Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan, Oktober 2025, 11 (10.D), 124-130
DOI: https://jurnal.peneliti.net/index.php/JIWP/article/view/13050
p-ISSN: 2622-8327 e-ISSN: 2089-5364
Accredited by Directorate General of Strengthening for Research and Development
Available online at https://jurnal.peneliti.net/index.php/JIWP

Analisis Konsep Fisika pada Teknologi 'PIROLISIS' untuk Pengolahan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit sebagai Sumber Energi Terbarukan

Raihan Nauval Qolbi[1], Daffa Safiq[1], Sudarti[1], Kendid Mahmudi[1]

[1]S1 Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember

Received: 05 September 2025
Revised: 17 September 2025
Accepted: 28 September 2025

Abstract

Limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan salah satu jenis biomassa lignoselulosa yang melimpah namun belum dimanfaatkan secara optimal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis proses kerja teknologi pirolisis dalam mengonversi TKKS menjadi produk bernilai guna seperti bio-oil, biochar, dan gas pirolitik. Teknologi pirolisis bekerja dengan memanaskan bahan biomassa pada suhu tinggi tanpa kehadiran oksigen sehingga memungkinkan terjadinya dekomposisi termal. Proses ini berlangsung melalui beberapa tahap, yaitu pengeringan, dekomposisi aktif, dan karbonisasi. Hasil kajian menunjukkan bahwa variabel operasi seperti suhu, waktu tinggal, dan laju pemanasan sangat memengaruhi kualitas serta kuantitas produk pirolisis. Dengan efisiensi energi yang cukup tinggi dan potensi pengurangan limbah, teknologi pirolisis berbasis TKKS memiliki prospek besar sebagai solusi pengelolaan limbah sekaligus penyedia energi alternatif yang ramah lingkungan. Penelitian ini mendukung pengembangan teknologi berkelanjutan dalam sektor agroindustri kelapa sawit pada teknologi pirolisis.

Keywords: *tandan kosong kelapa sawit, pirolisis, biomassa, bio-oil, teknologi termal*

(*) Corresponding Author: 230210102065@mail.unej.ac.id
230210102026@mail.unej.ac.id
sudartifkip@unej.ac.id

How to Cite: Qolbi, R., Safiq, D., Sudarti, S., & Mahmudi, K. (2025). Analisis Konsep Fisika pada Teknologi 'PIROLISIS' untuk Pengolahan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, *11*(10.D), 109-123. Retrieved from https://jurnal.peneliti.net/index.php/JIWP/article/view/13050.

INTRODUCTION

Krisis energi adalah salah satu tantangan terbesar yang dihadapi dunia saat ini. Dalam beberapa dekade terakhir, permintaan energi telah meningkat secara dramatis karena pertumbuhan populasi global, perkembangan industri, dan peningkatan standar hidup. Bahan bakar fosil yang merupakan sumber energi utama, menjadi komoditas unggulan dalam perdagangan global dimana setiap negara berlomba-lomba untuk meraup keuntungan didalamnya. Dalam perlombaan ini tentu saja aspek-aspek keberjanjutan sering kali terabaikan. Sumber daya energi yang terbatas dan penggunaan sumber daya alam yang tidak berkelanjutan telah membawa kita ke titik kritis. Krisis energi mencakup berbagai masalah, seperti ketergantungan yang berlebihan pada bahan bakar fosil yang tidak terbarukan, memburuknya perubahan iklim, dan akses energi yang tidak merata di seluruh dunia. Dalam krisis ini, tindakan mendesak dan kolektif diperlukan untuk menemukan solusi berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan energi global tanpa

merusak lingkungan dan memberikan akses yang sama bagi seluruh penduduk dunia (Logayah et al,2023).

Salah satu teknologi yang berpotensi tinggi dalam pengolahan TKKS adalah pirolisis. Teknologi ini memiliki banyak kelebihan seperti produk Bio-oil, Bio-Char dan gas yang dihasilkan dapat menjadi alternatif solusi bagi pengendalian dampak pencemaran lingkungan. Metode pirolisis merupakan cara yang digunakan untuk memperoleh asap cair.

