



PIROLISIS TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT UNTUK MENINGKATKAN KUALITAS BIOCHAR

Melani Ganing^{a,*}, Sariwahyuni^a, Amelia Ayu Kartika^a, Idi Amin^a, Andi Asdiana Irma Sari Yusuf^a, Masnawati^a

^aProgram Studi Teknik Kimia Mineral, Politeknik ATI Makassar
Jalan Sunu No. 220, Kota Makassar, 90211, Indonesia

*E-mail: melanimg@atim.ac.id

Masuk Tanggal: 16 September, revisi tanggal: 30 Oktober, diterima untuk diterbitkan tanggal: 20 Desember 2025

Abstrak

Salah satu produk sampingan yang belum dimanfaatkan dari proses ekstraksi minyak sawit adalah tandan buah kelapa sawit kosong (TKKS). Pirolisis merupakan salah satu teknik konversi termokimia yang dapat digunakan untuk memanfaatkan limbah TKKS sehingga dapat menghasilkan biochar. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengolah TKKS menjadi produk yang bernilai melalui proses pirolisis sederhana serta membandingkan karakteristik biochar dari TKKS kering dan segar. Parameter yang diuji meliputi pH, kadar air, kadar abu, dan nilai N, P, K. Diharapkan bahwa penelitian ini akan membantu dalam pengembangan sumber energi terbarukan dan memberikan solusi untuk pengolahan limbah kelapa sawit yang efisien. Selain perbedaan antara sampel TKKS segar dan kering, suhu pirolisis yang digunakan adalah antara 300 - 400°C selama 1 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa TKKS dapat di pirolisis untuk menghasilkan biochar yang dapat dimanfaatkan. Dibandingkan dengan TKKS kering (31,29%), TKKS segar menghasilkan biochar lebih sedikit (14,43%). Dibandingkan dengan TKKS segar, biochar yang terbuat dari TKKS kering mengandung lebih banyak N (0,78%), P (0,09%), dan K (0,72%). Hal ini menunjukkan bahwa TKKS memiliki potensi besar sebagai bahan baku untuk produk terbarukan dan energi alternatif.

Kata Kunci: Tandan kosong kelapa sawit, Pirolisis, Bio-char

Abstract

Pyrolysis is one of thermochemical conversion techniques that can be used to utilize EFB waste to produce biochar. The purpose of this study was to process EFB into valuable products through a simple pyrolysis process and to compare the characteristics of biochar from dry and fresh EFB. The parameters tested included pH, moisture content, ash content, and N, P, K values. It is hoped that this study will help in the development of renewable energy sources and provide solutions for efficient palm oil waste processing. In addition to the differences between fresh and dry EFB samples, the pyrolysis temperature used was between 300 - 400°C for 1 hour. The results showed that EFB can be pyrolyzed to produce usable biochar. Compared to dry EFB (31.29%), fresh EFB produced less biochar (14.43%). Compared to fresh OPEFB, biochar made from dried OPEFB contains higher levels of N (0.78%), P (0.09%), and K (0.72%). This indicates that OPEFB has significant potential as a raw material for renewable products and alternative energy.

Keywords: Empty palm fruit bunches, Pyrolysis, Bio-char

1. PENDAHULUAN

Direktorat Jenderal Perkebunan Kelapa Sawit melaporkan bahwa luas perkebunan kelapa sawit di Indonesia masih terus berkembang. Antara tahun 2020 dan 2023, Indonesia memiliki 15,93 juta hektar perkebunan kelapa sawit pada tahun

2023. Akibatnya, limbah industri kelapa sawit seperti Tandan Buah Kosong (TBK) Kelapa Sawit semakin meningkat.

Sebagai negara dengan produksi kelapa sawit terbesar di dunia, Indonesia juga menghasilkan volume limbah kelapa sawit yang sangat signifikan. Limbah kelapa sawit merupakan sisa

dari berbagai tahapan proses, baik dari kegiatan budidaya tanaman kelapa sawit, pengolahan di pabrik kelapa sawit (PKS) untuk menghasilkan crude palm oil (CPO), maupun dari pengolahan kernel menjadi minyak inti sawit atau palm kernel oil (PKO). Limbah padat yang dihasilkan mencapai sekitar 35% hingga 40% dari total tandan buah segar (TBS) yang diolah, meliputi tandan kosong, serat, cangkang buah, abu hasil pembakaran, serta bungkil sawit[1]. Produk limbah utama berupa tandan kosong menyumbang 23% dari proses produksi minyak sawit [2]

