

Penggunaan *clinoptilolite zeolite* dalam mengurangkan pelepasan gas rumah kaca dan meningkatkan produktiviti tanaman nanas di tanah gambut

(Application of clinoptilolite zeolite in mitigating greenhouse gas emission and improving pineapple productivity on peat soils)

Liza Nuriati Lim Kim Choo, Jeffrey Lim Seng Heng, Nurul Ain Abu Bakar, Mohd Syauqi Nazmi dan Norziana Zin Zawawi

Pengenalan

Kata kunci: gas rumah kaca, mineral zeolite, nanas, perapi tanah, tanah organik

Walaupun kemajuan dalam teknologi agronomi dan pengeluaran tanaman membolehkan kebanyakan tanaman diusahakan di tanah gambut, pembebasan gas rumah kaca (GHG) kekal sebagai masalah utama dalam pengurusan tanah gambut secara lestari untuk pertanian. Aktiviti pertanian di tanah gambut membebaskan gas karbon dioksida (CO_2) dan nitrus oksida (N_2O) ke atmosfera secara berterusan. Ini disebabkan oleh proses penguraian bahan organik oleh mikroorganisma di lapisan aerobik tanah apabila tanah gambut disalurkan. Tanah gambut tropika berpotensi menjadi punca pembebasan GHG kerana mengandungi kandungan rizab karbon (44 sehingga 55 Gt C) dan nitrogen (4 Gt N) yang tinggi. Tanah gambut tropika yang disalurkan dianggarkan membebaskan GHG kira-kira 1 – 3% daripada rizab karbon global. Tambahan lagi, aktiviti pembajaan di tanah gambut turut menyumbang kepada pembebasan gas CO_2 dan N_2O kerana baja merupakan unsur makanan bagi mikroorganisma tanah untuk proses metabolisme. Selain pembebasan GHG, lazimnya tanah gambut mempunyai kesuburan tanah yang rendah iaitu keadaan tanah yang berasid (julat pH 2.5 – 4) dan kandungan makronutrien yang rendah terutamanya nitrogen tak organik (ammonium: $\text{NH}_4^+\text{-N}$ dan nitrat: $\text{NO}_3^-\text{-N}$), fosforus tersedia (PO_4^{3-}) dan kalium tertukar ganti (K^+).

Kira-kira 90% daripada penanaman nanas di Malaysia diusahakan di tanah gambut dengan jumlah keluasan sebanyak 16,024 hektar pada tahun 2023. Penanaman nanas di tanah gambut dilaporkan membebaskan kira-kira $179.6 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ tahun}^{-1}$ dan $15.7 \text{ t N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ tahun}^{-1}$. Pembebasan GHG dijangka meningkat berikutan pembukaan kawasan pertanian untuk perladangan nanas berskala besar (sasaran 20,000 hektar menjelang 2030) khususnya bagi varieti nanas MD2 dan *Sarawak Gold* di Sarawak. Justeru, MARDI telah menjalankan kajian untuk membangunkan kaedah mitigasi GHG di kawasan pertanian tanah gambut melalui pendekatan mineral semula jadi *clinoptilolite* yang bukan sahaja mampu mengurangkan pembebasan CO_2 dan N_2O , tetapi juga memberikan pulangan hasil yang optimum kepada para petani, terutamanya untuk tanaman nanas. Artikel ini membentang penemuan mengenai keberkesanan bahan mitigasi *clinoptilolite zeolite* untuk meningkatkan kelestarian dan produktiviti tanah, prestasi

pengeluaran hasil nanas MD2, anggaran kos pengeluaran *clinoptilolite* dan potensi pasaran kredit karbon di tanah gambut.

