

**TERMOGRAVIMETRI ANALISIS ULTIMAT DAN PROKSIMAT BIOMASSA  
SERTA PENENTUAN NILAI KALOR**

Rifqi Sufra<sup>1,2\*</sup>, Herri Susanto<sup>1</sup>, Jenny Rizkiana<sup>3</sup>, Suharto<sup>4</sup>, Arysca Wisnu Satria<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Prodi Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri, Instituti Teknologi Sumatera,  
Jl. Terusan Ryacudu Lampung Selatan. (0721) 8030188*

<sup>2</sup>*Integrated Waste and Agro Center, Instituti Teknologi Sumatera,  
Jl. Terusan Ryacudu Lampung Selatan. (0721) 8030188*

<sup>3</sup>*Prodi Teknik Bioenergi dan Kemurgi Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung,  
Jl. Ganesa No. 10, Coblong Bandung*

<sup>4</sup>*Badan Riset Inovasi Nasional, Jl. Sutami KM 15 Lampung Selatan*

\*email: [rifqi.sufra@tk.itera.ac.id](mailto:rifqi.sufra@tk.itera.ac.id)

**ABSTRAK**

Karakterisasi biomassa adalah hal yang penting untuk mengetahui komponen yang terkandung pada biomassa. Beberapa jenis biomassa yang diteliti yaitu kayu akasia, kayu gamal, arang batok kelapa, dan arang kayu, sebagai bahan bakar untuk proses gasifikasi melalui uji proksimat, uji ultimat, dan penentuan nilai kalor tinggi (HHV). Data analisis ultimat memanfaatkan analisis termografimetri (TGA) agar efisien. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa arang batok kelapa dan arang kayu memiliki kandungan karbon tetap tertinggi (72,66 dan 68,98%) dan unsur C yang lebih tinggi (57,87 dan 54,94%) serta kadar abu lebih rendah dibanding kayu akasia dan kayu gamal, sehingga menghasilkan nilai kalor tertinggi (30,01 dan 22,05 mJ/kg) dan berpotensi memberikan performa gasifikasi yang lebih baik. Sebaliknya, kayu akasia dan kayu gamal menunjukkan kadar zat terbang (64,03 dan 76,38%) dan abu yang relatif lebih tinggi (18,88%) menghasilkan nilai kalor yang lebih rendah. Secara keseluruhan, hasil penelitian mengindikasikan bahwa arang batok kelapa dan arang kayu lebih direkomendasikan sebagai bahan bakar utama pada sistem gasifikasi.

Kata kunci: analisis proksimat, analisis ultimat, biomassa, nilai kalor, termogravimetri

**ABSTRACT**

*Biomass characterisation is important for knowing the contained components in biomass. Some types of biomass studied were wood of acacia (*Acacia mangium*), gamal (*Gliricidia sepium*), coconut shell (*Cocos nucifera*) charcoal, and wood charcoal, for the gasification process through proximate analysis, ultimate analysis, and determination of high heating value (HHV). Ultimate analysis data utilised thermogravimetric analysis (TGA) for efficiency. The characterisation results show that coconut shell charcoal and wood charcoal have the highest fixed carbon content (72.66% and 68.98%) and higher C element (57.87% and 54.94%) as well as lower ash content compared to acacia wood and gamal wood, resulting in the highest calorific value (30.01 and 22.05 mJ/kg) and potentially better gasification performance. Conversely, acacia wood and gamal wood show relatively higher volatile matter content (64.03% and 76.38%) and ash (18.88%), resulting in lower calorific values. Overall, the research results indicate that coconut shell charcoal and wood charcoal are more recommended as the primary fuel in the gasification system.*

*Keywords: biomass, higher heating value, proximate analysis, thermogravimetric analysis, ultimate analysis*

