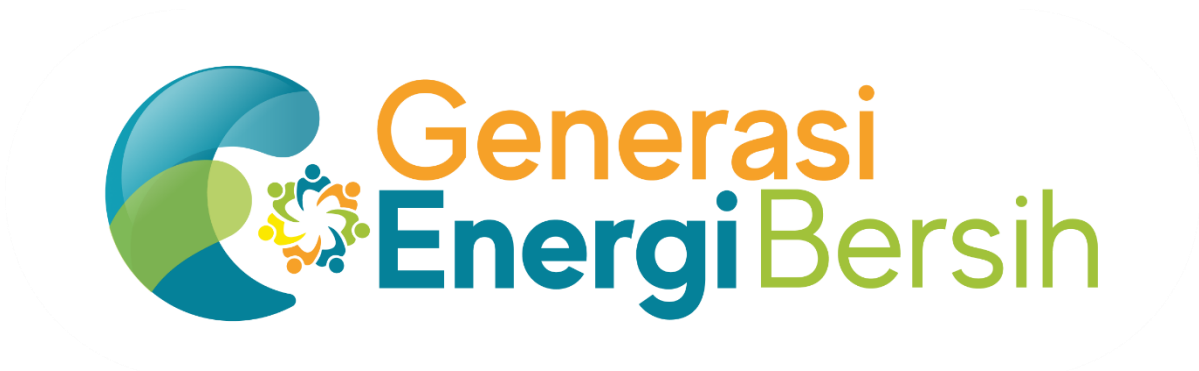


**WANI PYRO: DIGITALISASI PEMBERDAYAAN PETANI DALAM KONVERSI
LIMBAH PERTANIAN MENJADI ENERGI TERBARUKAN MELALUI PIROLISIS
CERDAS TEROPTIMASI MACHINE LEARNING DI PROVINSI JAWA TENGAH**



Diajukan untuk Lomba Esai Nasional

CLEANOvation

“Youth Action for a Sustainable Energy Future”

Nama Ketua : Hanif Yusran Makarim
Nama Anggota : 1) Bondan Attoriq
: 2) Muhammad Daffa Anrizky
Instansi Asal : Institut Teknologi Bandung
Email & Nomor WA : haaniifysrn@gmail.com & 08979177745
Subtema Esai : Inovasi Sosial dan Pemberdayaan Komunitas Energi
Tahun : 2025

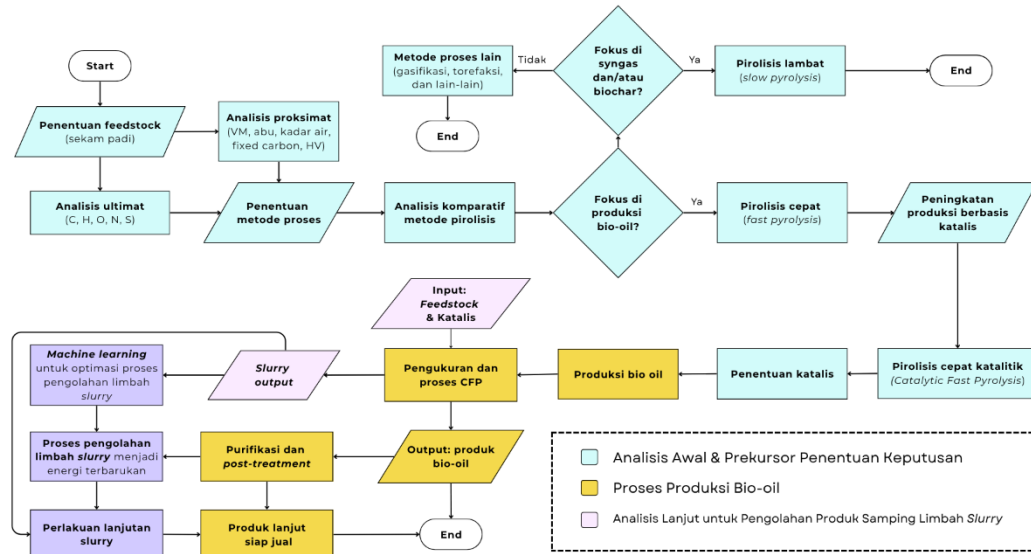
Pendahuluan

Limbah pertanian di Indonesia kian menumpuk tanpa adanya solusi komprehensif, padahal menyimpan potensi energi terbarukan yang belum dioptimalkan. Hal ini tercermin dari *food loss and waste* (FLW) yang menyumbang 40,9% dari total limbah nasional (SIPSN, 2023). Penumpukan ini berujung pada kerugian material sebesar 23-48 juta ton dan kerugian ekonomi setara 213-551 triliun rupiah setiap tahunnya (Pusparisa, 2020). Komoditas padi, sebagai pokok pangan nasional, menjadi kontributor terbesar (44%) dari total FLW nasional 2000-2019, ekuivalen ~12-21 juta ton limbah gabah per tahunnya (Ahdiat, 2023). Sebagai aktor utama, provinsi Jawa Tengah mencatatkan produksi gabah kering giling (GKG) sebesar 9,08 juta ton pada 2023 (BPS, 2024). Dengan proporsi 20% sekam, potensi limbah sekam padi capai 1,8 juta ton/tahun.

Meninjau sisi lain, transisi energi Indonesia belum progresif, perkembangan stagnan di 12,8% dengan rerata pertumbuhan selama 5 tahun terakhir hanya 0,096% per tahun (Setiawan, 2023). Hal ini tidak sejalan bahkan dengan target minimum di angka 19-21% (DPR-RI, 2023). Isu multidimensional ini butuh solusi yang tidak hanya solutif tapi juga bekerja secara efisien dengan melibatkan komponen masyarakat. Menanggapi urgensi ini, kami mengusulkan “WANI PYRO” selaku sistem konversi limbah pertanian berbasis pirolisis cerdas terintegrasi *machine learning*, yang mendorong efisiensi energi dan pengelolaan limbah tani dengan pemberdayaan akar rumput di wilayah produksi pangan utama Indonesia.

Berporos pada komunitas energi akar rumput, studi ini berfokus pada pengembangan sistem energi terbarukan yang unggul secara teknis dan adaptif secara sosial. Solusi dirancang melalui integrasi pirolisis teroptimasi dan model prediktif berbasis *machine learning* untuk penanganan residu *slurry* pasca-pirolisis secara efisien, menuju sistem energi komunitas yang rendah limbah dan mendukung transisi energi nasional dimulai dari wilayah pertanian intensif di Provinsi Jawa Tengah.