Bahan mitigasi *clinoptilolite zeolite*

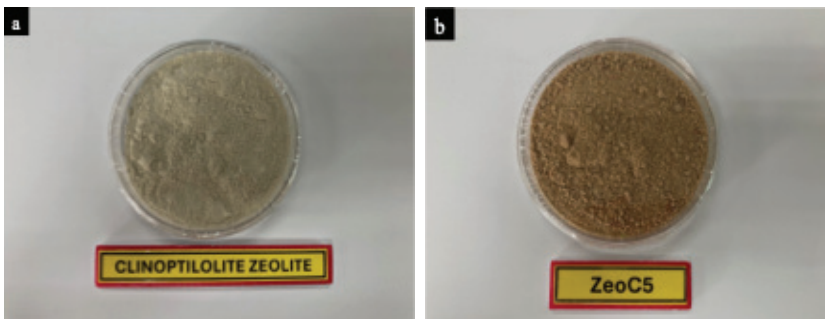
Clinoptilolite merupakan sejenis mineral *zeolite* semula jadi yang digunakan secara meluas dalam bidang pertanian sebagai perapi tanah untuk meningkatkan kesuburan tanah bermasalah merangkumi tanah liat, tanah berpasir dan tanah berasid. Mineral *clinoptilolite* ini merupakan batuan sedimen gunung berapi yang terbentuk apabila abu gunung berapi bertindak balas dengan air beralkali dalam pelbagai persekitaran geologi selama beribu-ribu tahun. Ia boleh dijumpai di Asia, Afrika, Eropah, Amerika Selatan dan Amerika Utara. Unsur utama *clinoptilolite* terdiri daripada silikon oksida dan aluminium oksida termasuk komposisi lain seperti natrium, magnesium, kalium, kalsium dan ferum oksida serta karbon (Jadual 1). *Clinoptilolite* bersifat alkali (julat pH antara 7 – 8) dan mempunyai nilai kapasiti pertukaran kation yang tinggi (KPK) ($103.5 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$). Mineral *clinoptilolite* adalah porous dan mempunyai rongga terbuka yang saling bersambung membentuk saluran yang panjang dan lebar dalam pelbagai saiz yang menyerupai struktur sarang lebah. Ciri-ciri ini membenarkan *clinoptilolite* menyerap dan menyahjerap nutrien serta molekul gas dan menukar ion dalam kekisi strukturnya, sekali gus menjadikan *clinoptilolite* sesuai digunakan sebagai bahan mitigasi GHG dan perapi tanah untuk meningkatkan produktiviti tanah gambut serta tanaman.

Jadual 1. Sifat fizikokimia bahan mitigasi *clinoptilolite zeolite*

Parameter	Nilai
pH	8.80
Kapasiti pertukaran kation ($\text{cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$)	103.50
Luas permukaan ($\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$)	8.69
Jumlah isi padu liang ($\text{cm}^3 \text{ g}^{-1}$)	6.42×10^{-3}
Purata diameter liang (nm)	2.96
Komposisi kimia	Berat (%)
Silikon dioksida (SiO_2)	79.81
Aluminium oksida (Al_2O_3)	9.23
Natrium oksida (Na_2O)	0.49
Magnesium oksida (MgO)	0.14
Kalium oksida (K_2O)	6.19
Kalsium oksida (CaO)	0.14
Ferum oksida (Fe_2O_3)	0.61
Karbon	3.12

Nota: Mineral semula jadi *clinoptilolite zeolite* diperoleh dari Jawa Barat, Indonesia yang digunakan dalam kajian MARDI di Saratok, Sarawak sepanjang tahun 2021 sehingga 2024

Berdasarkan kepada kajian yang dijalankan oleh MARDI dalam Rancangan Malaysia Kedua Belas (RMK-12), formulasi bahan mitigasi yang dibangunkan terdiri daripada campuran mineral tak organik zeolite daripada spesies *clinoptilolite* bersama baja sebatian NPK 30:1:32 untuk tanaman nanas di tanah gambut (*Gambar 1*). Formulasi bahan mitigasi ini mempunyai dua fungsi serentak iaitu (a) mitigasi tiga jenis gas GHG iaitu CO_2 , N_2O dan metana (CH_4) dan (b) menyerap makronutrien tanah utama iaitu ammonium-N tertukar ganti, nitrat-N tersedia, fosforus tersedia dan kalium tertukar ganti. Kadar aplikasi *clinoptilolite zeolite* yang disyorkan bagi tanaman nanas di tanah gambut adalah sebanyak 0.95 t/ha dan penggunaan zeolite ini mengurangkan pembebasan gas CO_2 , N_2O dan CH_4 , masing-masing sebanyak 17.6 – 69.2%, 19.2 – 33.9% dan 20.1 – 35.5%. Bahan mitigasi *clinoptilolite* ini turut menyumbang kepada peningkatan hasil tanaman nanas MD2 antara 32 – 35% berbanding dengan amalan agronomi konvensional menggunakan baja sebatian NPK sahaja di tanah gambut. Nilai pengurangan GHG dan peningkatan hasil tanaman ini adalah berdasarkan hasil keputusan kajian lapangan penanaman MD2 berskala kecil (0.25 hektar – dua musim penanaman) dan skala besar (1 hektar – satu musim penanaman) di MARDI Saratok, Sarawak.



