta ton dengan Jawa Barat sebagai penyumbang nomor 4 terbesar sekitar 10% dari produksi nasional (Kementan, 2020). Menurut Suryana *et al.* (2016) ubi kayu di Jawa Barat menyumbang pendapatan petani hingga 59%.

Di sisi lain, sektor pertanian dituntut untuk memberikan kontribusi dalam mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) untuk menekan pemanasan global (Fawzy *et al.*, 2020). Pemanasan global secara umum memicu perubahan iklim yang berkontribusi negatif pada produksi tanaman (Dulbari *et al.*, 2021; Purwono *et al.*, 2021). Pada tanaman ubi kayu, peningkatan suhu berdampak negatif pada pertumbuhan dan hasil umbi (Santanoo *et al.*, 2022).

Sebagian besar perusahaan global sudah menetapkan kontribusi pada pengurangan emisi GRK sebagai komponen penting dalam rantai pasok komoditas (Hedlund *et al.*, 2022). Untuk itu, komoditas ubi kayu di Indonesia yang sebagian diekspor (Kementan, 2020), perlu berinisiatif mengembangkan budidaya rendah emisi. Namun demikian, informasi terkait emisi GRK dari budidaya ubi kayu masih sangat terbatas. Lansche *et al.* (2020) melakukan analisis LCA pada ubi kayu di Malaysia, termasuk menghitung emisi CO₂, tetapi tidak mempertimbangkan nilai skuestrasinya sehingga dianggap kurang lengkap.

Telah banyak model dalam perhitungan

emisi GRK, baik yang bersifat langsung maupun tidak langsung (Suryadi *et al.*, 2012; Arjuna dan Santosa, 2018; Lansche *et al.*, 2020). Diantara ragam model perhitungan, penggunaan pendekatan jejak karbon (*carbon footprint*) termasuk yang relative mudah dihitung (Arjuna dan Santosa, 2018).

Jejak karbon merupakan salah satu pendekatan dalam menghitung jejak ekologis (*ecological footprint*), yang mempertimbangkan sumber-sumber emisi GRK dari aktivitas langsung (di lahan) dan aktivitas tidak langsung (di luar lahan) (Arjuna dan Santosa, 2018). Jejak karbon juga dapat dihitung dalam kerangka neraca GRK yakni emisi dibandingkan dengan serapan karbon oleh tanaman (*carbon sequestration*) (Mattila *et al.*, 2022). Dengan demikian, terbuka peluang untuk mengurangi jejak karbon kegiatan budidaya. Penelitian bertujuan melakukan asesmen jejak karbon budidaya ubi kayu pada berbagai taraf pupuk NPK dan karbon organik tanah.

BAHAN DAN METODE

Waktu dan Tempat

Percobaan dilakukan pada September 2022-Mei 2023 di Kebun Percobaan IPB Jonggol, Jawa Barat (113 m dpl). Rata-rata hujan bulanan adalah 303 mm (211–500 mm), suhu 26.0 °C (22.2-31.3 °C), dan RH udara 85.3% (82.1-86.6%). Jenis tanah adalah ultisol dengan kandungan pasir, debu dan liat berturut-turut adalah 15.7%, 22.9% dan 61.4 %. Tanah memiliki *bulk density* 1.15 g cm⁻³, dengan pH (H₂O) 4.52 dan C-organik 1.93%.

Desain Percobaan

Percobaan disusun tersarang dengan petak utama tingkat kandungan karbon tanah (kontrol (C1), 2% (C2), 4% (C3) dan 6% (C4)) dan anak petak dosis NPK 15-15-15 (150, 300, 450 dan 600 kg ha⁻¹). Petak berukuran 5 m x 4 m (20 m²) dengan jarak tanam 1 m x 0.8 m. Klon ubi kayu adalah Mangu asal Bogor. Karbon organik tanah diatur dengan memberikan pupuk kandang sapi (C-org 33.6% dan N total 2.4%). Hasil analisis tanah pada berbagai perlakuan seperti disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Persentase karbon (C) dan nitrogen (N) tanah sebelum dan setelah penelitian

Perl. C:NPK	Sebelum		Sesudah		Selisih	
	C	N	C	N	C	N
C1:150	1.93	0.24	2.06	0.20	0.13	-0.04
C1:300	1.93	0.24	1.98	0.25	0.05	0.01
C1:450	1.93	0.24	2.00	0.24	0.07	0
C1:600	1.93	0.24	1.93	0.20	0	-0.04
C2:150	1.93	0.24	2.15	0.23	0.22	-0.01
C2:300	1.93	0.24	2.01	0.23	0.08	-0.01

Tabel 1. Persentase karbon (C) dan nitrogen (N) tanah sebelum dan setelah penelitian (*Lanjutan*)

Perl. C:NPK	Sebelum		Sesudah		Selisih	
	C	N	C	N	C	N
C2:450	1.93	0.24	1.96	0.22	0.03	-0.02
C2:600	1.93	0.24	1.98	0.20	0.05	-0.04
C3:150	1.93	0.24	2.55	0.29	0.62	0.05
C3:300	1.93	0.24	3.16	0.35	1.23	0.11
C3:450	1.93	0.24	2.19	0.27	0.26	0.03
C3:600	1.93	0.24	3.50	0.38	1.57	0.14
C4:150	1.93	0.24	3.95	0.41	2.02	0.17
C4:300	1.93	0.24	4.56	0.48	2.63	0.24
C4:450	1.93	0.24	3.42	0.38	1.49	0.14
C4:600	1.93	0.24	3.54	0.41	1.61	0.17

Keterangan: C1: 1.93%, C2: 2%, C3: 4%, C4: 6%

Pengelolaan Tanaman

Bibit tanaman adalah stek ukuran 25 cm. Budidaya dilakukan secara manual, termasuk dalam pengolahan tanah dan pemeliharaan. Guludan memiliki lebar permukaan 60 cm.