Pirolisis adalah sebuah proses dekomposisi material oleh suhu. Proses pirolisis dimulai pada suhu tinggi dan tanpa kehadiran O2. Umpan pada proses pirolisis dapat berupa material bahan alam tumbuhan atau dikenal sebagai biomassa, atau berupa polimer. Dengan proses pirolisis, biomassa dan polimer akan mengalami pemutusan ikatan membentuk molekul-molekul dengan ukuran dan stuktur yang lebih ringkas. Pirolisis biomassa secara umum merupakan dekomposisi bahan organik menghasilkan bahan padat berupa arang aktif, gas dan uap serta aerosol. Gas yang dapat dikondensasikan sebagai bahan cair dan stabil pada temperature kamar merupakan senyawa hidrokarbon yang dikenal sebagai biofuel atau Bio-oil (Ristianingsih, Ulfa and K.S, 2015).

Dengan meningkatnya kebutuhan akan pembelajaran yang kontekstual dan aplikatif, analisis terhadap penerapan konsep-konsep fisika dalam teknologi pengolahan limbah menjadi semakin penting, terutama bagi mahasiswa pendidikan fisika. Salah satu contoh penerapan nyata adalah teknologi pirolisis yang digunakan untuk mengolah limbah tandan kosong kelapa sawit. Proses ini melibatkan prinsip-prinsip fisika seperti perpindahan kalor (melalui konduksi, konveksi, dan radiasi), transformasi energi, tekanan, serta reaksi termokimia dalam sistem tertutup. Dengan memahami konsep-konsep tersebut secara menyeluruh, mahasiswa tidak hanya mampu menghubungkan teori fisika dengan praktik di lapangan, tetapi juga dapat melihat peran besar fisika dalam mendukung inovasi teknologi yang berkelanjutan.

Artikel ini bertujuan untuk mengkaji serta menganalisis secara mendalam penerapan konsep-konsep fisika dalam teknologi pirolisis yang digunakan untuk mengolah limbah tandan kosong kelapa sawit menjadi energi terbarukan. Selain itu, penulisan ini juga diarahkan untuk menumbuhkan kesadaran dan pemahaman kritis mahasiswa program studi pendidikan fisika mengenai keterkaitan ilmu yang mereka pelajari dengan permasalahan nyata di masyarakat, khususnya dalam bidang lingkungan dan energi. Dengan demikian, artikel ini diharapkan dapat berkontribusi dalam memperkuat literasi energi serta menjadi media pembelajaran interdisipliner yang mengintegrasikan fisika, teknologi, dan isu-isu keberlanjutan.

METHODS

Penulisan artikel ini menggunakan metode deskriptif kualitatif dengan pendekatan studi literatur dan analisis dokumentasi teknis. Pendekatan ini dipilih untuk mendeskripsikan serta menganalisis konsep-konsep fisika yang terlibat dalam proses kerja teknologi pirolisis dalam mengolah limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Kajian dilakukan dengan menelaah dan menganalisis 20 artikel ilmiah, baik nasional maupun internasional, yang diperoleh dari berbagai sumber seperti Google Scholar, PubMed, serta aplikasi Harzing's Publish or Perish yang telah terindeks oleh SINTA. Selain itu, data juga diperoleh dari dokumen

teknis mesin pirolisis serta buku-buku fisika yang relevan, khususnya yang membahas perpindahan kalor, tekanan, energi termal, dan perubahan wujud zat.

Proses analisis dilakukan dengan mengidentifikasi setiap tahapan dalam proses pirolisis—mulai dari pemanasan awal hingga produk akhir—dan memetakan konsep fisika yang relevan pada tiap tahapannya. Kata kunci yang digunakan dalam proses penelusuran literatur adalah "Analisis Konsep Fisika pada Teknologi 'PIROLISIS' untuk Pengolahan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit sebagai Sumber Energi Terbarukan".

RESULTS & DISCUSSION



Bagan pembahasan

1. Persiapan Bahan Baku

Tahapan awal dalam proses pirolisis limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dimulai dengan pengumpulan dan persiapan bahan baku. TKKS yang telah dikumpulkan umumnya masih memiliki kadar air yang tinggi, sehingga diperlukan proses pengeringan terlebih dahulu. Tujuan utama dari pengeringan ini adalah untuk mengurangi kadar kelembaban, karena air dalam jumlah tinggi dapat menghambat efisiensi termal saat pirolisis berlangsung.