Pembahasan



Gambar 1. Alur Kerja WANI PYRO

Pendekatan implementasi menggabungkan data primer dan sekunder secara komplementer. Data primer diklasifikasikan menjadi aspek teknis yang berfokus pada pemodelan *machine learning* untuk pengambilan keputusan dalam pemrosesan (dicontohkan pada residu *slurry* pirolisis) dan karakterisasi sekam padi, dan sosial berupa analisis respon tanggapan masyarakat tani via sebaran *Google Form*, target responden adalah warga yang sering beraktivitas tani (baik pelaku usaha, petani, maupun mahasiswa jurusan relevan) yang pernah/sedang tinggal >1 tahun di Pulau Jawa (**Tabel 4**). Hal ini bertujuan untuk mengetahui tanggapan dan penerimaan masyarakat tani terhadap sistem ini.

Merujuk pada **Gambar 1**, sistem WANI PYRO terdiri atas tahapan analisis awal, produksi *bio-oil*, dan pemrosesan produk samping *slurry*. Secara sederhana, sistem ini mengintegrasikan pirolisis sekam padi dengan pengolahan lanjut *slurry* berbasis *machine learning*, guna menghasilkan bioenergi secara efisien dan minim limbah dalam skema sirkular.

Analisis Awal

Tahap analisis awal dimulai dengan analisis proksimat (**Tabel 1**) dan ultimat (**Tabel 2**) untuk mengidentifikasi metode proses yang tepat. Berdasarkan data primer analisis, diperoleh data yang cocok (VM, abu, kadar air, dan %O) untuk perlakuan lanjut berupa pirolisis selaku metode dekomposisi termal bahan organik untuk penghilangan oksigen (Tsai dkk., 2007). Dengan tujuan tinggi *bio-oil*, maka dipilih *catalytic fast pyrolysis* (CFP). Katalis kemudian diteliti, dan untuk memperoleh *bio-oil* murni dengan waktu tercepat dipilih HZSM-5 selaku zeolit berbasis hierarki dengan porositas sekunder yang baik. Hasil yang diproduksi kemudian dimurnikan kembali dengan proses lanjutan purifikasi.

Tabel 1. Analisis Proksimat Sekam Padi

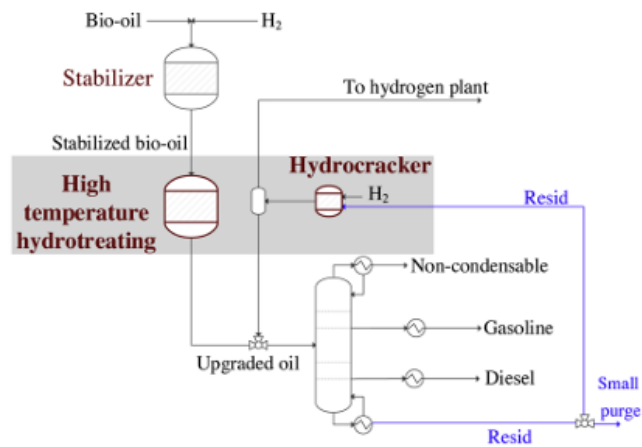
Parameter	Nilai
Volatile Matter (%)	68.20
Ash Content (%)	16.10
Moisture Content (%)	12.67
Fixed Carbon (%)	15.70
Heating Value (KJ/Kg)	15,175

Tabel 2. Analisis Ultimat Sekam Padi

Parameter	Nilai
Kadar Karbon (%)	45,2
Kadar Hidrogen (%)	5,8
Kadar Oksigen (%)	47,6
Kadar Nitrogen (%)	1,02
Kadar Sulfur (%)	0,21

Proses Lanjut: Pemurnian Bio-oil

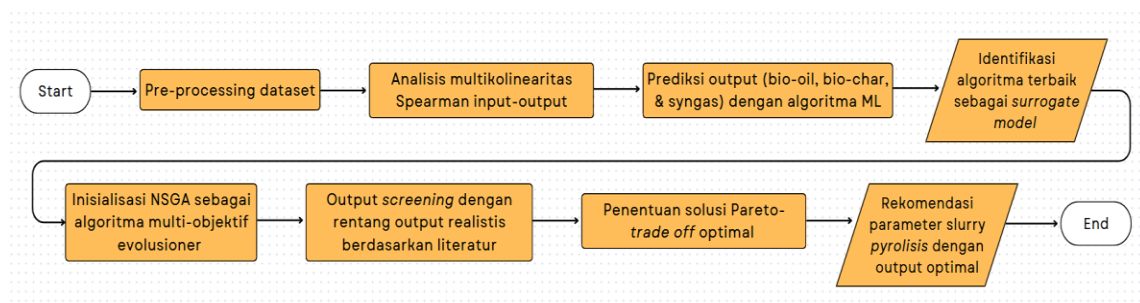
P Tahap purifikasi bio-oil dilakukan melalui proses **hydrotreating**, yaitu reaksi stabilisasi berbasis hidrogen untuk mengurangi kadar oksigen berlebih via **hidrodeoksigenasi** (Lachos-Perez et al., 2023). Proses ini menggunakan katalis logam mulia, logam sulfida, atau logam transisi seperti Si dan Al yang sesuai dengan basis HZSM-5 (Sanna et al., 2015). Proses dilakukan pada tekanan 1–30 MPa dan suhu 200–500 °C, dalam reaktor batch, downflow, atau semi-kontinu (Cheng et al., 2018)



Gambar 2. Diagram Proses *Hydrotreating* (Wang dkk., 2021)

Merujuk pada **Gambar 2**, tahap pertama adalah stabilisasi karbonil/karboksil pada 100–300 °C, disusul reaksi cracking dan deoksigenasi pada 350–400 °C (Hansen et al., 2020). Pengaturan suhu, tekanan, dan rasio katalis penting untuk memastikan hasil akhir bio-oil berkualitas tinggi. Meskipun hydrotreating menghasilkan limbah dan risiko deaktivasi katalis, pendekatan berbasis machine learning pada pengolahan slurry mampu meminimalkan dampak tersebut dan mendukung sistem zero waste.