**PENDAHULUAN**

Biomassa kayu merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang berpotensi besar dikembangkan sebagai bahan bakar alternatif, seiring dengan permintaan kebutuhan energi terus meningkat (Paranita, 2020). Karakterisasi energi biomassa umumnya dilakukan melalui analisis proksimat, analisis ultimat, dan penentuan nilai kalor, namun metode konvensional untuk analisis ultimat dan kalor bersifat rumit, mahal, serta memerlukan waktu yang panjang (Xing *et al.*, 2019). Analisis termogravimetri (TGA) menawarkan pendekatan yang lebih efisien, karena dapat menghasilkan data proksimat dari pengukuran kehilangan massa selama pemanasan (Park *et al.*, 2022). Data proksimat ini kemudian dapat dikonversi menjadi analisis ultimat menggunakan persamaan empirik, yang pada akhirnya memungkinkan prediksi nilai kalor biomassa kayu. Umumnya karakterisasi biomassa dengan analisis ultimat dan proksimat banyak berkaitan dengan nilai kalor untuk pembakaran, salah satunya pada gasifikasi biomassa. Penelitian ini bertujuan memanfaatkan TGA sebagai dasar perhitungan proksimat, ultimat, dan nilai kalor, sehingga diperoleh metode karakterisasi energi biomassa yang lebih cepat dan hemat biaya.

**METODE PENELITIAN**

*Bahan dan Alat*

Bahan yang digunakan Adalah kayu akasia (*Acacia mangium*), *gamal (Gliricidia sepium)*, arang batok kelapa (*Cocos nucifera*) dan arang kayu akasia yang berasal dari Lampung Selatan, Institut Teknologi Sumatera. Alat berupa mesin pencacah (crusher), blender, dan mesh tray tersedia di Laboratorium Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan.

*Desain Penelitian dan Analisa Data*

Penelitian yang dilakukan adalah preparasi biomassa untuk karakterisasi komponen *fixed carbon*, *volatile matter*, *ash content*, unsur C, H, O yang terdapat pada biomassa melalui uji ultimat dan proksimat.

Praktik pengujian menggunakan Thermogravimetric Analyzer (TGA, LABFIT, Apollo L, akurasi ±0,1 °C) untuk memperoleh data kehilangan massa akibat pemanasan, Bomb Calorimeter (PARR Automatic

Iseporibol Calorimeter Expanded System, “PARR” Calorimeter 6220, akurasi energi ±0,1%) untuk verifikasi nilai kalor, serta peralatan pendukung distilasi atau analisis komposisi sesuai kebutuhan.

Analisis proksimat dilakukan berdasarkan standar ASTM E870, meliputi pengukuran kadar air, *volatile matter*, *fixed carbon*, dan abu. Data proksimat yang diperoleh dari hasil TGA digunakan untuk menghitung analisis ultimat (C, H, O) dengan metode korelasi empiris sesuai acuan. Nilai kalor dihitung menggunakan persamaan empiris Dulong’s formula (4) berdasarkan hasil analisis ultimat, kemudian divalidasi dengan hasil pengukuran menggunakan *bomb calorimeter*.

Ultimat (%)

$$C = (FC \times 0,637) + (0,455 \times VM) \quad (1)$$

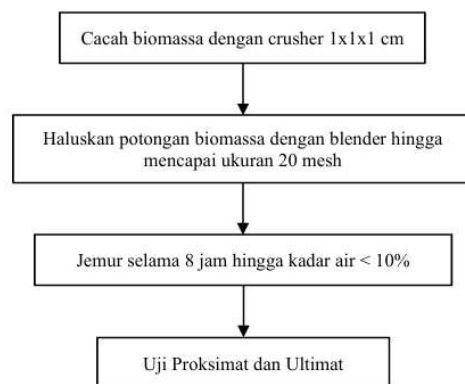
$$H = (FC \times 0,052) + (0,062 \times VM) \quad (2)$$

$$O = (FC \times 0,304) + (0,476 \times VM) \quad (3)$$

$$HHV = (0,3536 \times FC) + (0,1559 \times VM) - (0,0078 \times ash) \quad (4)$$

*Pelaksanaan Penelitian*

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Institut Teknologi Sumatera, dan karakterisasi di Laboratorium Instrumen, Bioenergy Engineering and Chemurgy, ITB, serta Laboratorium Karakterisasi Lanjut Yogyakarta (BRIN) melalui layanan ELSA-BRIN.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian Karakterisasi Biomassa

Pada Gambar 1. menjelaskan tahapan persiapan setiap sampel biomassa sebelum dilakukan uji proksimat untuk mengetahui

VM, abu, dan FC dan ultimat untuk menentukan kandungan unsur C, H, O.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Tabel 1. Karakterisasi biomassa Uji Proksimat dan Ultimat