Bersamaan dengan pengolahan tanah ditebarkan kapur pertanian sebanyak 2 ton ha⁻¹. Penanaman dilakukan 1 bulan setelah olah tanah, sebanyak 25 tanaman per unit percobaan. Aplikasi pupuk kandang untuk meningkatkan kandungan C-organik tanah dilakukan pada individu tanaman mengikuti Alghifari *et al.* (2023). C-org perlakuan kontrol adalah 1.93%. Jumlah pupuk kandang yang diberikan per tanaman pada C-org 2% adalah 0.29 kg (3.59 ton ha⁻¹), 3% adalah 4.39 kg (54.93 ton ha⁻¹) dan 4% adalah 8.50 kg (106.27 ton ha⁻¹).

Pupuk NPK pertama diberikan pada 2 minggu setelah tanam (MST). Jumlah yang diberikan sepertiga dosis yakni 4, 8, 12, dan 16 g per tanaman untuk perlakuan NPK 150, 300, 450 dan 600 kg ha⁻¹. Pemupukan berikutnya untuk sisa dosis pada 12 MST sebanyak 8, 16, 24, dan 32 g per tanaman. Bersamaan dengan pemupukan kedua dilakukan pengendalian gulma secara manual, pengurangan cabang menjadi dua batang yang paling vigor, dan pembumbunan. Panen dilakukan secara manual pada umur 8 bulan.

Squestrasi Karbon

Skuestrasi karbon (*carbon sequestration*) adalah CO₂ dari udara yang diasimilasikan menjadi biomassa (Mattila *et al.*, 2022). Dalam komponen biomassa, karbon ada dalam bentuk struktural (biomassa daun, batang dan umbi ubi jalar) dan karbon non struktural berupa gula terlarut dan pati.

Kandungan karbon pada biomassa kering ubi kayu mengikuti Tabel 2. Kandungan karbon biomas selanjutnya dihitung CO₂ *equivalent* (CO₂-eq). Atom karbon memiliki bobot 12 dan oksigen adalah 16, maka bobot molekul CO₂ adalah 44. Artinya, satu ton karbon sama dengan 44/12 = 3.67

ton CO₂-eq.

Total karbon per hektar untuk setiap biomassa dihitung dengan konversi bobot per sampel tanaman dikalikan dengan total populasi per hektar sebanyak 12,500 tanaman.

Asumsi dalam perhitungan squeststrasi adalah (1) nilai emisi dari dekomposisi daun ubi kayu tidak dihitung, (2) karbon non struktural ada dalam agregasi perhitungan karbon struktural, (3) pelepasan asam organik dari eksudat akar tidak diperhitungkan, dan (4) C-org tanah tidak diperhitungkan dalam perhitungan squeststrasi.

Tabel 2. Kandungan karbon per biomassa kering dari organ tanaman ubi kayu

Biomass	Karbon (%)	Referensi
Daun	45.80	Rahajoe <i>et al.</i> (2016)
Batang	42.00	Rahajoe <i>et al.</i> (2016)
Umbi kupas	61.29	Moremi <i>et al.</i> (2016)
Kulit umbi*	59.31	Suprabawati <i>et al.</i> (2018)

Keterangan: * jumlah kulit umbi adalah 20% dari total umbi segar menurut Ntelok (2017)

Sumber Emisi

Estimasi emisi menggunakan pendekatan Tier 1 dan Tier 2 (KLH, 2012). Sumber emisi berasal dari kegiatan langsung dan tidak langsung (Tabel 3). Emisi langsung adalah jumlah input yang diberikan dikalikan dengan faktor emisi, sedangkan emisi tidak langsung berasal dari emisi pada proses sintesis atau perolehan input produksi. Input yang berupa tenaga kerja tidak dimasukkan dalam perhitungan emisi. Kegiatan pasca panen dan pengolahan ubi kayu tidak dimasukkan dalam perhitungan nilai emisi.

Emisi langsung CO₂ dan N₂O dari NPK 15-15 diasumsikan berasal dari urea. Emisi CO₂ dihitung 15% dari bobot NPK dikalikan dengan faktor emisi (Tier 1) 0.20 setara dengan bobot atom

C pada urea. Emisi N₂O dihitung berdasarkan faktor emisi 0.1 dari persentase nitrogennya. Emisi dari P₂O₅ dan K₂O tidak diperhitungkan. Emisi

CH₄ dan N₂O disetarakan menjadi CO₂-eq dengan faktor pengali 23 dan 296 (KLH, 2012).