Gambar 1. (a) Mineral semula jadi zeolite daripada spesies clinoptilolite dari Jawa Barat yang digunakan dalam kajian dan (b) prototaip bahan mitigasi clinoptilolite zeolite yang dibangunkan MARDI dalam kajian RMK-12

Teknik penggunaan bahan mitigasi *clinoptilolite zeolite* bagi tanaman nanas di tanah gambut

Bahan mitigasi *clinoptilolite zeolite* yang dibangunkan ini mudah diaplikasikan di tanah gambut. Bagi tanaman nanas MD2, *clinoptilolite* ditaburkan secara manual di atas tanah gambut mengelilingi (*circular placement*) pokok nanas kira-kira 5 cm daripada batang pokok (*Gambar 2*). *Clinoptilolite zeolite* kekal lama dalam ekosistem tanah gambut kerana mineral ini tidak terurai atau terdegradasi walaupun pada suhu tinggi (800 °C). Mineral zeolite disyorkan diaplikasikan sebanyak tiga kali bagi tanaman nanas iaitu pada peringkat umur tiga, enam dan sembilan bulan selepas penanaman. Kadar aplikasi *clinoptilolite* pada kadar 0.95 t/ha yang disyorkan adalah berdasarkan kepada keperluan nutrien tanaman nanas di tanah gambut. Namun begitu, bagi memastikan keberkesanan *clinoptilolite zeolite* sebagai

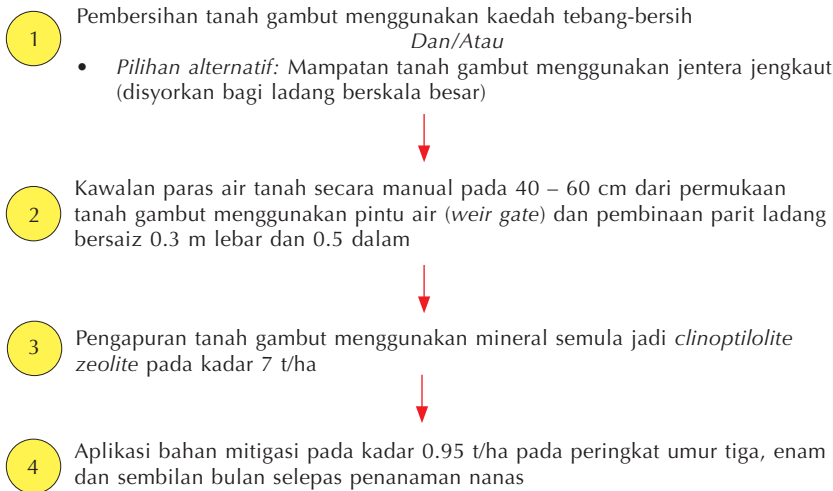
bahan mitigasi, beberapa langkah penyediaan tanah gambut perlu dilaksanakan oleh petani sebelum penanaman nanas seperti yang ditunjukkan pada *Carta alir 1* dan *Gambar 3*. Langkah-langkah tersebut adalah (a) Pembersihan tanah gambut menggunakan kaedah tebang-bersih (*clean – clear*) dan/atau mampatan tanah gambut menggunakan jentera jengkaut (disyorkan bagi ladang nanas berskala besar); (b) Kawalan aras air tanah gambut secara manual pada 40 – 60 cm dari permukaan tanah menggunakan pintu air (*weir gate*) atau melalui pembinaan parit kecil dalam ladang (bersaiz 0.3 m lebar × 0.5 m dalam dan (c) Pengapuran tanah gambut menggunakan mineral semula jadi *clinoptilolite zeolite* pada kadar 7 t/ha untuk meningkatkan sekurang-kurangnya 1 unit pH tanah. Pembersihan tebang-bersih adalah digalakkan bagi memastikan kawasan tanah bebas daripada kayu dan ranting (mengelakkan perosak anai-anai) dan mengurangkan insiden pembakaran gambut dan jerebu. Manakala, pengawalan aras air pada 40 – 60 cm ini adalah sesuai untuk pertumbuhan optimum semua jenis tanaman di tanah gambut bagi memastikan pemendapan tanah yang minimum.



Gambar 2. Aplikasi clinoptilolite zeolite di tanah gambut bagi tanaman nanas secara 'circular placement' iaitu 5 cm daripada batang pokok pada peringkat umur 3, 6 dan 9 bulan selepas penanaman

Kesan bahan mitigasi *clinoptilolite zeolite* terhadap pembebasan gas rumah kaca dan impak persekitaran

Hasil kajian lapangan yang dilaksanakan sebanyak tiga kitaran penanaman nanas MD2 di MARDI Saratok dari 2023 – 2024 menunjukkan bahawa aplikasi bahan mitigasi *clinoptilolite zeolite* pada peringkat umur tiga, enam dan sembilan bulan selepas penanaman secara konsisten berupaya mengurangkan gas CO₂, N₂O dan CH₄ selepas aktiviti pembajaan dengan purata kadar pengurangan masing-masing sebanyak 34.4 kg CO₂ ha⁻¹ tahun⁻¹, 0.66 kg N₂O ha⁻¹ tahun⁻¹ dan 0.003 kg CH₄ ha⁻¹ tahun⁻¹ (*Rajah 1*). Keberkesanan bahan mitigasi *clinoptilolite zeolite* ini boleh dikaitkan dengan ciri mineralnya yang unik yang terdiri daripada rongga terbuka dan nilai KPK yang tinggi (103.5 cmol₍₊₎ kg⁻¹) (*Jadual 1*). Rongga terbuka