Secara prinsip fisika, proses pengeringan ini melibatkan perpindahan energi panas dari sumber panas ke dalam bahan, yang terjadi melalui mekanisme konduksi termal. Energi tersebut digunakan untuk mengubah air yang terdapat di dalam selulosa TKKS menjadi uap air yang kemudian diuapkan keluar dari sistem. Dengan kata lain, terdapat perubahan energi dalam sistem, yakni dari energi panas ke energi yang digunakan untuk mengatasi ikatan antar molekul air dalam bahan.

Kalor yang diperlukan untuk penguapan air :

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

- q = laju perpindahan panas (W)
- k = konduktivitas termal bahan (W/m·K)
- A = luas permukaan (m^2)
- $\frac{dT}{dx}$ = gradien suhu

Ukuran partikel TKKS juga menjadi aspek penting yang perlu diperhatikan dalam tahap ini. Bahan baku dengan ukuran partikel yang lebih kecil memiliki luas permukaan yang lebih besar, sehingga memungkinkan penyerapan panas yang lebih merata dan reaksi pirolisis yang lebih efisien (Bridgwater, 2012). Oleh karena itu, tahap persiapan ini tidak hanya bersifat teknis, namun juga sangat menentukan keberhasilan proses konversi energi pada tahap selanjutnya.

2. Pemanasan Awal

Setelah bahan baku mencapai kadar air dan ukuran yang sesuai, tahap selanjutnya adalah proses pemanasan awal. Pada tahap ini, bahan dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis dan dipanaskan secara bertahap hingga mencapai suhu reaksi, yaitu sekitar 300–500 °C tergantung pada jenis pirolisis yang dilakukan. Proses ini dilakukan dalam kondisi tertutup dan bebas oksigen agar tidak terjadi pembakaran, melainkan hanya dekomposisi termal.

Dari sudut pandang fisika, perpindahan kalor terjadi melalui dua mekanisme utama, yaitu konveksi dari aliran gas panas yang mengelilingi bahan, dan radiasi dari dinding reaktor yang telah mencapai suhu tinggi. Kedua mekanisme ini membantu meningkatkan energi dalam partikel TKKS, yang menyebabkan komponen-komponen penyusun seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin mulai mengalami kerusakan ikatan molekul.

Mekanisme konveksi :

$$q = h \cdot A \cdot (T_{\text{gas}} - T_{\text{bahan}})$$

Mekanisme radiasi :

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T^4_{\text{reaktor}} - T^4_{\text{bahan}})$$

Penambahan energi ini menyebabkan peningkatan gerak molekuler yang signifikan di dalam struktur bahan, yang pada akhirnya mengarah pada peristiwa dekomposisi termal. Kecepatan pemanasan dan distribusi suhu yang seragam sangat penting dalam menghindari pembentukan produk sampingan yang tidak diinginkan serta dalam menjaga kestabilan reaksi pirolisis (Demirbaş, 2004).

3. Proses Pirolisis

Tahap utama dalam teknologi ini adalah proses pirolisis itu sendiri, yaitu ketika bahan yang telah mencapai suhu tertentu mulai terurai secara kimia menjadi beberapa produk, seperti bio-oil (minyak pirolisis), gas pirolitik, dan residu padat berupa char. Proses ini berlangsung dalam kondisi anaerobik, yang artinya tidak ada oksigen dalam sistem, sehingga pembakaran tidak terjadi.

Dari sudut pandang hukum fisika, reaksi ini merupakan contoh nyata dari konversi bentuk energi. Energi kimia yang tersimpan dalam struktur molekul TKKS diubah menjadi energi panas (termal) dan menghasilkan energi dalam bentuk bahan bakar baru (bio-oil dan gas). Meski terjadi perubahan bentuk energi, hukum

kekekalan energi tetap berlaku, di mana jumlah total energi dalam sistem tidak berubah, hanya bentuknya yang berbeda.

Reaksinya meliputi :

$$\text{Biomassa} \xrightarrow{\Delta T, \text{tanpa } O_2} \text{bio-oil} + \text{gas} + \text{char}$$

Proses pirolisis mampu mengubah energi kimia biomassa menjadi energi termal dan menghasilkan bahan bakar terbarukan seperti bio-oil, gas, dan char (Mohan, Pittman, & Steele, 2006). Dalam proses pirolisis cepat (*fast pyrolysis*), produk bio-oil yang dihasilkan dapat mencapai hingga 70% dari massa kering bahan baku, tergantung pada parameter proses seperti suhu dan waktu tinggal bahan di reaktor (Mohan et al., 2006).