Tabel 3. Jumlah input budidaya tanaman ubi kayu yang diperhitungkan dalam emisi

Perl. C:NPK	NPK (kg)	Pupuk kandang (ton)	Input lain sama per perlakuan
C1:150	150	0	• Kebun 1 ha;
C1:300	300	0	• Bensin persiapan lahan 20 L ha ⁻¹
C1:450	450	0	• Kapur 2 ton ha ⁻¹
C1:600	600	0	• Glifosat 1.94 kg
C2:150	150	3.59	• Racun tikus (bradifocum) 20 kg
C2:300	300	3.59	• Bensin babad rumput 20 L ha ⁻¹ *
C2:450	450	3.59	• Bensin transport pekerja 280 L ha ⁻¹ .
C2:600	600	3.59	
C3:150	150	54.93	
C3:300	300	54.93	
C3:450	450	54.93	
C3:600	600	54.93	
C4:150	150	106.27	
C4:300	300	106.27	
C4:450	450	106.27	
C4:600	600	106.27	

Keterangan: *mesin potong rumput 2 tak

Emisi pupuk kandang (SFo) dihitung dengan rumus KLH (2012) yakni $SFo = (1 + (ROA \times CF))^{0.59}$; ROA adalah dosis pupuk kandang (ton ha⁻¹), dan CF adalah faktor konversi 0.14.

Emisi CO₂ dari pemberian kapur (CaCO₃) dihitung dengan rumus $LE = M \times EF$; M adalah jumlah kapur (ton per tahun) dan EF-faktor emisi kapur sebesar 0.12 (Tier 1) (Tabel 4).

Emisi CO₂ dan N₂O dari kebun dihitung harian untuk 224 hari (8 bulan) berdasarkan KLH (2012) dengan modifikasi. Modifikasinya adalah mempertimbangkan seluruh emisi asal N tanah, C tanah (Tabel 1), dan emisi tanah. Emisi CH₄ harian (EFi) dihitung dengan persamaan: $EFi = (EFc \times SFw \times SFp \times SFo \times SFs,r)$, dimana emisi baseline

(EFc) diset 1, faktor skala air (SFw) berupa lahan tadah hujan rawan kering diset 0.4, faktor skala persiapan lahan (SFp) tidak tergenang diset 1, faktor skala bahan organik (SFo) berupa pupuk kandang, dan faktor skala untuk jenis tanah (SFs) berupa tanah ultisol diset 0.29.

Emisi langsung dari bahan bakar minyak (BBM) untuk kegiatan persiapan lahan tidak memisahkan antara emisi CO₂ dan N₂O, tetapi langsung dikalikan dengan faktor emisi setara CO₂-eq menurut US-EPA (2014) seperti pada Tabel 4. Persiapan lahan secara manual, tetapi pembabadian lahan menggunakan mover (masin 2 tak) konsumsi BBM sebanyak 20 L ha⁻¹.

Table 4. Asumsi faktor emisi karbon tiap sumber di kebun ubi kayu per hektar

Sumber emisi	Emisi CO ₂ -eq (g)	Referensi
Langsung		
NPK 15-15-15 (kg)		
Ppk sapi (kg)	Di hitung	KLH (2012)
Lahan (m ²)		
Bensin persiapan lahan (L)	2,373.0	US-EPA (2014)
Kapur (g)	0.12	KLH (2012)
Tidak langsung		
NPK 15-15-15 (kg)	1,124.3	Davis dan Haglund (1999).
Ppk sapi (ton)*	4,725.7	Dihitung
Glifosat (kg ai)	3,132.6	Audsley <i>et al.</i> (2009)
Bradifacoum (kg) [§]	14,490.0	Lillywhite <i>et al.</i> (2007)
Bensin (L) #	1,000.0	Brata <i>et al.</i> (2018)
Transport motor pegawai (L)	2,373.0	US-EPA (2014)
Kaptan (kg)	23.29	Bendouma <i>et al.</i> (2020)

Keterangan: *pupuk kandang sapi; #bahan bakar mesin babad dan motor pegawai; §estimasi dari sintesis insektisida umum

Emisi tidak langsung pupuk NPK 15-15-15 dihitung berdasarkan deskripsi yakni terbuat dari nitrogen 15%, P₂O₅ 15%, kalium 15%, belerang 9% dan Zn 0.2% (Petrokimia Gresik, 2024). Emisi GRK untuk sintesis NPK berbasis asam mengikuti Davis dan Haglund (1999) (Tabel 4).

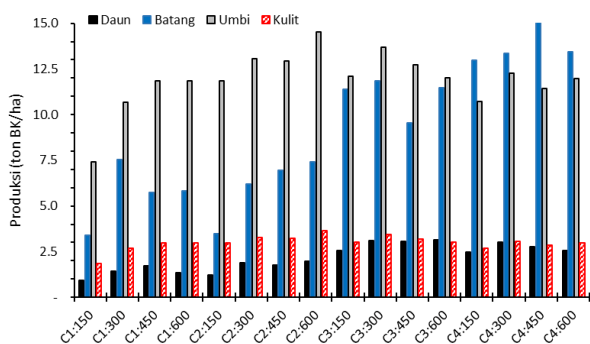
Emisi tidak langsung untuk pupuk kandang sapi dihitung berdasarkan asumsi setiap hari seekor sapi menghasilkan kotoran 9.66 kg (Yulianingsih dan Pramono, 2019), sehingga setiap ton pupuk kandang segar dihasilkan dari 104 ekor sapi per hari. Emisi CO₂ dari fermentasi enterik selama di kandang dihitung dengan asumsi berat karkas (WCE) 55% sebesar 0.08 kg CO₂-eq kg⁻¹ WCE, sedangkan fermentasi kotoran sapi padat sebesar 0.002 kg CO₂-eq kg⁻¹ WCE (Kania, 2015). Emisi dari limbah padat diasumsikan selama satu minggu. Emisi dari kotoran sapi segar menjadi pupuk kandang selama (60 hari) diperkirakan dari angka pengamatan Yulianingsih dan Pramono (2019) yakni CH₄ setara dengan 0.1342 g CO₂-eq ton⁻¹, dan N₂O setara dengan 0.4538 g CO₂-eq ton⁻¹ sehingga total. Total emisi sebesar 0.5879 g CO₂-eq ton⁻¹.