Tandan kosong kelapa sawit mengandung sejumlah material penting yang dapat dimanfaatkan dan diolah menjadi material lain dengan nilai ekonomis yang lebih tinggi [3]. Selulosa, lignin, hemiselulosa, air, dan zat ekstraktif lainnya merupakan beberapa komponennya. TKKS merupakan sumber bahan organik yang kaya unsur hara N, P, K, dan Mg yang dapat digunakan sebagai bahan substitusi pupuk pada perkebunan kelapa sawit [4].

Pirolisis dapat mengubah biomassa menjadi energi terbarukan. Pirolisis mengubah limbah biomassa menjadi arang, syngas, dan bio-oil dalam reaktor tanpa oksigen [5]. Teknik ini dapat menawarkan pendekatan yang berbeda untuk mengurangi dampak pencemaran lingkungan akibat TKKS.

Teknik pirolisis telah dikembangkan untuk mengubah bahan baku biomassa menjadi bioenergi dan biofuel. Kisaran suhu untuk pirolisis biomassa adalah 350–550°C, dengan suhu maksimum 700°C [6]. Biochar merupakan bentuk arang yang dihasilkan melalui proses pembakaran biomassa dalam kondisi oksigen terbatas [7], sehingga bahan organik tersebut terurai menjadi berbagai produk cairan (bio-oil atau tar) dan padatan (bio-char). Dengan demikian, pemanfaatan limbah TKKS melalui proses pirolisis tidak hanya mengurangi dampak pencemaran lingkungan, tetapi juga menciptakan produk bernilai tinggi seperti bio-char yang dapat mendukung keberlanjutan industri.

Penelitian ini menawarkan pendekatan metode pirolisis sederhana yang berfokus pada optimalisasi suhu pirolisis dan waktu tinggal (*residence time*) tanpa penggunaan katalis tambahan. Tujuan utamanya adalah untuk memperoleh biochar dengan kadar abu rendah, sehingga dapat digunakan untuk aplikasi energi maupun pertanian.

Metode pirolisis sederhana ini diharapkan dapat menjadi solusi yang efisien dan ekonomis untuk pemanfaatan limbah TKKS, sekaligus mendukung prinsip pengelolaan limbah berkelanjutan (*sustainable waste management*)

dan ekonomi sirkular (*circular economy*). Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berkontribusi terhadap pengurangan dampak lingkungan akibat limbah kelapa sawit, tetapi juga berpotensi menghasilkan produk bernilai ekonomi tinggi yang mendukung keberlanjutan industri kelapa sawit di Indonesia.

Penelitian yang dilakukan oleh Ratnasari dkk. (2024) mengenai pembuatan biochar dari pelepah dan tandan kosong kelapa sawit (TKKS) melalui proses pirolisis pada suhu 300°C selama 6 jam menunjukkan bahwa perbedaan karakteristik bahan baku berpengaruh terhadap kualitas biochar yang dihasilkan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dilakukan penelitian ini untuk meningkatkan kualitas biochar dari limbah tandan kosong kelapa sawit dengan menggunakan metode pirolisis sederhana.

2. PROSEDUR PERCOBAAN

2.1. Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini meliputi alat-alat gelas yang umum digunakan, rangkaian alat pirolisis sederhana, neraca digital, oven, tanur, cawan porselin, spatula, botol sampel, erlenmeyer, pH meter, dan piknometer. Sedangkan untuk bahannya meliputi Tandan Kosong Kelapa sawit (TKKS).