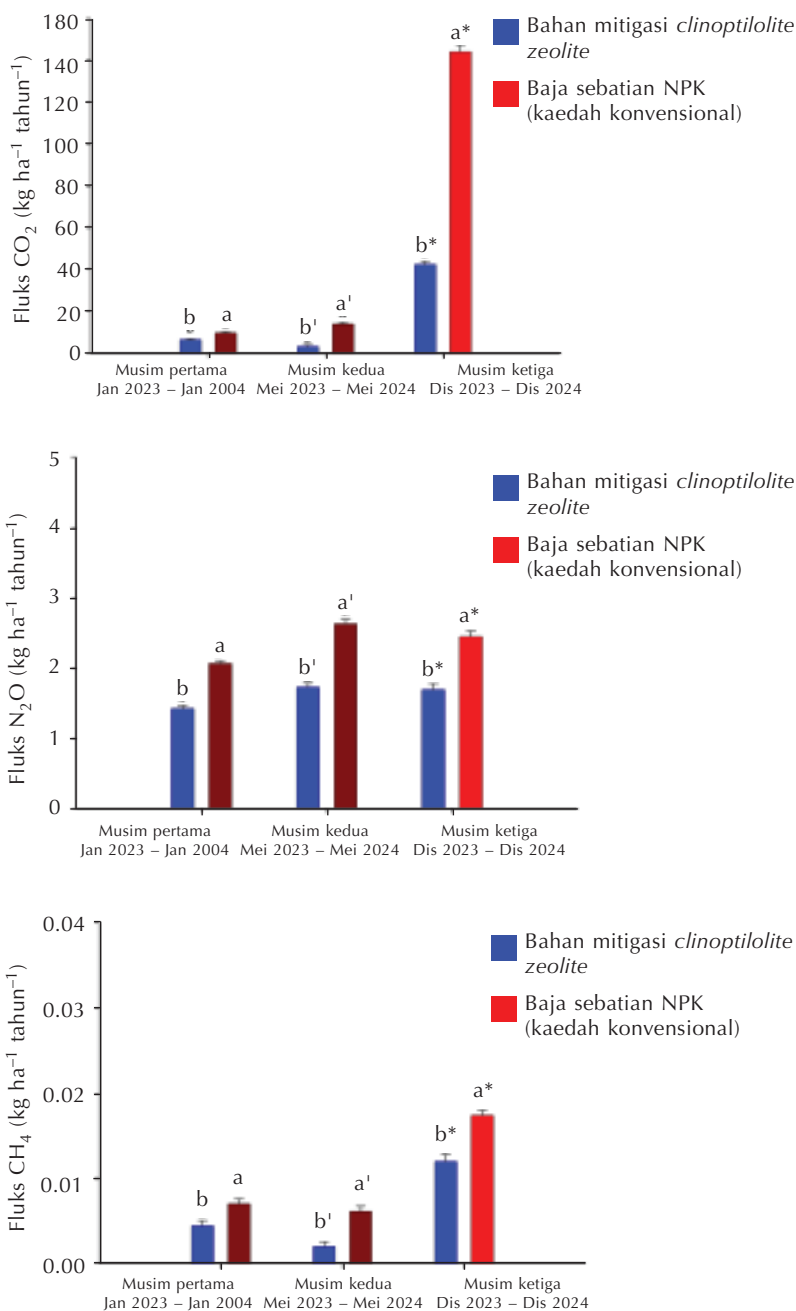


Carta alir 1. Proses penyediaan tanah di kawasan pertanian dengan penggunaan bahan mitigasi *clinoptilolite zeolite* bagi tanaman nanas di tanah gambut