Para pekerja menggunakan kendaraan roda dua dari rumah ke lapang total sekitar 280 L ha⁻¹, sebagai emisi tidak langsung. Emisi CO₂-eq dari proses produksi BBM bensin diestimasi dari Brata *et al.* (2018), yang meliputi komponen *lifting* dan pemurnian untuk total 300 L ha⁻¹ (20 L mover dan 280 L kendaraan bermotor). Transportasi hasil dari kebun ke pasar tidak dimasukkan dalam analisis.

Neraca dan Jejak Karbon

Neraca karbon (*carbon balance*) dihitung dari total emisi dikurangi dengan total squestisasi. Total emisi merupakan penjumlahan dari emisi langsung dan tidak langsung. Neraca positif berarti budidaya menyumbang pada pengurangan GRK atau disebut dengan *offsets*.

Jejak karbon dihitung dari net selisih karbon



Gambar 1. Produksi biomassa kering organ tanaman ubi kayu per hektar

dibagi dengan total produksi umbi basah tanpa dikupas. Varietas yang digunakan pada penelitian ini tidak menjadi pertimbangan dalam perhitungan jejak karbon.

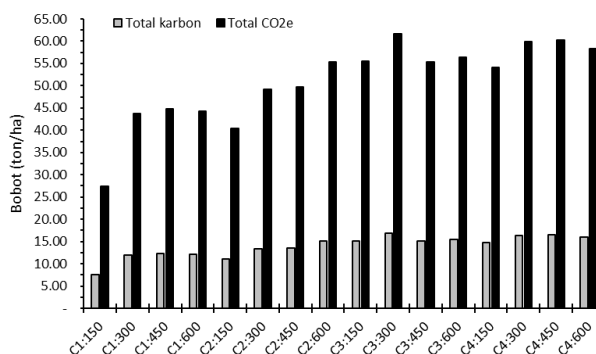
HASIL DAN PEMBAHASAN

Produksi Biomassa dan Squestrasi Karbon

Tanpa memperhatikan perlakuan, proporsi biomassa kering ubi kayu paling tinggi adalah umbi 46.72% (35.13-60.67%), diikuti oleh batang 33.48% (17.84-47.53%), kulit umbi 11.68% (8.78-15.17%) dan daun 8.14% (6.07-10.71%). Proporsi bobot kering umbi sebesar 46.72% terhadap total biomassa menunjukkan bahwa ubi kayu termasuk kurang efisien dalam alokasi fotosintat dibandingkan dengan tanaman padi yang sekitar 67-68% (Baba *et al.*, 2021). Menurut Amao *et al.* (2018) efisiensi dalam alokasi fotosintat dicerminkan pada indeks panen yang tinggi. Di sisi lain, fakta tersebut berimplikasi pada pentingnya pengembalian biomassa untuk mempertahankan squestisasi karbon.

Terdapat variasi produksi biomassa karena perlakuan C-org dan dosis NPK, dengan produksi biomassa memiliki tren meningkat seiring dengan peningkatan kandungan C-org tanah dan dosis NPK (Gambar 1). Pada perlakuan C-org C3 (4%), proporsi BK batang lebih tinggi dibandingkan perlakuan C1 dan C2. Pada C-org C4 (6%), BK batang melebihi BK umbi artinya terjadi akumulasi fotosintat yang lebih tinggi pada batang dibandingkan dengan C3.

Jumlah stok karbon pada tanaman ubi kayu, dengan asumsi semua bagian tanaman termasuk umbi bervariasi antara 7.49-16.82 ton C ha⁻¹ dengan rata-rata 13.92 ton C ha⁻¹ (Gambar 2). Nilai tersebut sebanding dengan kemampuan menyerap total sebesar 27.45-61.68 ton CO₂-eq ha⁻¹ dengan rata-rata 51.03 ton CO₂-eq ha⁻¹.



Gambar 2. Jumlah squestisasi karbon dan CO₂-eq tanaman ubi kayu per hektar

Emisi CO₂-eq Kegiatan Budidaya

Emisi CO₂-eq pada budidaya ubi kayu beragam tergantung pada tingkat C-org tanah dan dosis pemberian pupuk NPK (Tabel 5). Emisi langsung bersifat sensitif terhadap input produksi sedangkan emisi tidak langsung bersifat kurang sensitif. Tingkat emisi langsung yang diperoleh pada penelitian ini lebih rendah dibandingkan dengan riset Suryadi *et al.* (2011). Suryadi *et al.* (2011) mengukur emisi langsung menggunakan *chamber* pada pertanaman ubi kayu di Bogor memperoleh nilai CH₄ sebesar 1.57 kg ha⁻¹ tahun⁻¹ dan emisi N₂O sebesar 1.52 kg ha⁻¹ tahun⁻¹; setara dengan total 486.0 CO₂-eq ha⁻¹ tahun⁻¹.