2.2. Proses Persiapan Sampel

Setelah dipotong dadu, sampel TKKS kering (kecuali TKKS segar) dimasukkan ke dalam oven pada suhu 70°C selama 24 jam. Masing-masing sampel TKKS seberat 500 gram selanjutnya dimasukkan ke dalam reaktor batch. Kumpor dinyalakan, dan suhu pada temperatur gauge dipantau antara 300-400°C selama 1 jam. Setelah proses pembakaran selesai, hasil pirolisis berupa bio-char diambil dan ditimbang.

2.3. Tahap Analisis

2.3.1 Analisis pH

Sebanyak 10 gram bio-char dicampurkan dengan 20 mL akuades dan didiamkan selama 1 menit. Setelah itu, pH sampel diukur menggunakan pH meter. Elektroda dibilas dengan air bebas ion dan keringkan dengan tisu. Kemudian, elektroda dimasukkan ke dalam sampel, dan nilai pH diamati setelah stabil. Hasil yang diperoleh kemudian dicatat.

2.3.2 Kadar Air

Setelah menimbang satu gram sampel biochar ke dalam wadah yang diketahui beratnya, Sampel dikeringkan dalam oven selama tiga jam pada suhu 105°C. Setelah didinginkan dalam desikator,

sampel ditimbang hingga konstan. Rumus penentuan kadar air menurut SNI 06-3730-1995[8]:

$$\text{Kadar Air} = \frac{W_1}{W_2} \times 100\% \quad (1)$$

Dengan W1 sebagai kehilangan bobot contoh (gram) dan W2 adalah bobot contoh (gram).

2.3.3 Kadar Abu

Setelah menimbang sampel biochar seberat 1 gram ke dalam krus porselen dengan berat yang diketahui, sampel tersebut diabukan pada suhu 900°C selama 7 menit. Setelah itu, didinginkan di dalam desikator dan ditimbang hingga bobot tetap. Rumus untuk menentukan kadar air menurut SNI 06-3730-1995:

$$\text{Kadar Abu} = \frac{W_1}{W_2} \times 100\% \quad (2)$$

Dengan W1 sebagai bobot sisa pijar (gram) dan W2 adalah bobot contoh (gram).

2.3.4 Analisa NPK

Hasil penelitian di uji pada Laboratorium Kimia Tanah dan Kesuburan Fakultas Pertanian Universitas Hasanuddin.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

TKKS merupakan salah satu limbah biomassa padat yang dihasilkan dari industri kelapa sawit. TKKS mengandung lignoselulosa yang memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku energi alternatif, khususnya melalui proses termokimia seperti pirolisis. Penelitian ini menghasilkan produk yaitu bio-char. Sebelum dan setelah pirolisis dilakukan analisa kadar air dan kadar abu untuk TKKS segar dan kering. Adapun data penelitian dapat dilihat pada Tabel 1 sebagai berikut.

Tabel 1. Hasil analisis proksimat TKKS sebelum dan setelah proses pirolisis

No.	Parameter	Hasil			
		Sebelum pirolisis		Setelah Pirolisis	
		TKKS Segar	TKKS Kering	TKKS Segar	TKKS Kering
1	Kadar Air (%)	12.89	8.88	12.65	12.55
2	Kadar Abu (%)	4.55	4.73	2.11	2.25

Kadar air yang rendah pada TKKS kering dapat mendukung proses karbonisasi lebih efisien, karena energi panas tidak banyak terserap untuk penguapan air [9]. Sebaliknya, TKKS segar mengandung air dalam jumlah besar, sehingga konversi energi menjadi kurang efisien karena sebagian besar energi digunakan untuk menguapkan air yang kemudian di kondensasi dan berkontribusi terhadap peningkatan produksi bio-oil.

Kualitas bio-char menunjukkan karakteristik yang cukup baik, seperti pada nilai pH yang dihasilkan yaitu 9.84 (TKKS Kering) dan 9.7 (TKKS segar). Nilai pH dari semua sampel berada dalam rentang standar IBI (*Internasional Bio-char Initiative*) yaitu 6-10, menandakan sifat basa yang bermanfaat untuk memperbaiki tanah masam dan meningkatkan kesuburan tanah. Kadar abu bio-char berada pada kisaran 2.03 – 2.25%, yang menunjukkan kandungan material anorganik yang rendah serta mencerminkan tingginya kualitas bio-char. Kadar air dalam bio-char yang masih berada di bawah batas maksimum yang ditetapkan oleh SNI 06-3730-1995, yaitu 15%. Hal ini menunjukkan kadar air bio-char telah memenuhi standar mutu nasional, meskipun pengendalian kelembapan tetap perlu dilakukan agar kualitas bio-char proses terjaga selama penyimpanan.