Kerangka Kerja Pengolahan Slurry Terintegrasi *Machine Learning*

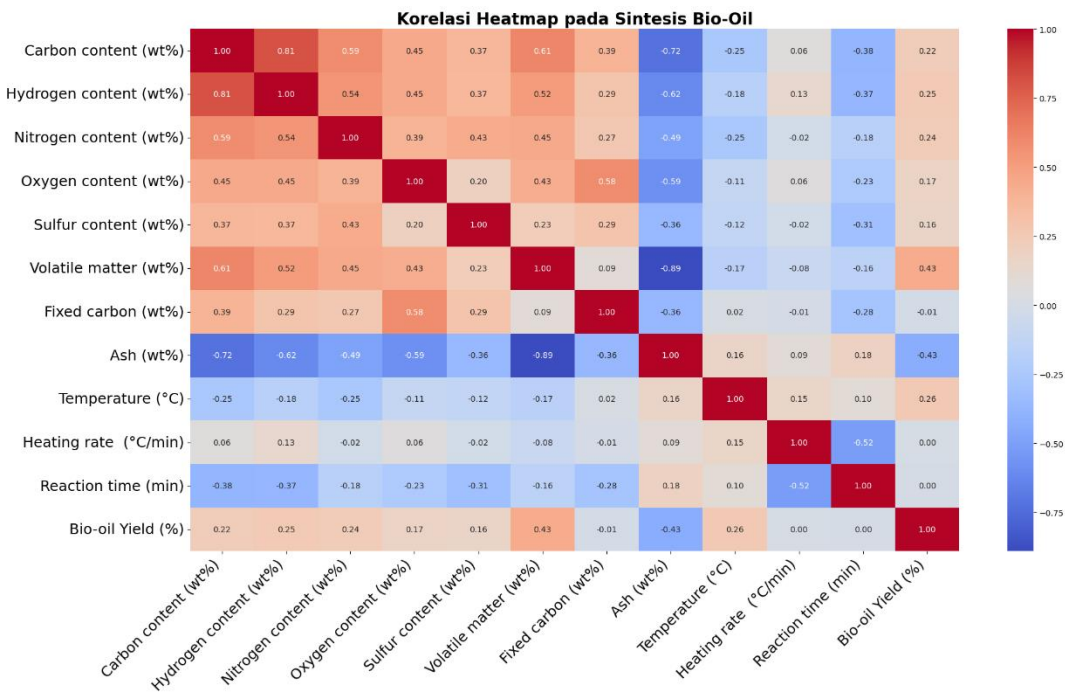


Gambar 3. Alur Kerja Pengolahan *Slurry* terintegrasi ML

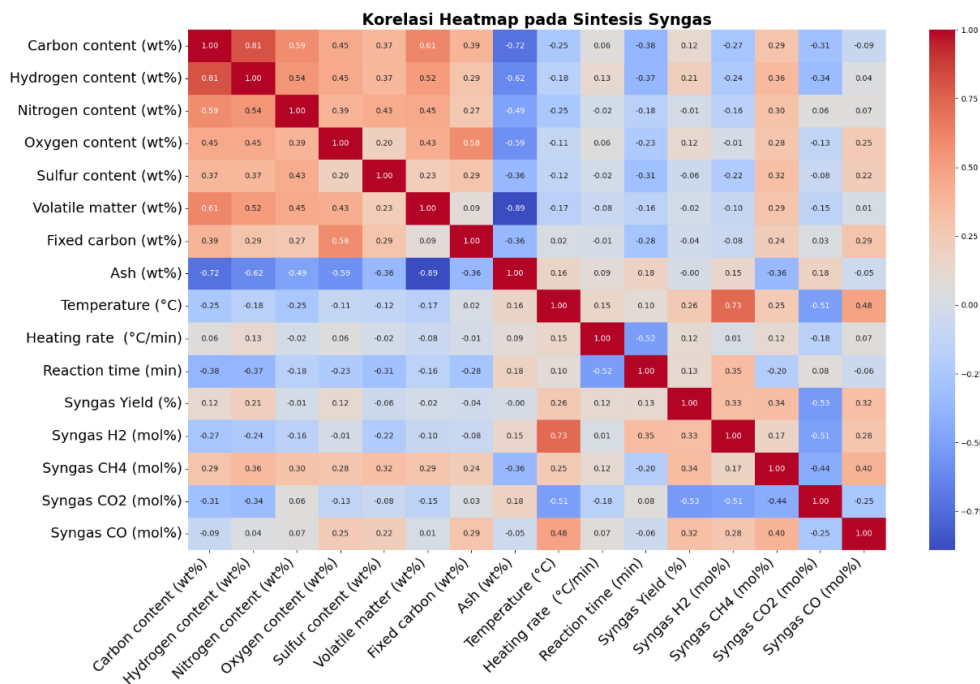
Diagram ini menunjukkan alur komputasional dari *pre-processing* data, analisis korelasi input-output, pemodelan *surrogate* menggunakan algoritma ML, hingga optimasi multi-objektif dengan NSGA-II. Output disaring berdasarkan batas realistis literatur dan solusi Pareto digunakan untuk merekomendasikan parameter proses slurry pyrolysis yang menghasilkan *bio-oil*, *bio-char*, dan *syngas* secara optimal.

Kerangka kerja tersebut memastikan bahwa proses optimasi pirolisis pada *sludge* berlangsung secara simultan, terorganisasi, dan efisien.