Jika dibandingkan tanaman kopi, emisi CO₂ pada ubi kayu jauh lebih rendah (Tabel 5) yakni 2.51-10.64 ton CO₂-eq. Menurut Yuniarti dan Kartikawati (2019) perkebunan kopi di Kab Bangli dan Kab Badung Bali yang diberi pupuk kandang memberikan emisi GRK yang berbeda, dimana di Bangli sebesar 30.27-34.14 ton CO₂-eq sedangkan

di Badung sebesar 20.71-39.75 ton CO₂-eq ha⁻¹ tahun⁻¹.

Neraca dan Jejak Karbon

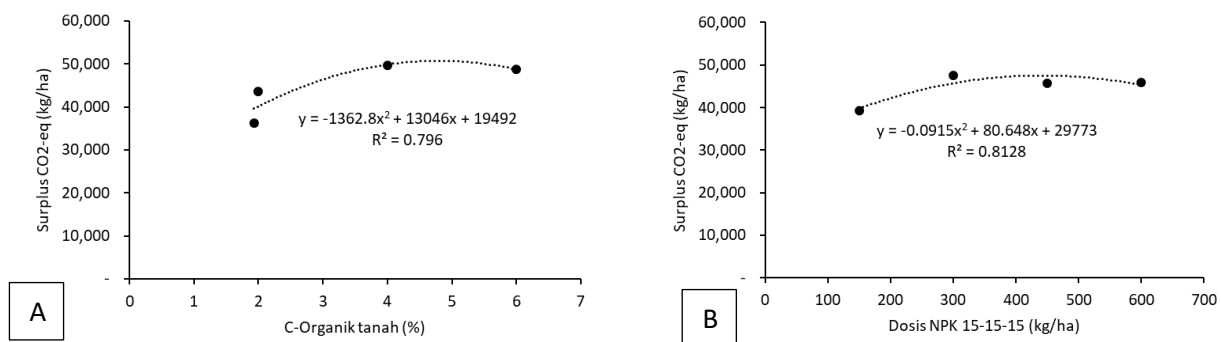
Penyerapan CO₂ selama budidaya ubi kayu lebih besar dibandingkan dengan total emisi (Tabel 5), dengan demikian terjadi emisi negatif. Respon surplus karbon bersifat kuadratik dengan nilai R²=0.7960 pada perlakuan C-org dan R²=0.8128 pada perlakuan NPK (Gambar 3). Nilai surplus berkisar antara 25,600-55,825 kg CO₂-eq ha⁻¹ (rata-rata 46,242 kg CO₂-eq ha⁻¹). Surplus pada perlakuan C-org tanah (Gambar 3A) cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan surplus dari perlakuan NPK (Gambar 3B).

Gambar 3 menunjukkan bahwa budidaya tanaman ubi kayu meninggalkan jejak karbon yang negatif atau memiliki neraca positif, artinya perkebunan singkong tidak menyumbang emisi tetapi justru mengurangi GRK

Tabel 5. Total emisi CO₂-eq pada berbagai C organik tanah dan dosis NPK percobaan ubi kayu

C:NPK	Total CO ₂ squestasi (kg ha ⁻¹)	Emisi CO ₂ -eq (kg ha ⁻¹)		
		L	TL	Total
C1:150	27,445.1	1,035.7	1,475.5	2,511.2
C1:300	43,808.4	1,706.2	1,644.2	3,350.4
C1:450	44,802.8	2,376.7	1,812.8	4,189.5
C1:600	44,211.9	3,047.2	1,981.5	5,028.7
C2:150	40,478.6	2,307.2	1,492.5	3,799.7
C2:300	49,128.6	2,977.7	1,661.2	4,638.9
C2:450	49,781.4	3,648.2	1,829.8	5,478.0
C2:600	55,266.6	4,318.7	1,998.4	6,317.2
C3:150	55,573.9	4,616.9	1,735.1	6,352.0
C3:300	61,684.2	5,287.4	1,903.8	7,191.1
C3:450	55,357.7	5,957.9	2,072.4	8,030.3
C3:600	56,375.0	6,628.4	2,241.1	8,869.4
C4:150	54,060.8	6,146.2	1,977.7	8,124.0
C4:300	59,878.8	6,816.7	2,146.4	8,963.1
C4:450	60,285.8	7,487.2	2,315.0	9,802.2
C4:600	58,379.3	8,157.7	2,483.7	10,641.4

Keterangan: L-emisi langsung; TL-emisi tidak langsung



Gambar 3. Surplus neraca karbon pada budidaya ubi kayu. A-Pengaruh C-organik tanah, B-Pengaruh dosis NPK

Menurut Lansche *et al.* (2020) emisi GRK dari lahan ubi kayu utamanya adalah CO₂ dan N₂O dengan proporsi berturut-turut sekitar 60% dan 36%; dengan emisi langsung N₂O berasal dari pupuk nitrogen dan CO₂ berasal dari BBM kegiatan mekanisasi. Pada penelitian ini, aktivitas budidaya adalah manual, dengan demikian kontribusi dari pembakaran BBM mekanisasi nol. Untuk menghasilkan setiap kilogram umbi segar beserta kulit, kegiatan budidaya melepaskan emisi GRK sebesar 107.49 g CO₂-eq, tetapi disisi lain juga menskuestrasi sebesar 1.04-1.35 kg CO₂-eq (rata-rata 1.17 kg CO₂-eq). Lansche *et al.* (2020) menyatakan bahwa budidaya singkong di Malaysia mengemisikan 4 kg CO₂-eq per kg umbi segar. Perbedaan yang sangat besar ini perlu kajian lebih lanjut. Ada kemungkinan karena estimasi emisi berdasarkan Tier 1, sedangkan penelitian Lansche *et al.* (2020) menggunakan pendekatan Tier 3.