Biomassa	Analisis Proksimat (%)			Analisis Ultimat (%)			HHV (MJ/kg)
	FC	VM	Ash	C	H	O	
Kayu akasia ( <i>Acacia mangium</i> )	17,09	64,03	18,88	40,02	4,86	35,67	18,56
Kayu gamal ( <i>Gliricidia sepium</i> )	12,15	76,38	2,77	42,49	5,37	40,05	7,70
Arang batok kelapa ( <i>Cocos nucifera</i> )	72,66	25,46	1,88	57,87	5,36	34,21	30,01
Arang kayu akasia	68,98	24,18	1,79	54,94	5,09	32,48	22,05

Keterangan: FC (fixed carbon atau karbon tetap), VM (Volatile Matter atau zat terbang), Ash (kadar abu).

Tabel 1. menyajikan hasil analisis proksimat (FC, VM, Ash), analisis ultimat (C, H, O), dan nilai kalor tinggi (HHV) dari kayu akasia, kayu gamal, arang batok kelapa, dan arang kayu akasia, yang digunakan untuk mengevaluasi dan membandingkan kualitas masing-masing biomassa. Analisis proksimat merupakan metode untuk menganalisis karakteristik biomassa. Komponen proksimat terdiri dari zat terbang (*volatile matter*), karbon tetap (*fixed carbon*), dan kadar abu (*ash content*). Data dari hasil analisis proksimat dapat digunakan untuk menghitung data ultimat biomassa (Ardila *et al.*, 2024), sehingga data proksimat *wet basis* perlu diubah terlebih dahulu menjadi *dry basis*. *Fixed carbon* paling besar terindikasi pada arang batok kelapa yaitu 72,66%, arang kayu 68,98%, kemudian kayu akasia dan gamal dibawah 20%. FC tinggi pada arang batok kelapa dan arang kayu menunjukkan kandungan karbon padat yang besar sehingga zona reduksi akan lebih dominan, menghasilkan gas CO dan H<sub>2</sub> lebih tinggi saat reaksi boudouard dan *water-gas shift* (Alwan, 2019). Ketika kadar karbon tetap meningkat, sebagian besar zat terbang yang banyak mengandung hidrogen dan oksigen telah berkurang banyak. Akibatnya komposisi dari karbon (C) meningkat dengan menurunnya kadar hidrogen (H) dan kadar oksigen (O) pada biomassa. Karbon tetap pada analisis proksimat berbanding lurus dengan komponen karbon pada analisis ultimat.

VM yang tinggi pada kayu akasia dan gamal menandakan pelepasan gas volatil besar saat pirolisis, sehingga nyala awal dan stabilitas api di zona oksidasi lebih mudah tercapai namun berpotensi menghasilkan tar lebih banyak (Narega *et al.*, 2022), sedangkan abu lebih tinggi

pada akasia berarti banyak padatan anorganik yang tersisa setelah pembakaran atau pirolisis (Puri *et al.*, 2024), dapat berisiko *slagging* atau *fouling* mengganggu permeabilitas *bed* pada alat (Alam *et al.*, 2021).

Dari hasil uji ultimat menggambarkan komposisi unsur C, H, O yang menentukan potensi energi kimia dan rasio stoikiometri reaksi saat gasifikasi. Unsur karbon paling besar pada arang batok kelapa yaitu 57,87%, kemudian arang kayu 54,94%, Kayu gamal (*Gliricidia sepium*) 42,49%, dan paling kecil pada kayu akasia sebesar 40,02%. Dari penelitian ini arang mengandung karbon diatas 50% baik arang batok kelapa maupun arang kayu, diikuti oleh kandungan VM yang rendah. Hal ini sesuai dengan ciri-ciri biomassa yang sudah melalui proses pirolisis, yaitu dekomposisi termal tanpa oksigen akan menghilangkan senyawa volatil yang kaya akan oksigen, sehingga residu yang dihasilkan kaya akan karbon, hal ini menunjukkan pola yang sama, ciri khas material yang sudah menjadi arang serupa dengan penelitian oleh (Hasibuan & Pardede, 2023). Setelah dikarbonisasi menjadi arang, sebagian besar air dan senyawa volatil tersebut terlepas, meninggalkan padatan yang komposisi utamanya karbon, sehingga secara fraksi massa arang jauh lebih banyak kandungan karbon daripada kayu mentahnya (Supriyanto & Ismanto, 2020). Sedangkan unsur karbon dari kayu akasia dan gamal terindikasi dibawah 50% hal ini sesuai dengan penelitian oleh (Camaraza-medina, 2025) bahwa umumnya karbon pada biomassa *hardwood* berkisar antara 48-52%.