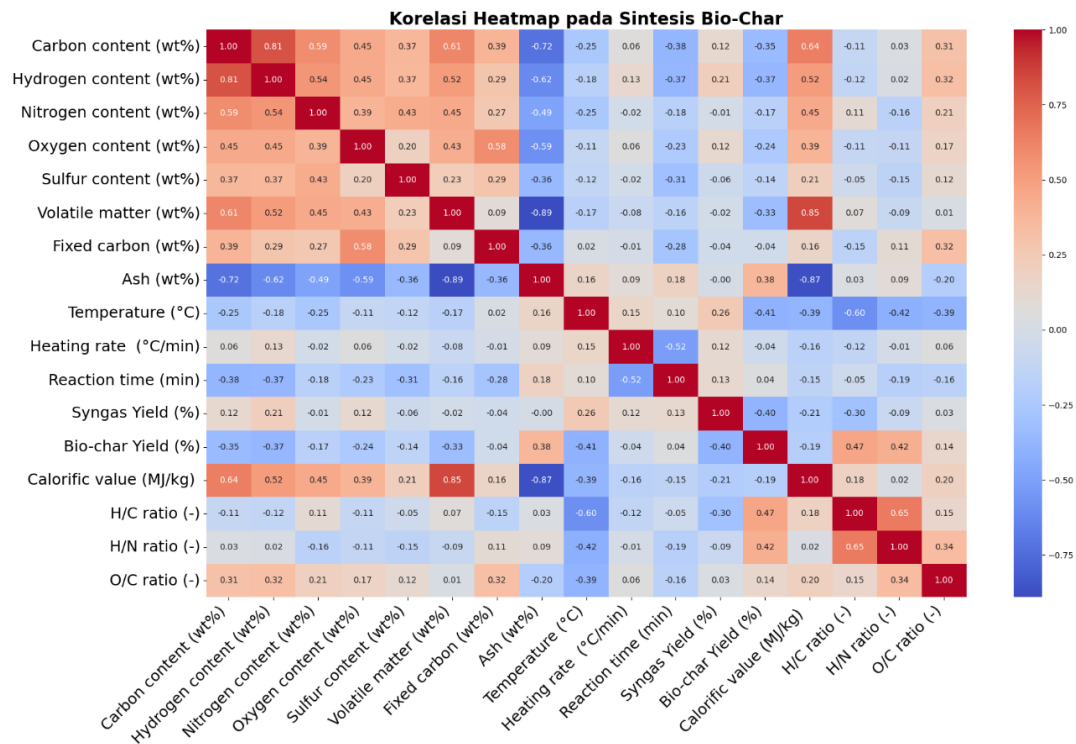
Karakterisasi dan Analisis Multikolinearitas Pirolisis pada Slurry



Gambar 4. Multikolinearitas Pirolisis *Slurry* (Bio-oil)



Gambar 5. Multikolinearitas Pirolisis *Slurry* (Syn-gas)



Gambar 6. Multikolinearitas Pirolisis *Slurry* (Bio-char)

Berdasarkan *heatmap* pada sintesis bio-oil, terlihat bahwa variabel yang paling memengaruhi *yield bio-oil* adalah *volatile matter* ($r = 0.43$), diikuti oleh *hydrogen content* ($r = 0.25$) dan *nitrogen content* ($r = 0.24$). Ini menunjukkan bahwa *feedstock* dengan kandungan volatil dan hidrogen tinggi cenderung menghasilkan *bio-oil* dalam jumlah lebih besar. Sebaliknya, *ash content* berkorelasi negatif kuat terhadap *bio-oil* ($r = -0.43$), yang menunjukkan bahwa kandungan abu yang tinggi menurunkan konversi menjadi produk cair. Temuan ini selaras dengan penelitian oleh Jerzak *dkk.* (2024), yang mencatat bahwa suhu sedang dan bahan baku kaya volatil seperti *sludge* dan *algae* cenderung memaksimalkan produksi *bio-oil* hingga $>35\%$, dengan *yield* menurun drastis pada temperatur tinggi karena dekomposisi lanjutan. *Heatmap* korelasi pada sintesis *bio-oil* menunjukkan bahwa variabel yang paling berkorelasi positif terhadap *yield bio-oil* adalah *volatile matter* ($r = 0.43$), diikuti oleh *hydrogen content* ($r = 0.25$), *nitrogen content* ($r = 0.24$), dan *carbon content* ($r = 0.22$). Hal tersebut mendukung konsep senyawa organik volatil seperti lipid, protein, dan karbohidrat dalam *sludge* merupakan prekursor utama *bio-oil* melalui mekanisme *thermal cracking* dan *volatilization*. Jerzak *dkk.* (2024) juga menyatakan bahwa fraksi volatil tinggi

mempercepat pelepasan komponen ringan, sementara hidrogen berkontribusi terhadap kestabilan radikal bebas dalam reaksi dekomposisi termal, menghasilkan senyawa aromatik dan hidrokarbon cair yang lebih stabil.

Pada *heatmap* korelasi sintesis *bio-char*, tampak bahwa *yield bio-char* berkorelasi positif terhadap *ash content* ($r = 0.38$), mengindikasikan bahwa fraksi anorganik dan karbon stabil tidak mudah terdekomposisi selama pirolisis dan cenderung terakumulasi dalam fasa padat. Sebaliknya, hubungan negatif dengan temperatur ($r = -0.39$) mencerminkan kecenderungan degradasi termal dari *sludge* organik menjadi *bio-oil* dan *syngas* seiring waktu dan suhu meningkat. Sifat energi *bio-char* ditunjukkan melalui *calorific value* yang berkorelasi positif kuat dengan *carbon content* ($r = 0.64$), serta negatif terhadap *ash content* ($r = -0.87$). Rasio atomik H/C ($r = -0.60$) dan O/C (-0.39) menunjukkan korelasi negatif kuat terhadap temperatur, menegaskan tingkat karbonisasi dan deoksigenasi *bio-char* yang meningkat pada suhu tinggi (Vershina, dkk., 2022).

Analisis Performansi *Machine Learning* sebagai *Surrogate Model*

Tabel 3. Analisis Performansi ML sebagai *Surrogate Model*

Target	Best Model	R ² Score	RMSE	MSE	MAPE
Calorific value (MJ/kg)	ExtraTrees	0.961892	0.589850	0.347923	5.4316e-02
O/C ratio (-)	ExtraTrees	0.852925	0.151034	0.022811	4.8897e-01
Bio-char Yield (%)	ExtraTrees	0.845811	6.894357	47.532160	2.2996e-01
Syngas CO ₂ (mol%)	ExtraTrees	0.812220	8.363523	69.948509	2.3576e-01
Bio-oil Yield (%)	ExtraTrees	0.760497	6.015574	36.187130	2.0994e-01
Syngas H ₂ (mol%)	ExtraTrees	0.704197	6.930259	48.028490	1.5418e+15
H/C ratio (-)	LGB	0.644423	0.185279	0.034328	3.3422e-01
Syngas Yield (%)	LGB	0.637678	6.770320	45.837227	2.5237e-01
Syngas CO (mol%)	ExtraTrees	0.609670	4.368070	19.080033	8.4602e+14
H/N ratio (-)	ExtraTrees	0.584614	1.684675	2.838130	1.8680e-01
Syngas CH ₄ (mol%)	ExtraTrees	0.572841	4.366069	19.062555	1.3804e+15