Untuk memaksimalkan kontribusi budidaya ubi kayu dalam pengurangan GRK, komponen yang menyumbang emisi GRK perlu diperhatikan, misalnya penerapan teknologi *balance nutrition* (Suwarto *et al.*, 2023) dan pertanian regeneratif. Pada banyak tanah, kahat unsur hara seperti P, S, B dan Mn dapat mempengaruhi kapasitas tanah untuk menyimpan karbon (Mattila *et al.*, 2022). Hal tersebut didasari bahwa dosis NPK dan pupuk kandang menyumbang emisi langsung terbesar yakni berturut-turut 36.99% dan 54.96%. Berdasarkan regresi pada Gambar 3, tingkat C-org sebesar 4.8% dan dosis NPK 15-15-15 sebesar 440.7 kg ha⁻¹ memberikan surplus CO₂-eq tertinggi pada budidaya ubi kayu. Semakin tinggi surplus CO₂-eq berarti budidaya semakin ramah lingkungan. Pada kombinasi tersebut hasil umbi dengan kulit yang diperoleh sekitar 46.95 ton ha⁻¹.

Input lain yang perlu diperhatikan adalah kegiatan pengendalian gulma yang umum menggunakan herbisida untuk menekan biaya tenaga kerja. Menurut Cornish dan Sweetman (2023) glifosat dapat meningkatkan aktivitas mikroba tanah yang meningkatkan emisi CH₄.

Selain itu, penggunaan *legume cover crops* (LCC) dapat didorong di pertanaman ubi kayu sebagai alternatif penyediaan hara (Suwarto dan Parlindungan, 2020). Penggunaan LCC juga mendukung pertanian regeneratif. Penggunaan LCC pada budidaya ubi kayu merupakan teknik baru. Menurut Rivera dan Chara (2021), menanam tanaman family Leguminosa dapat mengurangi jejak karbon. Penggunaan LCC selain dapat mengurangi penggunaan pupuk kandang juga untuk meningkatkan C-organik tanah. Penggunaan pupuk kandang sapi berkontribusi pada peningkatan emisi CH₄, N₂O dan CO₂ dari lahan (Yulianingsih dan Pramono, 2019).

Penggunaan kapur untuk meningkatkan pH pada tanah ultisol seperti pada penelitian ini, dapat berdampak positif pada pengurangan GRK. Peningkatan pH khususnya pada tanah asam dapat meningkatkan N₂O reduktase dan oksidasi CH₄ sehingga emisinya menurun (Kunhikrishnan *et al.*, 2016). Hipotesis ini perlu diteliti lebih lanjut di lapangan.

Terakhir, meningkatkan pengembalian biomassa ke lahan. Suwarto dan Abrori (2018) menyatakan guguran daun selama pertumbuhan tanaman ubi kayu mampu mengganti unsur hara NPKCaMg yang diangkut panen umbi sebesar 15.7 ton ha⁻¹; pada tingkat produksi yang lebih tinggi membutuhkan tambahan unsur hara dari luar. Menurut Rahajoe *et al.* (2016), daun ubi kayu mengandung N 5.13% sedangkan batang 2.23%; laju dekomposisi per tahun batang dan daun masing-masing adalah 2.2 dan 5.6 ton per hektar yang mana laju dekomposisi daun lebih tinggi dibandingkan tanaman kacang panjang, kacang tanah, dan kacang buncis.

Perlu dicatat bahwa penelitian ini menggunakan pendekatan Tier 1 yang sangat general. Perlu kajian lebih lanjut menggunakan pendekatan Tier 2 dan Tier 3 untuk mendekati kondisi emisi GRK yang sesungguhnya.

KESIMPULAN

Kegiatan budidaya ubi kayu mengemisikan karbon sebesar 6,455.5 kg CO₂-eq ha⁻¹ dengan jejak langsung sebesar 4,532.3 kg CO₂-eq ha⁻¹ dan tidak langsung sebesar 1,923.2 kg CO₂-eq ha⁻¹. Input NPK dan pupuk kandang menyumbang emisi langsung terbesar yakni berturut-turut 36.99% dan 54.96%. Produksi umbi melepaskan karbon rata-rata 145.49 g CO₂-eq kg⁻¹ umbi. Tetapi kegiatan budidaya menskuestrasi karbon lebih besar dari emisinya yakni sebesar 51,032.4 kg CO₂-eq ha⁻¹, sehingga budidaya mengurangi emisi GRK sebesar 44,577.0 kg CO₂-eq ha⁻¹. Dengan kata lain, budidaya memiliki jejak karbon adalah negatif. Namun demikian, perlu ada kajian lebih lanjut menggunakan skenario Tier 2 atau Tier 3 untuk menghitung emisi secara presisi dan spesifik lokasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Alghifari, A.F., E. Santosa, A.D. Susila. 2023. Growth and production of beneng taro genotypes (*Xanthosoma undipes* K. Koch) on different soil organic carbon. J. Agron. Indonesia (Indonesian J. Agron.). 51(1):17-6. <https://doi.org/10.24831/ija.v51i1.44975>