Salah satu tujuan utama pirolisis biomassa adalah untuk menghasilkan biochar. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pirolisis sangat efektif dalam mengurangi kadar abu hingga lebih dari 50 % pada kedua jenis sampel (segar dan kering). Penurunan kadar abu ini mengindikasikan bahwa sebagian besar mineral volatil telah menguap selama proses pirolisis atau telah diubah menjadi bentuk lain yang tidak terdeteksi dalam analisis proksimat standar [10]. Penurunan kadar abu ini adalah kunci untuk meningkatkan kualitas biochar karena biochar dengan kadar abu rendah memiliki kandungan karbon yang lebih tinggi dan karenanya nilai kalornya (nilai energi) juga lebih tinggi. Meskipun ada perbedaan awal pada kadar air, penurunan kadar abu setelah pirolisis terjadi secara konsisten pada kedua jenis sampel [11]. Namun, tidak terlihat ada perbedaan yang signifikan antara hasil pirolisis TKKS segar dan TKKS kering. Hal ini menyiratkan bahwa pirolisis efektif untuk kedua jenis bahan baku, tetapi mungkin diperlukan *pre-treatment* (pengeringan) yang lebih intensif [12].

Tabel 2 Menunjukkan hasil analisis pH serta kandungan unsur hara makro (N, P, K) pada tandan kosong kelapa sawit (TKKS) segar dan kering.

Kandungan nitrogen meningkat dari 0,43% (segar) menjadi 0,78% (kering). Hal ini

menunjukkan bahwa pengeringan mampu meningkatkan konsentrasi unsur N akibat berkurangnya kadar air. Unsur nitrogen berperan penting dalam pembentukan protein dan klorofil tanaman. Namun, dalam proses pirolisis, sebagian nitrogen dapat terdegradasi menjadi senyawa volatil sehingga diperlukan optimasi suhu untuk mempertahankan kandungan N dalam biochar [13].

Tabel 2. Hasil Analisis NPK

No.	Parameter	TKKS Segar	TKKS Kering
1	N (Nitrogen)	0.43 %	0.78 %
2	P (Fosfor)	0.06 %	0.09 %
3	K (Kalium)	0.47 %	0.72 %

Kandungan fosfor pada TKKS segar sebesar 0,06% dan meningkat menjadi 0,09% setelah dikeringkan. Peningkatan ini menunjukkan bahwa pengeringan dapat memekatkan unsur hara. Fosfor merupakan unsur penting untuk pertumbuhan akar dan pembentukan energi dalam bentuk ATP. Dalam biochar, P umumnya bersifat lebih stabil sehingga dapat menjadi sumber hara jangka panjang bagi tanah [14].

Kandungan kalium meningkat signifikan dari 0,47% pada TKKS segar menjadi 0,72% pada TKKS kering. Unsur kalium berfungsi dalam memperkuat jaringan tanaman, meningkatkan kualitas hasil panen, serta meningkatkan ketahanan terhadap cekaman biotik maupun abiotik. Peningkatan kadar K dalam biochar menjadikannya sangat potensial sebagai pupuk organik pengaya unsur hara [15].

Data pada tabel 2 memperlihatkan bahwa pengeringan TKKS berkontribusi dalam meningkatkan konsentrasi unsur hara makro yang penting bagi pertanian. Dengan demikian, apabila TKKS dikonversi melalui pirolisis, diharapkan biochar yang dihasilkan akan memiliki kualitas lebih tinggi, baik dari segi pH maupun kandungan hara. Biochar dengan pH basa serta kandungan N, P, dan K yang cukup dapat berfungsi ganda, yaitu sebagai pembenah tanah dan sumber hara [16].