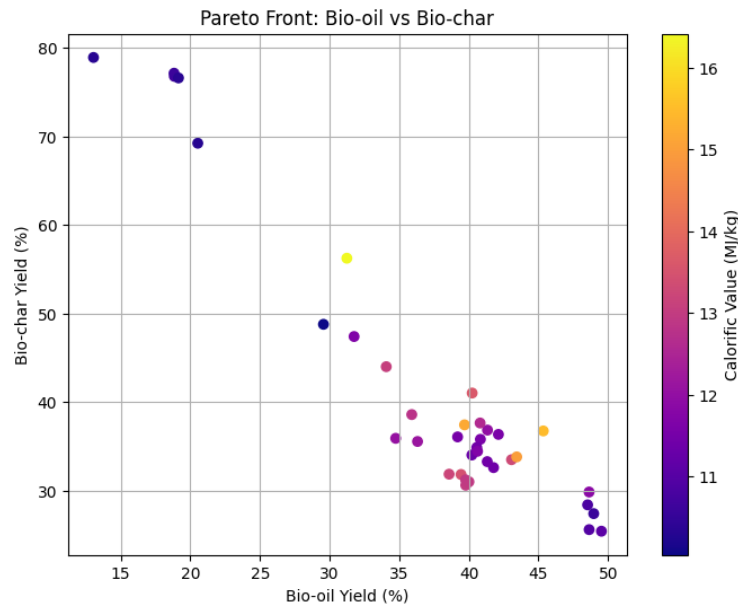
Dalam optimasi multiobjektif slurry pyrolysis, **machine learning (ML)** berperan sebagai *surrogate model* untuk menggantikan simulasi fisik yang kompleks dan mahal secara komputasi. Pirolisis sludge melibatkan interaksi nonlinier berbagai parameter—seperti temperatur, waktu reaksi, dan karakteristik feedstock—yang sulit dimodelkan secara konvensional. ML memungkinkan prediksi output seperti **bio-oil yield**, **bio-char properties**, dan **syngas composition** hanya berdasarkan data historis

Dari evaluasi model, **Extra Trees Regressor** menunjukkan kinerja terbaik dengan **R² hingga 0,96** dan **RMSE < 1 MJ/kg** untuk nilai kalor. Model ini juga unggul

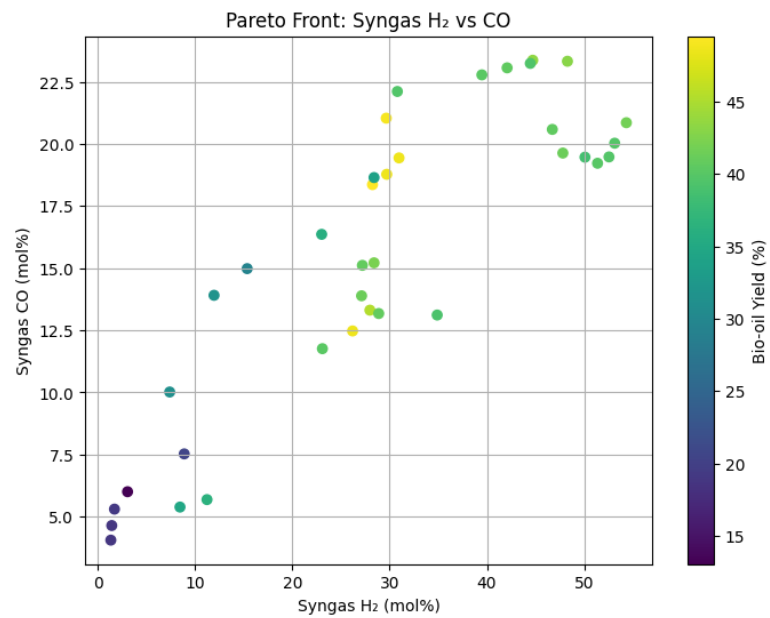
pada prediksi O/C ratio dan syngas CO_2 , berkat kemampuannya menangani data noise tinggi dan korelasi fitur. **LightGBM** efektif untuk prediksi H/C ratio dan syngas yield, meski performanya relatif lebih rendah. Beberapa prediksi, seperti syngas CH_4 dan CO , masih menunjukkan error tinggi sehingga memerlukan penguatan preprocessing atau eksplorasi model alternatif.

Optimasi Multi-Objektif Luaran Energi Terbarukan

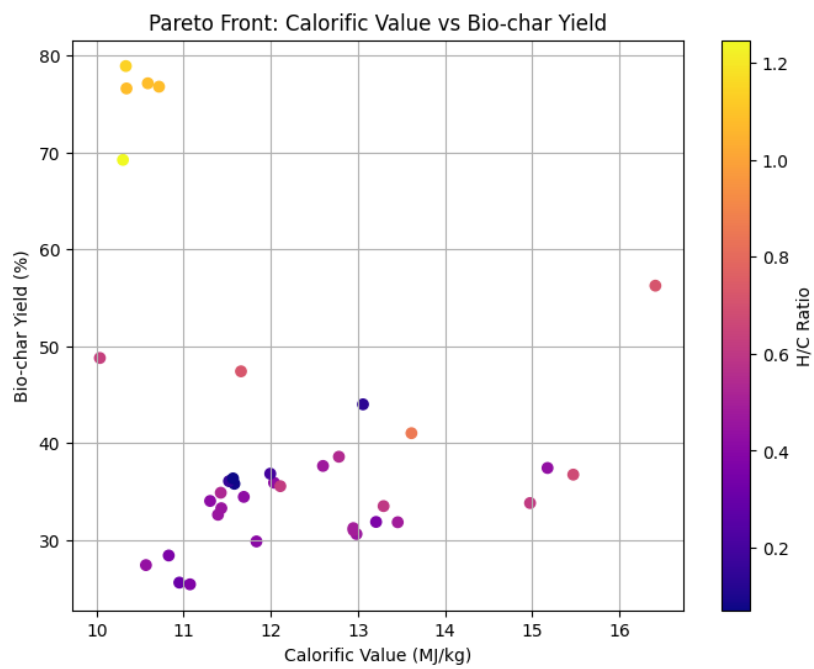
Diagram di bawah merepresentasikan berbagai *trade-off* antar output utama hasil slurry pyrolysis berbasis sewage sludge. Plot 2D menunjukkan hubungan kompromis antara *bio-oil yield* vs *bio-char yield*, *syngas H_2* vs *CO*, dan *calorific value* vs *bio-char yield*, dengan pewarnaan berdasarkan parameter output lainnya seperti *H/C ratio* atau *bio-oil yield*. Plot van Krevelen menggambarkan relasi karakterisasi atomik (H/C vs O/C) terhadap kualitas energi, sementara plot 3D memvisualisasikan keseimbangan antara tiga produk utama (*bio-oil*, *bio-char*, *syngas*) terhadap *total yield* sebagai indikator efisiensi konversi.