- Amao, P.A., S.O. Osunsanya, A.M. Afolabi. 2018. Yield evaluation and assessment of growth of five different varieties of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam). *J. Agric. Ecol. Res. Internat.* 15(1):1-8. <https://doi.org/10.9734/JAERI/2018/40744>
- Arjuna, R.T., E. Santosa. 2018. Asesmen carbon footprint pada produksi minyak kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) di Kebun Sei Lukut, Kabupaten Siak, Riau. *Bul. Agrohorti* 6(2):287-295. <https://doi.org/10.29244/agrob.v6i2.18946>
- Audsley, E., K. Stacey, D.J. Parson, A.G. Williams. 2009. Estimation of the greenhouse gas emissions from agricultural pesticide manufacture and use. Technical Report. Cranfield University, Cranfield, UK. DOI: 10.13140/RG.2.1.5095.3122
- Baba, B., N.R. Sennang, E. Syam'un. 2021. Pertumbuhan dan produksi padi yang diaplikasi pupuk organik dan pupuk hayati. *J. Agrivigor* 12(2):39-47.
- Bendouma, S., T. Serradj, H. Vapur. 2020. A case study of the life cycle impact of limestone quarrying on the environment. *Internat. J. Global Warming* 22(4):432-447. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2020.111518>
- BPS [Badan Pusat Statistik]. 2023. Hasil Pencacahan Lengkap Sensus Pertanian 2023 - Tahap I. Berita Resmi Statistik. No. 86/12/Th. XXVI, 4 Desember 2023
- Brata, A.K., A. Ismayana, M. Yanib. 2018. Life cycle assessment of gasoline and gasoil on production process in hydro skimming complex-hydrocracking complex refinery field. *J. Pengel. Sumberdaya Alam Ling.* 8(3):406-413. <https://doi.org/10.29244/jpsl.8.3.406-413>
- Cornish, C.M., J.N. Sweetman. 2023. A perspective on how glyphosate and 2,4-D in wetlands may impact climate change. *Front. Environ. Sci.* 11:1282821. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1282821>
- Davis, J., C. Haglund. 1999. Life cycle inventory (LCI) of fertiliser production: Fertiliser products used in Sweden and Western Europe. SIK-Report No. 654. [Thesis]. Chalmers University of Technology. Swedia.
- Dulbari, D., E. Santosa, Y. Koesmaryono, E. Sulistyono, A. Wahyudi, H. Agust, D. Guntoro. 2021. Local adaptation to extreme weather and it's implication on sustainable rice production in Lampung, Indonesia. *Agrivita J. Agric. Sci.* 43:125-136. <https://doi.org/10.17503/agrivita.v43i1.2338>
- Fawzy, S., A.I. Osman, J. Doran, D.W. Rooney. 2020. Strategies for mitigation of climate change: A review. *Environ. Chem. Lett.* 18:2069-2094. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w>
- Hedlund, J., H. Carlsen, S. Croft, C. West, Ö. Bodin, E. Stokeld, J. Jägermeyr, C. Müller. 2022. Impacts of climate change on global food trade networks. *Environ. Res. Lett.* 17(12):124040. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aca68b>
- Herlina, E., F. Nuraeni. 2014. Development of functional food product based on cassava (*Manihot esculenta*) in supporting food resistance. *J. Sains Dasar* 3(2):142-148.
- Kania, N. 2015. Carbon footprint analysis meat production in slaughterhouse (Case study: Slaughterhouse PT Elders Indonesia). Tersedia pada <https://pustaka.unpad.ac.id/wp-content/uploads/2015/10/Microsoft-Word-ARTIKEL.pdf>. [18 Februari 2024].
- Kementan [Kementerian Pertanian]. 2020. Outlook Ubikayu. Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian, Kementerian Pertanian. Jakarta.
- KLH [Kementerian Lingkungan Hidup]. 2012. Pedoman penyelenggaraan inventarisasi gas rumah kaca nasional. Buku II Vol 3: Metodologi penghitungan tingkat emisi dan penyerapan gas rumah kaca pertanian, kehutanan dan penggunaan lahan lainnya. Kementerian Lingkungan Hidup RI, Jakarta.
- Kunhikrishnan, A., R. Thangarajan, N.S. Bolan, Y. Xu, S. Mandal, D.B. Gleeson, B. Seshadri, M. Zaman, L. Barton, C. Tang, J. Luo, R. Dalal, W. Ding, M.B. Kirkham, R. Naidu. 2016. Functional relationships of soil acidification, liming, and greenhouse gas flux. *Adv. Agron.* 139:1-71. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.05.001>
- Lansche, J., S. Awiszus, S. Latif, J. Müller. 2020. Potential of biogas production from processing residues to reduce environmental impacts from cassava starch and crisp production—A case study from Malaysia. *Appl. Sci.* 10:2975. <https://doi.org/10.3390/app10082975>
- Lillywhite, R., D. Chandler, W. Grant, K. Lewis, C. Firth, U. Schmutz, D. Halpin. 2007. Environmental footprint and sustainability of horticulture (including potatoes) – A comparison with other agricultural sectors. Final report of project WQ0101, Defra, London. http://randd.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=WQ0101_6747_FRP.doc [19 Februari 2024]