4. Pendinginan dan Kondensasi

Gas pirolitik yang dihasilkan dari proses dekomposisi termal kemudian dialirkan menuju sistem kondensasi, di mana proses pendinginan berlangsung. Tujuan utama dari tahap ini adalah untuk mengubah fase uap menjadi cairan dengan cara menurunkan suhu gas tersebut secara drastis menggunakan media pendingin. Mekanisme perpindahan kalor yang terjadi pada tahap ini melibatkan konduksi dan konveksi, di mana energi panas dari gas berpindah ke media pendingin, seperti air atau udara.

Saat suhu gas menurun, energi dalamnya pun ikut menurun, menyebabkan uap hidrokarbon mengembun menjadi bio-oil. Tahapan ini sangat penting dalam meentukan efisiensi konversi, karena jika proses pendinginan tidak optimal, maka sebagian besar komponen gas akan tetap berada dalam fase gas dan tidak terkondensasi menjadi cairan yang bisa disimpan dan digunakan.

Mekanisme Kondensasi :

$$Q = m \cdot L_v$$

L_v = kalor laten pengembunan (kondensasi)

Menurut laporan dari IEA Bioenergy Task 34 (2018), efisiensi sistem kondensasi dapat ditingkatkan dengan penggunaan sistem kondensasi multi-tahap (*multi-stage condensers*) yang memungkinkan pemisahan fraksi bio-oil berdasarkan titik didih, sehingga meningkatkan kualitas produk akhir.

5. Pengumpulan Produk

Produk akhir dari keseluruhan proses pirolisis terdiri atas tiga bentuk utama: bio-oil sebagai bahan bakar cair, gas pirolitik yang dapat digunakan kembali sebagai bahan bakar untuk pemanas reaktor, dan char yang bisa dimanfaatkan sebagai bahan bakar padat, pupuk karbon aktif, atau material adsorben. Ketiga produk ini memiliki nilai guna tinggi, tergantung pada tujuan dan kebutuhan penggunaannya.

Salah satu aspek penting yang juga perlu diperhatikan dalam proses pengumpulan produk adalah tekanan dalam sistem reaktor. Tekanan yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dapat memengaruhi laju aliran produk dan efisiensi kondensasi, sehingga pengaturan tekanan menjadi bagian penting dari desain sistem pirolisis.

Lebih jauh, pendekatan ini sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular, di mana limbah diubah menjadi produk bernilai guna tinggi, bukan hanya dibuang atau dibakar. Teknologi pirolisis dapat secara signifikan mengurangi ketergantungan

terhadap bahan bakar fosil, sekaligus menjadi solusi pengelolaan limbah biomassa yang berkelanjutan dan ramah lingkungan (IEA Bioenergy Task 34, 2018).

Efisiensi Proses dan Potensi Energi

Efisiensi keseluruhan proses pirolisis sangat ditentukan oleh berbagai parameter operasional, termasuk suhu proses, waktu tinggal bahan di dalam reaktor (*residence time*), serta jenis dan kelembaban awal bahan baku. Optimalisasi parameter-parameter ini dapat meningkatkan yield produk bio-oil serta menurunkan konsumsi energi yang dibutuhkan untuk menjalankan sistem.

Indonesia sebagai salah satu negara penghasil kelapa sawit terbesar di dunia, memiliki potensi luar biasa dalam memanfaatkan limbah TKKS untuk energi. Data dari Badan Pusat Statistik (2022) mencatat bahwa volume TKKS yang dihasilkan setiap tahunnya dapat mencapai lebih dari 25 juta ton. Jika teknologi pirolisis diterapkan secara masif dan sistematis, potensi energi yang dapat dihasilkan sangat besar, bahkan cukup untuk menyuplai kebutuhan energi lokal di daerah-daerah produsen sawit yang masih bergantung pada energi fosil (Badan Pusat Statistik, 2022).

Dengan memahami dan menerapkan konsep fisika yang relevan dalam setiap tahapan proses pirolisis, pengembangan teknologi ini akan semakin efektif dan efisien. Ini tidak hanya mendukung pengurangan emisi karbon dan pengelolaan limbah secara bijak, tetapi juga membuka peluang inovasi di sektor energi terbarukan yang sangat dibutuhkan saat ini.