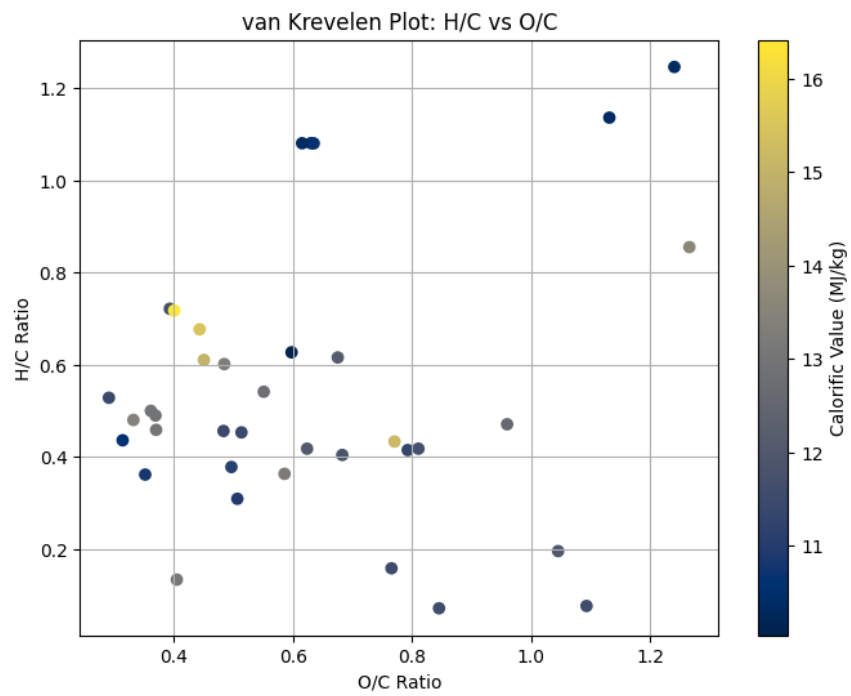
Gambar 7. Pareto Front 1



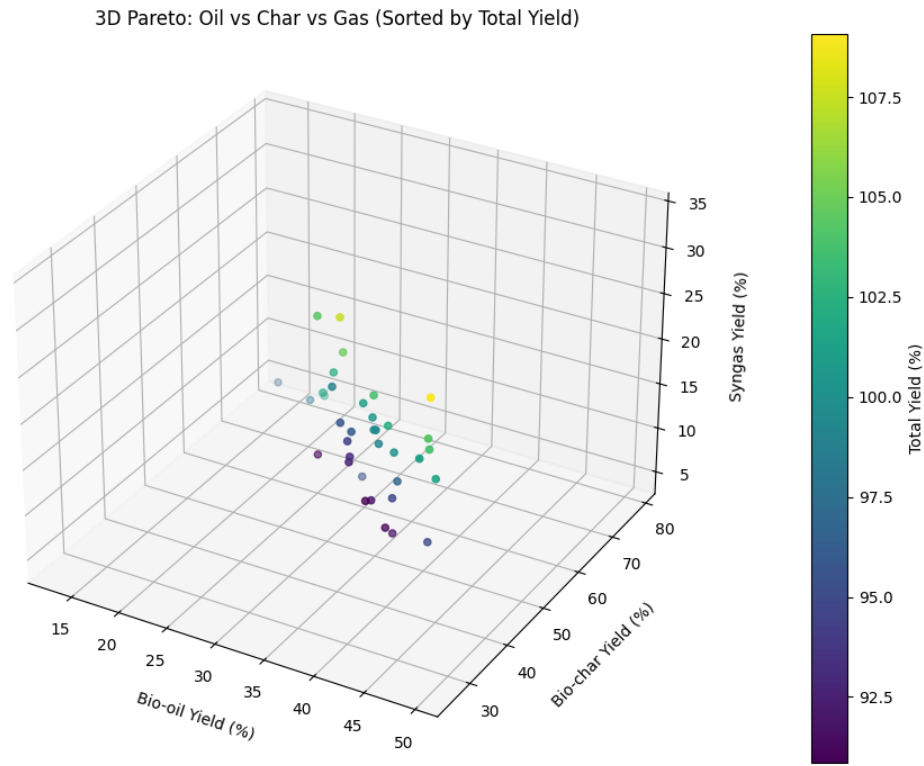
Gambar 8. Pareto Front 2



Gambar 9. Pareto Front 3



Gambar 10. Plot van Krevelen



Gambar 11. Interpretasi 3D Pareto

Solusi Teroptimasi pada Proses *Slurry Pyrolysis*

Tabel 4. Rekomendasi Parameter Input-Output pada *Slurry Pyrolysis*

SOLUSI	INPUT									
	Ultimate analysis (sewage sludge)					Proximate analysis (sewage sludge)			Operating conditions	
	Carbon content (wt%)	Hydrogen content (wt%)	Nitrogen content (wt%)	Oxygen content (wt%)	Sulfur content (wt%)	Volatile matter (wt%)	Fixed carbon (wt%)	Ash (wt%)	Temperature (°C)	Heating rate (°C/min)
Top Bio-oil Yield	50.468	5.751	7.349	33.628	0.810	62.967	0.944	12.058	1030.556	58.121
Top Bio-char Yield	37.277	4.055	9.562	3.815	1.216	47.997	14.755	35.800	227.400	9.738
Balanced Yield (=100%)	50.567	6.232	7.368	32.266	1.985	64.708	7.393	13.204	562.612	9.600
Top Calorific Value	35.239	4.694	1.257	36.691	0.344	71.720	1.414	16.425	307.477	9.201
Minimum O/C Ratio	36.862	5.212	8.585	15.926	0.996	60.797	7.947	28.505	765.670	10.729

OUTPUT									
Bio-oil		Syngas				Bio-char			
Bio-oil Yield (%)	Syngas Yield (%)	Syngas H ₂ (mol%)	Syngas CH ₄ (mol%)	Syngas CO ₂ (mol%)	Syngas CO (mol%)	Bio-char Yield (%)	Calorific value (MJ/kg)	H/C ratio (-)	H/N ratio (-)
49.519	29.419	28.240	13.726	28.631	18.362	25.432	11.072	0.378	4.921
13.042	4.586	3.071	4.680	83.476	6.001	78.918	10.336	1.136	10.785
42.121	21.515	28.399	14.629	32.557	15.215	36.362	11.567	0.071	3.917
31.237	7.825	7.402	8.946	51.065	10.015	56.254	16.416	0.718	10.622
40.566	25.290	46.719	10.601	21.585	20.585	34.885	11.426	0.528	6.229

Tabel di atas menyajikan kombinasi parameter input (komposisi sludge, analisis proksimat, dan kondisi operasi) yang menghasilkan output terbaik untuk setiap tujuan optimasi: bio-oil yield tertinggi, bio-char tertinggi, nilai kalor maksimum, dan rasio O/C terendah. Selain menunjukkan nilai masing-masing variabel input dan output, tabel ini menyoroti trade-off karakteristik produk dan relevansi neraca massa antar fraksi bio-oil, syngas, dan bio-char.