Penelitian yang dilakukan oleh Ratnasari dkk. (2024) mengenai pembuatan biochar dari pelepah dan tandan kosong kelapa sawit (TKKS) melalui proses pirolisis pada suhu 300°C selama 6 jam menunjukkan bahwa perbedaan karakteristik bahan baku berpengaruh terhadap kualitas biochar yang dihasilkan. Biochar dari pelepah kelapa sawit memiliki tekstur yang lebih halus, sedangkan biochar dari TKKS memiliki struktur yang lebih kasar dan padat.

Hasil analisis kimia yang dilakukan oleh Ratnasari dkk. (2024), menunjukkan bahwa biochar dari TKKS memiliki kandungan nitrogen

(N) 0,91%, fosfor (P) 0,03%, kalium (K) 0,67%, kadar abu 7,18%, pH 6,31, dan karbon organik 58,04%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa biochar TKKS memiliki potensi tinggi sebagai pembenah tanah (*soil amendment*) karena mampu memperbaiki kandungan karbon organik tanah serta memiliki pH yang mendekati netral. Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa proses pirolisis pada suhu 300°C selama 6 jam merupakan metode yang efektif untuk mengonversi limbah biomassa kelapa sawit menjadi biochar bernilai guna tinggi, baik untuk peningkatan kesuburan tanah maupun sebagai solusi pengelolaan limbah perkebunan secara berkelanjutan.

Jika dibandingkan, penerapan suhu pirolisis yang lebih rendah terbukti mampu menurunkan kadar air dan kadar abu secara signifikan, serta meningkatkan kandungan unsur hara makro seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Temuan ini mengindikasikan bahwa proses pirolisis pada suhu menengah, sekitar 300°C, lebih efektif dalam mempertahankan unsur hara tersebut. Sebaliknya, pirolisis pada suhu yang lebih tinggi (300–400°C) cenderung menghasilkan biochar dengan kadar air dan abu yang lebih rendah, namun memiliki kandungan unsur hara yang lebih sedikit akibat terjadinya dekomposisi termal yang lebih intensif.

4. KESIMPULAN

Hasil analisis menunjukkan bahwa pengeringan TKKS meningkatkan kandungan N, P, dan K serta mempertahankan sifat basa (pH > 9). Hal ini menandakan bahwa TKKS kering berpotensi besar untuk diproses melalui pirolisis menjadi biochar dengan kualitas yang lebih baik dibandingkan TKKS segar. Biochar hasil pirolisis TKKS diharapkan tidak hanya meningkatkan kualitas tanah tetapi juga memberikan manfaat sebagai sumber unsur hara.

UCAPAN TERIMA KASIH

Program Studi Teknik Kimia Mineral (TKM), Direktur, dan Kepala Unit Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (UPPM) Politeknik ATI Makassar yang penulis ucapkan terima kasih.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. F. Praevia and W. Widayat, "Analisis Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit sebagai Cofiring pada PLTU Batubara," *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 3, no. 1, pp. 28–37, Mar. 2022, doi: 10.14710/jebt.2022.13367.