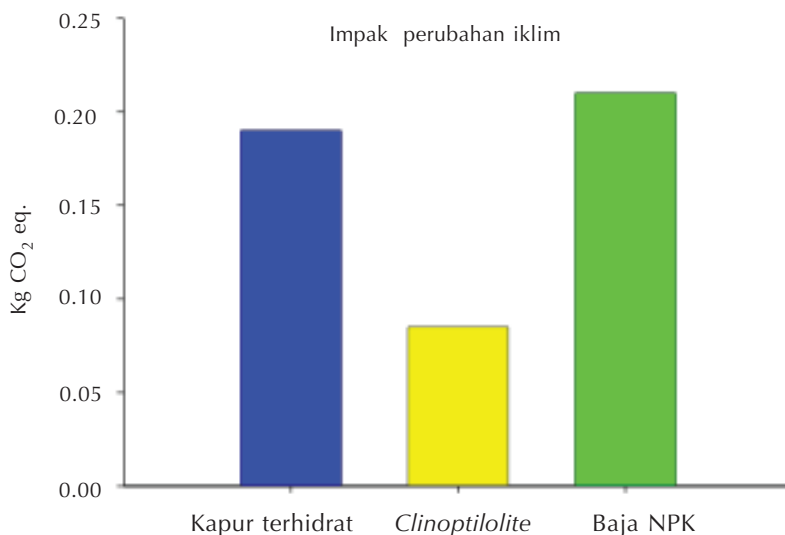
Gambar 3. (a) Pembersihan tanah gambut menggunakan kaedah tebang-bersih dan pembinaan sistem saliran dan (b) Aktiviti pengapuran menggunakan mineral semula jadi *clinoptilolite zeolite* di tanah gambut

clinoptilolite ini hanya membenarkan molekul bersaiz kecil (< 3 nm) untuk dijerap dalam kekisi strukturnya melalui mekanisme resapan. Bahan mitigasi *clinoptilolite* berupaya menyerap molekul gas CO_2 dan CH_4 kerana saiz molekul gasnya yang kecil iaitu 0.33 nm untuk CO_2 manakala gas CH_4 bersaiz 0.68 nm. Tambahan lagi, bahan mitigasi *clinoptilolite* mempunyai afiniti yang tinggi untuk menyerap nutrien ammonium (NH_4^+) melalui mekanisme pertukaran ion. Penjerapan ion ammonium ini merencatkan proses nitrifikasi dan sekali gus mengurangkan pelepasan gas N_2O daripada tanah gambut.



Rajah 1. Purata pembebasan gas (a) karbon dioksida, (b) nitrus oksida dan (c) metana selepas aktiviti pembajaan sepanjang pertumbuhan nanas MD2 di tanah gambut dengan penggunaan bahan mitigasi *clinoptilolite* zeolite berbanding dengan baja sebatian NPK pada peringkat umur 3, 6 dan 9 bulan selepas penanaman

Selain itu, penggunaan *clinoptilolite zeolite* sebagai bahan mitigasi mempunyai impak perubahan iklim yang jauh lebih rendah (0.085 kg CO₂ eq.) berbanding dengan amalan agronomi konvensional menggunakan baja sebatian NPK (0.21 kg CO₂ eq.) dan aktiviti pengapuran menggunakan kapur terhidrat (0.19 kg CO₂ eq.) (Rajah 2). Ini menunjukkan aplikasi bahan mitigasi *clinoptilolite zeolite* di kawasan pertanian gambut adalah lebih mampan dalam jangka masa panjang berbanding dengan penggunaan baja sebatian NPK dan bahan pengapur (kapur terhidrat) yang sedia ada di pasaran.



Rajah 2. Perbandingan impak persekitaran penggunaan bahan mitigasi *clinoptilolite zeolite*, baja sebatian NPK dan kapur terhidrat terhadap perubahan iklim di kawasan pertanian gambut untuk tanaman nanas MD2 berdasarkan analisis kitaran hayat (LCA)

Peningkatan kesuburan tanah gambut dan pencapaian hasil nanas MD2 dengan penggunaan *clinoptilolite zeolite*

Sepanjang tiga musim penanaman nanas MD2 yang dijalankan dari Januari 2023 hingga Disember 2024 di MARDI Saratok, Sarawak, kandungan makronutrien utama tanah gambut meningkat secara konsisten terutamanya ammonium-N, nitrat-N, fosforus tersedia dan kalium tertukar ganti (Jadual 2) dengan penggunaan *clinoptilolite zeolite* pada kadar 0.95 t/ha berbanding dengan amalan pembajaan konvensional menggunakan baja sebatian NPK 30:1:32. Tambahan lagi, disebabkan sifat mineral *zeolite* yang beralkali ini, *clinoptilolite* mampu mengurangkan keasidan tanah gambut yang bertindak sebagai penimbal pH dengan menghalang sebarang perubahan pH tanah gambut. Pemerhatian di lapangan sepanjang tiga musim penanaman menunjukkan potensi *clinoptilolite zeolite* sebagai bahan pengapuran alternatif di tanah gambut berbanding dengan kapur terhidrat. Purata berat buah (kg/pokok) dan purata hasil buah (t/ha) turut meningkat