Respon Warga

Secara keseluruhan, sebanyak 64 responden masyarakat tani merespon baik ide WANI PYRO sebagaimana terlampir pada **Tabel 5**.

Penutup

Secara keseluruhan, WANI PYRO menawarkan pendekatan teknologi terintegrasi untuk mengatasi limbah pertanian dan memajukan transisi energi nasional. Dengan memanfaatkan limbah sekam padi melalui CFP dan optimasi berbasis machine learning, sistem ini menghasilkan bio-oil berkualitas sekaligus mengelola produk samping *slurry* secara sirkuler dan efisien. Sebagaimana terlampir, responden masyarakat tani pun memberikan respon baik atas usulan ini, menjadikan WANI PYRO tidak hanya solutif secara teknologi tetapi juga adaptif terhadap pembangunan komunitas pertanian dan energi yang berkelanjutan pada skala akar rumput Indonesia, utamanya di Jawa Tengah.

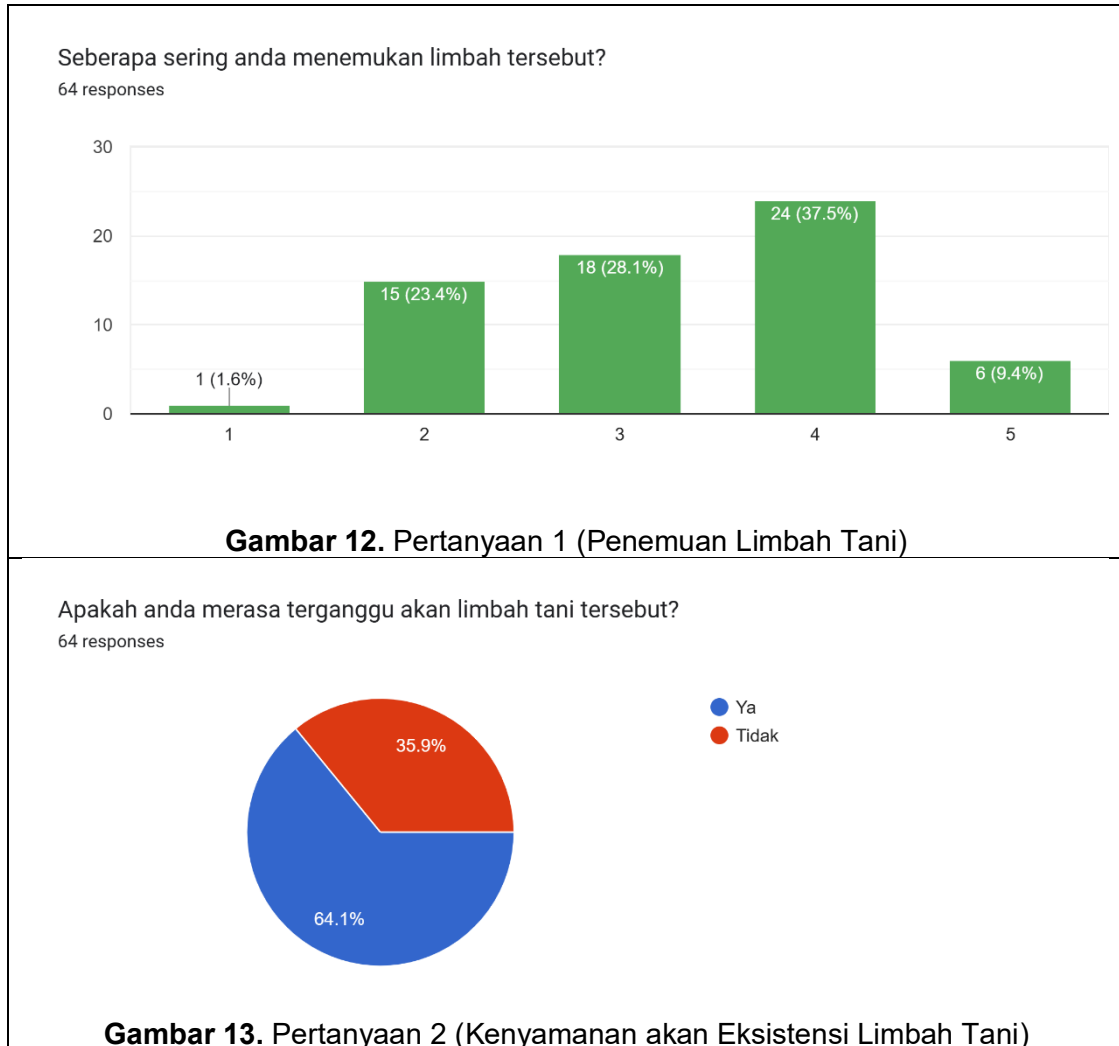
DAFTAR PUSTAKA (APA STYLE)