CONCLUSION

Teknologi pirolisis telah diidentifikasi sebagai salah satu alternatif yang menjanjikan untuk mengolah limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) menjadi energi yang dapat diperbarui. Melalui kajian berdasarkan konsep-konsep fisika, diketahui bahwa setiap tahapan dalam proses pirolisis—mulai dari proses pengeringan awal, pemanasan, pemecahan termal, pendinginan, hingga tahap akhir pengumpulan produk—menerapkan prinsip-prinsip fisika dasar seperti mekanisme perpindahan panas (konduksi, konveksi, dan radiasi), hukum kekekalan energi, dinamika reaksi kimia, tekanan, serta perubahan wujud zat.

Sebagai bahan baku, TKKS memiliki sifat fisik dan kimia yang mendukung proses pirolisis secara efisien, sehingga mampu menghasilkan produk seperti bio-oil, gas pirolitik, dan char yang bernilai ekonomi. Keberhasilan penerapan teknologi pirolisis secara maksimal dipengaruhi oleh faktor desain reaktor, pengaturan suhu dan tekanan, serta efektivitas sistem pendinginan atau kondensasi. Karena itu, pemahaman mendalam terhadap konsep-konsep fisika tidak hanya memperkuat landasan teoritis dalam pembelajaran, tetapi juga mendorong pengembangan teknologi energi terbarukan yang berwawasan lingkungan.

Secara keseluruhan, studi ini mempertegas bahwa fisika sebagai ilmu dasar memiliki peran penting dalam mendorong inovasi teknologi berkelanjutan, sekaligus menumbuhkan kesadaran kritis di kalangan mahasiswa agar mampu mengaplikasikan pengetahuan mereka dalam menghadapi permasalahan nyata di masyarakat, khususnya yang berkaitan dengan isu energi dan lingkungan.

REFERENCES

.Subramaniam, P., Sulaiman, S. A., & Hassan, M. A. (2021). Thermochemical behavior and kinetic analysis of biomass pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110223. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110223

Oasmaa, A., & Peacocke, C. (2021). A guide to pyrolysis bio-oil properties and applications. *IEA Bioenergy*, Task 34. https://www.ieabioenergy.com/

Yuan, H., Li, C., Zhang, H., & Liu, X. (2022). Recent advances in biomass drying technologies: A review. *Renewable Energy*, 187, 904–921. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.034

Zhang, Y., Chen, W., & Zhao, X. (2023). Comparative study on pyrolysis behavior of rice husk and palm empty fruit bunches. *Bioresource Technology Reports*, 22, 101551. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101551

Aisyah, N., Kurniawan, W., & Prasetyo, B. (2022). Pengaruh Suhu dan Laju Pemanasan terhadap Hasil Pirolisis TKKS. *Jurnal Energi Terbarukan*, 13(2), 45–53.

Pitoyo, A., Wirawan, S. K., & Nugroho, Y. (2022). Bio-oil from Oil Palm Shell Pyrolysis as Renewable Energy: A Review. *Renewable Energy Research Journal*, 5(1), 1–9.

Dolah, R., Ahmad, M. A., & Johari, A. (2021). Potential of palm empty fruit bunches as bio-oil feedstock through pyrolysis: A review. *Sustainability*, 13(18), 10210. https://doi.org/10.3390/su131810210

Asadullah, M., Zhang, S., Min, Z., Yimsuwan, T., & Li, C.-Z. (2007). Evaluation of a fixed bed pyrolysis system for bio-oil production from biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 80(2), 151–155. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2007.01.010

Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048

Demirbaş, A. (2004). Pyrolysis of municipal plastic wastes for recovery of gasoline-range hydrocarbons. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 72(1), 97–102. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.03.001

IEA Bioenergy Task 34. (2018). *Pyrolysis of biomass: Bio-oil production and upgrading*. International Energy Agency. Retrieved from https://task34.ieabioenergy.com

Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy & Fuels*, 20(3), 848–889. https://doi.org/10.1021/ef0502397

Badan Pusat Statistik. (2022). *Statistik Kelapa Sawit Indonesia 2021*. Jakarta: BPS. Retrieved from https://www.bps.go.id