secara konsisten untuk tiga musim penanaman dengan aplikasi *clinoptilolite zeolite* berbanding dengan penggunaan baja sebatian NPK (*Jadual 3*). Kutipan hasil nanas dilaksanakan pada peringkat umur 12 bulan selepas penanaman berdasarkan indeks kematangan 1 untuk tanaman nanas MD2 di tanah gambut. Ciri-ciri *clinoptilolite zeolite* dengan rongga terbuka dan nilai KPK tinggi ($103.5 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$) menunjukkan keupayaan mineral semula jadi ini untuk menyerap nutrien ammonium-N, nitrat-N, fosforus tersedia dan kalium tertukar ganti tanah gambut melalui mekanisme penjerapan dan pertukaran ion bagi pengambilan dan penggunaan oleh tanaman nanas secara efisien sepanjang pertumbuhan sehingga peringkat penuaian hasil. Pembajaan tanaman nanas dengan aplikasi *clinoptilolite zeolite* pada peringkat umur tiga, enam dan sembilan bulan ini menawarkan strategi pengurusan agronomi alternatif yang mampu membebaskan GHG secara minimum tanpa mengurangkan produktiviti tanah dan hasil tanaman nanas di tanah gambut.

Jadual 2. Perbandingan kandungan makronutrien tanah gambut antara aplikasi *clinoptilolite zeolite* dan baja sebatian NPK

Rawatan	pH	Kandungan makronutrien (mg kg^{-1})			
		$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	PO_4^{3-}	K^+
<i>Clinoptilolite zeolite</i>	4.62	324.75	176.82	66.51	44.48
Baja sebatian NPK 30:1:32 (agronomi konvensional)	3.58	262.13	95.33	47.72	22.01

Nota: Purata kandungan makronutrien tanah gambut bagi tiga kitaran penanaman nanas (kedalaman tanah 0 – 20 cm dan 20 – 40 cm)

Jadual 3. Perbandingan hasil tanaman nanas MD2 di tanah gambut antara aplikasi *clinoptilolite zeolite* dan baja sebatian NPK

	Musim pertama (Jan 2023 – Jan. 2024)	Musim kedua (Mei 2023 – Mei 2024)	Musim ketiga (Dis. 2023 – Dis. 2024)
<i>Clinoptilolite zeolite</i>			
Purata hasil buah (kg/pokok)	2.59	2.35	2.53
Purata hasil buah (t/ha)	98.42	89.30	96.14
Baja sebatian NPK (agronomi konvensional)			
Purata hasil buah (kg/pokok)	1.76	1.55	1.50
Purata hasil buah (t/ha)	66.88	58.90	57.00

Anggaran kos pengeluaran dan pulangan serta potensi pasaran kredit karbon

Kos pengeluaran bahan mitigasi *clinoptilolite zeolite* adalah lebih rendah berbanding dengan kaedah pembajaan konvensional menggunakan baja sebatian NPK 30:1:32 di tanah gambut (*Jadual 4*). Ini adalah berdasarkan kepadatan tanaman sebanyak 38,000 pokok/ha bagi penanaman nanas di Sarawak. Penggunaan *zeolite* dengan kos yang lebih rendah boleh dikaitkan dengan kos penggunaan baja sebatian NPK 30:1:32 yang tinggi (RM1,500/t) berbanding dengan kos *clinoptilolite zeolite* pada RM900/t. Tambahan lagi, keuntungan bersih dengan aplikasi bahan mitigasi *clinoptilolite* juga adalah lebih tinggi berbanding dengan penggunaan baja sebatian NPK. Ini disebabkan oleh hasil purata berat buah nanas yang jauh lebih tinggi dengan penggunaan *clinoptilolite* (julat berat buah: 2.35 – 2.59 kg/pokok) berbanding dengan kaedah pembajaan konvensional menggunakan baja sebatian NPK (julat berat buah: 1.50 – 1.76 kg/pokok). Selain itu, nisbah faedah dan kos (BCR) yang lebih tinggi dengan aplikasi *clinoptilolite* (BCR: 3.56) berbanding dengan baja sebatian NPK (BCR: 2.39) menunjukkan penggunaan bahan mitigasi *zeolite* ini memberi faedah positif dan menguntungkan dalam jangka masa panjang kepada petani. Berdasarkan kepada penilaian kelestarian alam sekitar bagi bahan mitigasi *clinoptilolite zeolite*, mineral ini mempunyai potensi pasaran kredit karbon sebanyak RM266.52/ha dengan kadar pengurangan GHG pada 5.33 t/ha (*Jadual 5*). Dengan mengambil kira jumlah keluasan penanaman nanas di Sarawak yang dianggarkan seluas 2,046.2 hektar pada tahun 2021, potensi penjualan kredit karbon tanaman nanas di Sarawak mencecah sejumlah RM545,556.31. Ini menunjukkan penggunaan bahan mitigasi *clinoptilolite zeolite* mampu memulihara kawasan pertanian gambut secara mampan di samping berupaya meningkatkan produktiviti tanaman nanas.