- [2] R. Isrami Astiani, D. Yadi Heryadi, and D. Djuliansah, "Analisis Finansial Kelapa Sawit Rakyat," *Agroinfo Galuh*, vol. 10, no. 1, pp. 761–778, Jan. 2023.
- [3] D. R. Wicakso, R. A. Lestari, R. Maulana, and D. Andriya., "Pengaruh Suhu pada Proses Catalytic Cracking untuk UP-Grading Bio-Oil dari Hasil Pirolisis Tandan Kosong Sawit (TKS) dengan Katalisator Lempung Gambut," *Prosiding Seminar Nasional Lingkungan Lahan Basah*, Vol. 6, no. 2, April. 2021.
- [4] I. Fatyasari, C. Irawan, M. D. Putra, H. Wijayanti, P. Mardina, Y. N. Ma'rifah, Misnawati, S. B. Priseila, *Tandan Kosong Kelapa Sawit: Potensi dan Aplikasi*. [Online]. Available: www.penerbitbcs.com
- [5] S. A. Novita, S. Santosa, N. Nofialdi, A. Andasuryani, and A. Fudholi, "Artikel Review: Parameter Operasional Pirolisis Biomassa," *Agroteknika*, vol. 4, no. 1, pp. 53–67, Jun. 2021, doi: 10.32530/agroteknika.v4i1.105.
- [6] M. Syahrir and M. Mahyati, "Pengolahan Limbah Tongkol Jagung Menjadi Asap Cair dengan Metode Pirolisis Lambat," *INTEK: Jurnal Penelitian*, vol. 6, no. 1, pp. 69–74, May 2019, doi: 10.31963/intek.v6i1.1209.
- [7] H. A. Permana, F. Delvitasari, W. R. Hartari, and M. Maryanti, "Pengaruh Konsentrasi NaOH dan Suhu Delignifikasi pada Kandungan Lignoselulosa Tandan Kosong Kelapa Sawit," *Jurnal Agro Industri Perkebunan*, vol. 12, no. 1, pp. 51–58, Mar. 2024, doi: 10.25181/jaip.v12i1.2729.
- [8] SNI 06-3730-1995, "Arang Aktif Teknis," 1995.
- [9] F. Febriyanti, N. Fadila, A. S. Sanjaya, Y. Bindar, and A. Irawan, "Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Menjadi Bio-Char, Bio-Oil dan Gas dengan Metode Pirolisis," *Jurnal Chemurgy*, vol. 03, No. 2, Desember. 2019.
- [10] L. Li, A. Long, B. Fossum, and M. Kaiser, "Effects of Pyrolysis Temperature and Feedstock Type on Biochar Characteristics Pertinent to Soil Carbon and Soil Health: A meta-analysis," Jan. 01, 2023, *John Wiley and Sons Inc*. doi: 10.1111/sum.12848.
- [11] K. K. B. Suresh Babu, M. Nataraj, M. Tayappa, Y. Vyas, R. K. Mishra, and B. Acharya, "Production of Biochar from Waste Biomass using Slow Pyrolysis: Studies of the Effect of Pyrolysis Temperature and Holding Time on Biochar Yield and Properties," *Mater Sci Energy Technol*, vol. 7, pp. 318–334, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.mset.2024.05.002.
- [12] A. Bhatnagar, A. Singhal, H. Tolvanen, K. Valtonen, T. Joronen, and J. Konttinen, "Effect of Pretreatment and Biomass Blending on Bio-oil and Biochar Quality from Two-Step Slow Pyrolysis of Rice Straw," *Waste Management*, vol. 138, pp. 298–307, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.wasman.2021.12.013.
- [13] M. Ghorbani, E. Amirahmadi, R. W. Neugschwandtner, P. Konvalina, M. Kopecký, J. Moudrý, K. Perná, and Y. T. Murindangabo, "The Impact of Pyrolysis Temperature on Biochar Properties and Its Effects on Soil Hydrological Properties," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 22, Nov. 2022, doi: 10.3390/su142214722.
- [14] T. Nur Rizki, "Kajian Pengaruh Dosis Dan Jenis Biochar Terhadap Ketersediaan Unsur Hara Fosfor (P) Pada Tanah Masam Di Sebatik," Kalimantan, Nov. 2020.
- [15] B. Glaser and V. I. Lehr, "Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis," *Sci Rep*, vol. 9, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-45693-z.
- [16] A. R. Hasibuan, Q. F. N. Nasution, A. M. P. Lubis, and A. M. Harahap, "Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit (Tandan Kosong Kelapa Sawit) sebagai Pilihan Organik Tanaman yang Ramah Lingkungan di Kabupaten Labuhan Batu Utara," *Zahra: Journal Of Health And Medical Research*, vol. 3, no. 2, pp. 183–190, Apr. 2023.
- [17] I. F. D. Ratnasari, Devi, R. Ismoyojati, I. Febriansyah, "Chemical Characteristics of Palm Frond and Empty Fruit Bunch Biochar in Pyrolysis Method," *Journal of Sustainable Agriculture and Biosystems Engineering*, Vol. 02, no. 01, pp. 028-033, 2024.