Kayu akasia dan gamal punya H sekitar 4,86–5,37% dan O tinggi 35,67–40,05%, sedangkan arang batok dan arang kayu punya H

mirip ( $\pm 5\%$ ) tetapi O jauh lebih rendah, 34,21% dan 32,48% menunjukkan kayu mentah masih kaya gugus fungsional beroksigen (OH, CO, COOH) pada selulosa atau hemiselulosa, sedangkan arang sudah kehilangan sebagian besar senyawa volatil kaya oksigen akibat pirolisis sehingga O turun dan fraksi C relatif naik (Rusydi, 2019).

Berdasarkan hasil analisis HHV, pengaruh jenis biomassa dapat dilihat pada Tabel 1. Arang batok kelapa menunjukkan HHV tertinggi, mencapai 30,01 MJ/kg, demikian juga terjadi pada arang kayu sebesar 22,05 MJ/kg. Pada kedua arang ini, sebagian besar massa terdiri dari atom C (ikatan C–C dan C–H). Ikatan ini saat dioksidasi menjadi CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O bersifat sangat energetic (Mencarelli *et al.*, 2022), sejalan dengan berkurangnya gugus O dan komponen volatile sehingga (HHV) panas yang dilepas per kilogram menjadi lebih besar, energi potensial kimianya dilepas sebagai panas pembakaran (Rampe *et al.*, 2021). Arang kayu memiliki HHV sekitar 22 MJ/kg, lebih rendah daripada arang batok kelapa tetapi lebih tinggi dibanding kayu mentah akasia. Kenaikan HHV dibanding kayu menunjukkan bahwa proses pirolisis telah berhasil mengurangi *moisture* dan VM kaya oksigen, meningkatkan kandungan FC dan karbon ultimat di atas 50%. Namun, sedikit lebih rendahnya HHV dibanding arang batok kemungkinan terkait dengan perbedaan struktur pori, derajat karbonisasi dan komposisi mineral (abu), yang belum setinggi tempurung kelapa. (Febriani *et al.*, 2025) menunjukkan pola serupa pada arang tandan kosong dan cangkang sawit, temperatur karbonisasi lebih tinggi menghasilkan arang dengan FC lebih besar, volatil lebih rendah, dan nilai kalor yang lebih tinggi, yang menegaskan bahwa derajat karbonisasi adalah faktor utama peningkat HHV.

Kayu akasia memiliki HHV sekitar 18–19 MJ/kg (basis kering), yang sesuai dengan tipikal kayu keras tropis dengan kandungan karbon sekitar 40% dan oksigen sekitar 35–40%, yang berkaitan bahwa sebagian besar massa akasia masih berupa gugus selulosa–hemiselulosa–lignin yang kaya oksigen (Longui *et al.*, 2024), sehingga nilai HHV dapat lebih rendah dibandingkan arang, meskipun VM tinggi pada kayu gamal mendukung kemudahan penyalaan, keberadaan kelembapan dan senyawa volatil beroksigen menurunkan energi bersih per satuan massa (HHV) karena sebagian energi digunakan

untuk penguapan air dan pemutusan ikatan C–O/H–O (Nhuchhen & Afzal, 2017).