Jadual 4. Perbandingan indikator ekonomi penanaman nanas MD2 di tanah gambut menggunakan bahan mitigasi *clinoptilolite zeolite* dan baja sebatian NPK

Indikator ekonomi	Bahan mitigasi <i>clinoptilolite zeolite</i>	Baja sebatian NPK 30:1:32 (agronomi konvensional)
Hasil jualan (RM/ha)	531,468	361,152
Jumlah kos pengeluaran (RM/ha)	149,454.11	151,092.41
Keuntungan bersih (RM/ha)	382,013.89	210,059.59
Kos pengeluaran (RM/kg)	1.69	2.51
Keuntungan bersih (RM/kg)	4.31	3.49
Nisbah faedah dan kos (BCR)	3.56	2.39

Nota: Anggaran kos pengeluaran dan pulangan adalah berdasarkan kepada penanaman nanas MD2 di Sarawak

Jadual 5. Potensi kredit karbon di pasaran bagi bahan mitigasi *clinoptilolite zeolite* untuk penanaman nanas MD2 di tanah gambut

Senario	Unit	Pembebasan GHG (t/ha)	Kredit karbon (pengurangan pembebasan: t/ha)	*Harga kredit karbon (RM/t)	Potensi penjualan kredit karbon bagi tanaman nanas di Sarawak (RM)
Aplikasi <i>clinoptilolite zeolite</i>	kg CO ₂ eq.	7.41	5.33	266.52	545, 556.31
Baja sebatian NPK (kaedah konvensional)	kg CO ₂ eq.	12.75			

Nota: *Harga berdasarkan perdagangan karbon di Bursa Malaysia (projek karbon kredit pertama di Malaysia) dan jumlah keluasan tanaman nanas di Sarawak ialah 2,046.2 hektar

Kesimpulan

Penggunaan bahan mitigasi *clinoptilolite zeolite* dalam regim pembajaan nanas (aplikasi 0.95 t/ha pada peringkat umur tanaman nanas tiga, enam dan sembilan bulan) menawarkan kaedah agronomi alternatif bukan sahaja untuk memulihara kawasan pertanian tanah gambut secara lestari, tetapi juga untuk meningkatkan produktiviti tanaman nanas. *Clinoptilolite* ialah *zeolite* beralkali dengan ciri-ciri unik termasuk struktur berongga dan kapasiti pertukaran ion tinggi, yang membolehkannya mengurangkan pelepasan GHG serta bertindak sebagai perapi tanah tanpa menjejaskan hasil nanas di tanah gambut.

Penghargaan

Penulis ingin merakamkan setinggi penghargaan kepada staf Pusat Penyelidikan Sains Tanah, Air dan Baja serta pengurusan ladang di MARDI Saratok yang telah membantu dari segi penyediaan kawasan dan pengurusan ladang. Maklumat yang ditulis adalah hasil penyelidikan Projek Pembangunan RMK-12 bawah peruntukan P-RS505 dan P-RP515.

Bibliografi

- Ahmed, O. H., & Choo, L. N. L. K. (2015). Greenhouse gas emission and carbon leaching in pineapple cultivation on tropical peat soil. Selangor: Universiti Putra Malaysia, m.s. 157.
- Choo, L. N. L. K., Ahmed, O. H., Majid, N. M. N., & Aziz, Z. F. A. (2018). Pineapple residue ash reduces carbon dioxide and nitrous oxide emissions in pineapple cultivation on tropical peat soils at Saratok, Malaysia. *Sustainability*, 13, 1014.
- Evers, M. (2021). GHG emissions from management of peatland forests and plantation: Greenhouse gas emissions from peatland in relation to Malaysia's commitment under the Paris Agreement on climate change. Dalam: *International Greentech and Ecoproducts Exhibition and Conference Malaysia (IGEM 2021)*, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Hernández-Epinosa, M. A., Quiroz-Estrada, K., Petranovskii, V., Rojas, F., Portillo, R., Salgado, M. A., Marcelo, M., Efrain, R., & Felipe, C. (2018). Adsorption of N₂, N₂O and CO₂ on epistilbite natural zeolite from Jalisco, Mexico after acid treatment. *Mineral* 8, 196.