- Mattila, T.J., E. Hagelberg, S. Soderlund, J. Joon. 2022. How farmers approach soil carbon sequestration? Lessons learned from 105 carbon-farming plans. *Soil Tillage Res.* 215:105204.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105204>
- Moremi, O.O., M. Horsfall-Jnr, K. Okorosaye-Orubite. 2016. Psicochemical characteristics of cassava tuber and cassava meals from Eleme local government area of River State, Nigeria. *Res. J. Chem. Sci.* 6(3):32-37.
- Ntelok, Z.R.E. 2017. Cassava peel waste (*Manihot esculenta*): An alternative healthy snack. *J. Inov. Pendid. Dasar* 1(1):115-121.
- Petrokimia Gresik. 2024. Pupuk NPK Phonska Plus. PT Petrokimia Gresik. <https://petrokimia-gresik.com/product/phonska-plus>. [17 Februari 2024]
- Purwono, Dulbari, E. Santosa. 2021. Dampak cuaca ekstrim terhadap kehampaan genotipe padi: Pengantar manajemen produksi berbasis iklim. *J. Agron. Indonesia* 49(2):136-146.
<https://doi.org/10.24831/jai.v49i2.35933>
- Rahajoe, J.S., L. Alhamd, S. Sundari, D. Handayani. 2016. Carbon stock and the biomasa of some agriculture comodities in the Bodogol Gunung Gede Pangrango National Park - West Java. *J. Biol. Indonesia* 12(2):203-210.
- Rivera, J.E., J. Chara. 2021. CH₄ and N₂O emissions from cattle excreta: A review of main drivers and mitigation strategies in grazing systems. *Front. Sustain. Food Syst.* 5:657936.
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.657936>
- Santanoo, S., K. Vongcharoen, P. Banterng, N. Vorasoot, S. Jogloy, S. Roytrakul, P. Theerakulpisut. 2022. Physiological and proteomic responses of cassava to short-term extreme cool and hot temperature. *Plants* 11(17):2307.
<https://doi.org/10.3390/plants11172307>
- Suprabawati, A., N.W. Holiyah, Jasmansyah. 2018. Kulit singkong (*Manihot esculenta* Crantz) sebagai karbon aktif dengan berbagai langkah pembuatan untuk adsorpsi ion logam timbal (Pb²⁺) dalam air. *J. Kartika Kimia* 1(1):21-28.
<https://doi.org/10.26874/jkk.v1i1.8>
- Suryadi, A., Suwardi, Darmawan. 2012. Kontribusi emisi gas CH₄ dan N₂O dari lahan tanaman jagung, kacang tanah dan singkong di Bogor. *Dalam* D.P. Ariyanto, W.S. Dewi, Suwardi. Prosiding Seminar dan Kongres Nasional X Himpunan Ilmu Tanah Indonesia (HITI). Surakarta, 6-8 Desember 2011. Jurusan Ilmu Tanah Fakultas Pertanian UNS.
- Suryana, D., H. Miftah, Yodfiatfinda. 2016. Curahan tenaga kerja dan pendapatan usahatani ubikayu (*Manihot esculenta* Crantz) terhadap pendapatan rumah tangga petani. *J. AgribiSains* 2(1):20-25.
<https://doi.org/10.30997/jagi.v2i1.765>
- Suwarto, A.F. Abrori. 2018. Kontribusi biomassa dari daun gugur dalam penyediaan hara pada pertanaman ubi kayu. *Agrovigor* 11(1):39-46.
- Suwarto, E.S. Parlindungan. 2020. Potency legume cover crops as a source of organic material in situ and its effect on the growth and tuber yield of cassava (*Manihot esculenta*). *Plant Arch.* 20 (Special):1484-1490.
- Suwarto, R. Diaguna, E. Santosa, A. Hartono, G. Pramuhadi. 2023. Analysis of NPK nutrient content and the nutrient balance of cassava for sustainable high productivity in Ultisols soil. *Austr. J. Crop Sci.* 17(2):206-214.
<https://doi.org/10.21475/ajcs.23.17.02.p3796>
- Verma, R., N. Chauhan, B.R. Singh, Samsheer, S. Chandra, R.S. Sengar. 2022. Cassava processing and its food application: A review. *Pharma Innov. J.* SP-11(5):415-422.
- Yulianingsih, E., A. Pramono. 2019. Greenhouse gas emissions from manure management and biogas. Pp 7-13. *Dalam* Prosiding Konser Karya Ilmiah Nasional 2019. Selasa 2 Juli 2019. Fakultas Pertanian dan Bisnis UKSW, Salatiga.
- Yunianti, I.E., R. Kartikawati. 2019. Peranan pupuk kandang dalam mitigasi emisi gas rumah kaca: Studi kasus di perkebunan kopi rakyat Provinsi Bali. *Warta Pusat Penel. Kopi Kakao Indonesia* 31(1):9-12.