Pengaruh kadar abu berlawanan terhadap HHV dari biomassa, semakin tinggi kadar abu yang terdapat dalam bahan bakar, maka nilai HHV yang dihasilkan rendah. Untuk mengetahui kualitas dari syn-gas dari gasifikasi biomassa biasanya dapat dilihat dari HHV (Saputro *et al.*, 2023). Kayu akasia memiliki kadar abu tertinggi sebesar 18,88%, kayu gamal hanya mengandung abu 2,77%, sedangkan arang batok kelapa dan arang kayu masing masing 1,88% dan 1,79%. Abu yang tinggi berarti biomassa masih banyak mengandung mineral anorganik (silika, alkali atau alkali-tanah) yang tidak menyumbang energi, menyebabkan penurunan HHV per kg bahan bakar dan meningkatkan jumlah residu padat anorganik yang tertinggal setelah proses pembakaran sempurna dalam *gasifier* (alat pembakaran), berpotensi mempercepat pembentukan *slag* atau kerak dan menyebabkan *channeling* pada alat pembakaran (Wang *et al.*, 2025). Abu sangat rendah pada kayu gamal, arang batok kelapa, dan arang kayu mengindikasikan bahwa fraksi organik (C, H, O) mendominasi, sehingga porsi massa yang benar benar dapat terkonversi menjadi gas mampu bakar lebih besar (Puri *et al.*, 2024). Komposisi hidrogen (H) menunjukkan korelasi positif terhadap HHV dikarenakan hidrogen (H) dan karbon (C) memiliki entalpi pembakaran yang tinggi yang dapat dilepaskan melalui reaksi oksidasi bersifat eksotermis (Tao *et al.*, 2023).

## KESIMPULAN

Secara keseluruhan, hasil uji proksimat dan ultimat menunjukkan bahwa arang batok kelapa dan arang kayu memiliki kandungan karbon tetap dan nilai kalor tertinggi dengan kadar abu rendah, sehingga paling unggul dan paling layak digunakan sebagai bahan bakar pada proses gasifikasi, mampu menghasilkan energi lebih besar dengan potensi masalah operasional yang lebih kecil dibanding kayu akasia dan kayu gamal dengan nilai kalor dan kandungan karbonnya lebih rendah serta cenderung menghasilkan tar dan abu lebih tinggi.

Penelitian lanjutan disarankan untuk menambah variasi jenis biomassa lokal, dan analisis komposisi mineral abu.

**UCAPAN TERIMA KASIH**

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM-ITERA atas pendanaan penelitian (No. 1962f/IT9.2.1/PT.01.03/2024) tahun anggaran 2024. Terima kasih juga disampaikan kepada Program Studi Teknik Bioenergi dan Kemurgi, FTI-ITB, serta Laboratorium Karakterisasi Lanjut Yogyakarta (BRIN) melalui layanan ELSA-BRIN atas dukungan fasilitas analisis ultimat biomassa dalam penelitian ini.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Alam, M. T., Dai, B., Wu, X., Hoadley, A., & Zhang, L. (2021). A critical review of ash slagging mechanisms and viscosity measurement for low-rank coal and bio-slugs. *Front. Energy*, 15(1), 46–67. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11708-020-0807-8>
- Alwan, H. (2019). Model Gasifikasi Biomassa Menggunakan Pendekatan Kesetimbangan Termodinamika Stoikiometris Dalam Memprediksi Gas Produser. *Jurnal Integrasi Proses*, 8(1), 31. <https://doi.org/10.36055/jip.v8i1.5597>
- Ardila, Y. C., Figueroa, J. E. J., & Maciel, M. R. W. (2024). Mathematical models for predicting the higher heating value and ultimate analysis of biomass. *Industrial Crops and Products*, 208(October 2022), 117777. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117777>
- Camaraza-medina, Y. (2025). Proximate and ultimate analysis , higher heating value and inorganic chemical composition of woods from central region of Cuba. *Sustainable Chemistry One World*, 8(September), 100147. <https://doi.org/10.1016/j.scowo.2025.100147>
- Febriani, A. V., Hanum, F. F., Rahayu, A., & Setya, B. (2025). The Impact of Carbonization Temperature on The Quality of Empty Fruit Bunch Charcoal and Palm Kernel Charcoal for Co-Firing Application. *Sains Natural*, 15, 28–39. <https://doi.org/https://doi.org/10.31938/jsn.v15i1.766>
- Hasibuan, R., & Pardede, H. M. (2023). Pengaruh Suhu dan Waktu Pirolisis terhadap Karakteristik Arang dari Tempurung Kelapa Effect of Pyrolysis Temperature and Time on Characteristics of Coconut Shell Charcoal. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 12(1), 46–53. <https://doi.org/https://doi.org/10.32734/jtk.v12i1.8534>
- Longui, E. L., Lima, I. L. de, Ranzini, M., Barbosa, J. de A., Yamaji, F. M., Junior, H. de J. E., Júnior, F. G. da S., & Assumpção, P. A. de. (2024). Wood chemical characterization of Acacia mangium and Calophyllum brasiliense grown in plantation. *Research, Society and Development*, 2024, 1–13. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v13i12.46685>
- Mencarelli, A., Cavalli, R., & Greco, R. (2022). Heliyon Variability on the energy properties of charcoal and charcoal briquettes for barbecue. *Heliyon*, 8(March), e10052. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10052>
- Narega, S. O., Ysf, R. A., Aswan, A., Fatria, F., Erlinawati, E., & Hilwatullisan, H. (2022). Produksi Syngas Dari Proses Gasifikasi Biomassa Menggunakan Downdraft Gasifier Sebagai Gas Bakar Pada Motor Bakar Empat Tak. *Jurnal Pendidikan Dan Teknologi Indonesia (JPTI)*, 2(11), 469–474. <https://doi.org/https://doi.org/10.52436/1.jpti.245>
- Nhuchhen, D. R., & Afzal, M. T. (2017). HHV Predicting Correlations for Torrefied Biomass Using Proximate and Ultimate Analyses. *MDPI*. <https://doi.org/10.3390/bioengineering4010007>
- Paranita, D. (2020). Kombinasi Campuran Pelepah Kelapa Sawit dan Kulit Kacang Tanah sebagai Bahan Baku Pembuatan Biobriket. *Al Ulum Seri Sainstek*, VIII, 45–53. <https://doi.org/https://doi.org/10.47662/alulum.v8i2.203>
- Park, S., Jun, S., Cheol, K., Cho, L., Jeon, Y., Lee, C., & Kim, D. (2022).