- Jakkula, V. S., & Wani, S. P. (2018). Zeolite: Potential soil amendments for improving nutrient and water use efficiency and agriculture productivity. *Scientific Reviews and Chemical Communications*, 8(1), 119.
- Jabatan Pertanian Malaysia (2021). Booklet Statistik Tanaman (Sub-Sektor Tanaman Makanan). Putrajaya, Malaysia, m.s. 118.
- Latifah, O., Ahmed, O. H., & Abdul Majid, N. M. (2017). Enhancing nitrogen availability from urea using clinoptilolite zeolite. *Geoderma*, 306, 152–159.
- Lin, R. M., & Rahman, A. A. (2010). Status and impact of pineapple technology on mineral soil. *Economic Technology Management Review*, 5, 11–19.
- Wahono, S. K., Stalin, J., Addai-Mensah, J., Skinner, W., Vinu, A., & Vasilev, K. (2020). Physico-chemical modification of natural modernite-clinoptilolite zeolites and their enhanced CO₂ adsorption capacity. *Microporous and Mesoporous Materials*, 294, 109871.
- Watmough, S., Gilber-Parkes, S., Basiliko, N., Lamit, L. J., Lilleskov, E. A., Andersen, R. et al. (2022). Variation in carbon and nitrogen concentrations among peatland categories at the global scale. *PLoS ONE* 17(11), e0275149.

Ringkasan

Kawasan pertanian tanah gambut membebaskan gas karbon dioksida (CO₂) dan nitrus oksida (N₂O) secara berterusan disebabkan oleh aktiviti pembajaan dan rizab karbon serta nitrogen tanah yang tinggi. Justeru, MARDI telah mengambil inisiatif untuk mengurangkan pembebasan gas rumah kaca (GHG) dan meningkatkan produktiviti tanaman nanas di tanah gambut melalui pembangunan bahan mitigasi tak organik yang merupakan formulasi campuran mineral *clinoptilolite zeolite* dan baja sebatian NPK. Aplikasi bahan mitigasi *clinoptilolite* pada kadar 0.95 t/ha pada peringkat umur nanas tiga, enam dan sembilan bulan berupaya mengurangkan pembebasan gas CO₂ (17.6 – 69.2%), N₂O (19.2 – 33.9%) dan metana (CH₄) (20.1 – 35.5%) secara serentak. Penggunaan *clinoptilolite zeolite* dalam regim pembajaan nanas juga berkesan mengurangkan keasidan tanah, meningkatkan kandungan ketersediaan makronutrien utama tanah dan menyumbang kepada peningkatan hasil nanas MD2 (32 – 35%) berbanding dengan amalan agronomi konvensional menggunakan baja sebatian NPK. Aplikasi *clinoptilolite zeolite* turut memberi impak perubahan iklim yang lebih rendah, menawarkan potensi penjualan karbon kredit karbon (RM266.52/ha) dan memberi faedah positif (BCR: 3.56) untuk perusahaan nanas di tanah gambut.

Summary

Drained tropical peat soils consistently release CO₂ and N₂O into the atmosphere due to fertilisation and the high carbon and nitrogen stocks in peat soils. MARDI has developed a mitigation tool via an inorganic approach formulated from clinoptilolite zeolite and compound NPK fertiliser, which effectively minimised greenhouse gas emissions in addition to improve pineapple crop productivity. The application of clinoptilolite zeolite at a rate of 0.95 t/ha for pineapple planted on peat soils effectively minimised CO₂ (17.6 – 69.2%), N₂O (19.2 – 33.9%) and CH₄ (20.1 – 35.5%) simultaneously. The use of clinoptilolite zeolite in the pineapple fertilisation regime reduced peat soil acidity, increased the availability of major soil macronutrients and increased MD2 pineapple yield (32 – 35%) on peat soils compared with conventional agronomic practices utilising compound NPK fertilisers. Also, the application of clinoptilolite zeolite has a lower climate change impact and offers potential carbon credit sales (RM266.52/ha) with positive long-term benefits (BCR: 3.56) to pineapple farmers.

Pengarang

Liza Nuriati Lim Kim Choo

Pusat Penyelidikan Agrobiodiversiti dan Persekitaran, MARDI Saratok

Kilometer 10, Jalan Roban–Kabong, 95300 Roban, Sarawak

E-mel: lizalim@mardi.gov.my

Jeffrey Lim Seng Heng dan Nurul Ain Abu Bakar

Pusat Penyelidikan Agrobiodiversiti dan Persekitaran

Ibu Pejabat MARDI, Persiaran MARDI–UPM, 43400 Serdang, Selangor

Mohd Syauqi Nazmi

Pusat Penyelidikan Sosio Ekonomi, Risikan Pasaran dan Agribisnes

Ibu Pejabat MARDI, Persiaran MARDI–UPM, 43400 Serdang, Selangor

Norziana Zin Zawawi

Pusat Penyelidikan Sains Tanah, Air dan Baja, Ibu Pejabat MARDI

Persiaran MARDI–UPM, 43400 Serdang, Selangor