- Thermogravimetric analysis-based proximate analysis of agro-byproducts and prediction of calorific value. *Energy Reports*, 8, 12038–12044. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.09.040>
- Puri, L., Hu, Y., & Naterer, G. (2024). Critical review of the role of ash content and composition in biomass pyrolysis. *Frontiers in Fuel, March*, 1–19. <https://doi.org/10.3389/ffuel.2024.1378361>
- Rampe, M. J., Santoso, I. R. S., Rampe, H. L., Tiwong, V. A., & Rorano, T. E. A. (2021). Study of Pore Length and Chemical Composition of Charcoal that Results from the Pyrolysis of Coconut Shell in Bolaang Mongondow, Sulawesi, Indonesia. *Karbala International Journal of Modern Science*, 8(1). <https://doi.org/10.33640/2405-609X.3208>.
- Rusydi, S. M. (2019). *Pyrotechnology 4 in 1 : Prinsip Dasar Teknologi Pirolisa Biomassa* (R. Hasibuan (ed.); 1st ed.). Lhokseumawe: Unimal Press.
- Saputro, M. A., Mochamad Syamsiro, Megaprastio, B., & Laksana, F. F. (2023). Kajian Teknologi Gasifikasi Biomassa/Sampah Untuk Produksi Syngas dan Listrik Berkelanjutan. *Al Ulum LPPM Universitas Al Washliyah Medan*, 11(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.47662/alul.um.v11i2.461>
- Supriyanto, S., & Ismanto, I. (2020). Analisa Pengaruh Holding Time pada Proses Karburasi dalam Media Arang Kayu Jati terhadap Kekerasan Baja ST-37. *Jurnal Mesin Nusantara*, 3(1), 29–36. <https://doi.org/https://doi.org/10.29407/jmn.v3i1.14636>
- Tao, J., Pan, L., Yao, J., Liu, L., & Chen, Q. (2023). Reliability Analysis of HHV Prediction Models for Organic Materials Using Bond Dissociation Energies. *Polymer MDPI*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polymer15193862>
- Wang, Y., Dula, M., & Kraszkievicz, A. (2025). *A review: problems related to ash deposition and deposit formation in low-power biomass-burning heating devices*. *October*, 1–23. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2025.1652415>
- Xing, J., Luo, K., Wang, H., Gao, Z., & Fan, J. (2019). A comprehensive study on estimating higher heating value of biomass from proximate and ultimate analysis with machine learning approaches. *Energy*, 188, 116077. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116077>