- Badan Pusat Statistik. (2024). *Produksi Padi menurut Provinsi (ton), 2023*.
<https://www.bps.go.id/indicator/55/177/1/produksi-padi-menurut-provinsi.html>
- Cheng, S., Wei, L., Alsowij, M. R., Corbin, F., Julson, J., Boakye, E., & Raynie, D. (2018). In situ hydrodeoxygenation upgrading of pine sawdust bio-oil to hydrocarbon biofuel using Pd/C catalyst. *Journal of the Energy Institute*, 91(2), 163-171.
- Hansen, S., Mirkouei, A., & Diaz, L. A. (2020). A comprehensive state-of-technology review for upgrading bio-oil to renewable or blended hydrocarbon fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118, 109548.
- Jahromi, H., & Agblevor, F. A. (2018). Hydrodeoxygenation of aqueous-phase catalytic pyrolysis oil to liquid hydrocarbons using multifunctional nickel catalyst. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(39), 13257-13268
- Jerzak, W., Acha, E., & Li, B. (2024). Comprehensive review of biomass pyrolysis: conventional and advanced technologies, reactor designs, product compositions and yields, and Techno-Economic analysis. *Energies*, 17(20), 5082. <https://doi.org/10.3390/en17205082>
- Lachos-Perez, D., Martins-Vieira, J. C., Missau, J., Anshu, K., Siakpebru, O. K., Thengane, S. K., & Bertuol, D. A. (2023). Review on biomass pyrolysis with a focus on bio-oil upgrading techniques. *Analytica*, 4(2), 182-205.
- Mu, W., Ben, H., Du, X., Zhang, X., Hu, F., Liu, W., & Deng, Y. (2014). Noble metal catalyzed aqueous phase hydrogenation and hydrodeoxygenation of lignin-derived pyrolysis oil and related model compounds. *Bioresource technology*, 173, 6-10.
- Pan, F., Lu, X., Zhu, Q., Zhang, Z., Yan, Y., Wang, T., & Chen, S. (2015). Direct synthesis of HZSM-5 from natural clay. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(7), 4058-4066.
- Sanna, A., Vispute, T. P., & Huber, G. W. (2015). Hydrodeoxygenation of the aqueous fraction of bio-oil with Ru/C and Pt/C catalysts. *Applied catalysis B: environmental*, 165, 446-456.
- Shahbeik, H., Rafiee, S., Shafizadeh, A., Jeddi, D., Jafary, T., Lam, S. S., Pan, J., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (2022). Characterizing sludge pyrolysis by machine learning: Towards sustainable bioenergy production from wastes. *Renewable Energy*, 199, 1078-1092. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.022>

- Tsai, W. T., Lee, M. K., & Chang, Y. (2007). Fast pyrolysis of rice husk: Product yields and compositions. *Bioresource technology*, 98(1), 22-28.
- Vershinina, K., Nyashina, G., & Strizhak, P. (2022). Combustion, pyrolysis, and gasification of Waste-Derived fuel slurries, Low-Grade liquids, and High-Moisture waste: review. *Applied Sciences*, 12(3), 1039. <https://doi.org/10.3390/app12031039>
- Wang, H., Meyer, P. A., Santosa, D. M., Zhu, C., Olarte, M. V., Jones, S. B., & Zacher, A. H. (2021). Performance and techno-economic evaluations of co-processing residual heavy fraction in bio-oil hydrotreating. *Catalysis Today*, 365, 357-364.

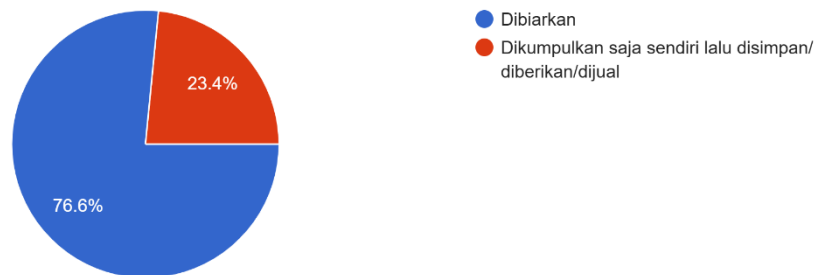
LAMPIRAN

Tabel 5. Lampiran Gambar Data Primer dan Keterangan Singkat



Biasanya, Anda apakan limbah tersebut?

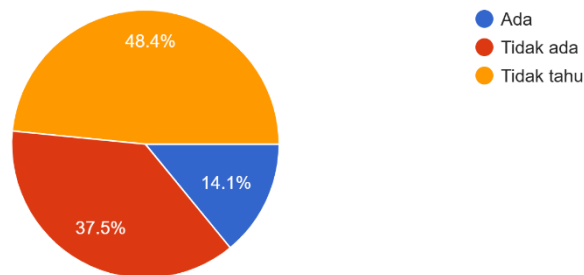
64 responses



Gambar 14. Pertanyaan 3 (Perlakuan lanjut limbah tani)

Apakah di sekitar Anda ada tempat/gerakan yang mengumpulkan dan/atau mengolah limbah tersebut?

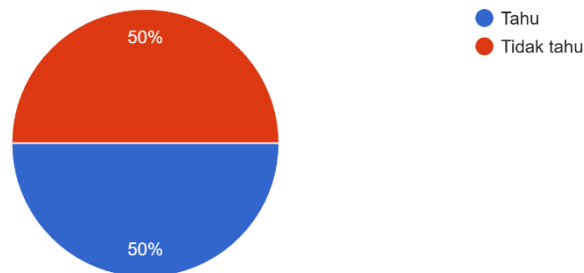
64 responses



Gambar 15. Pertanyaan 4 (Pemetaan pengelolaan limbah sekitar)

Apakah anda tahu apakah limbah tersebut dapat diolah menjadi bahan bakar seperti biodiesel?

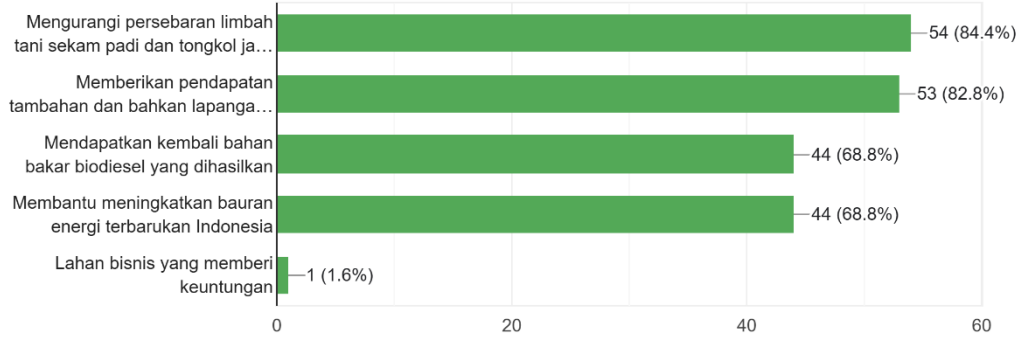
64 responses



Gambar 16. Pertanyaan 5 (Kesadaran & wawasan pengolahan lanjut limbah)

Jika diberikan ruang untuk membantu kami mengolah menjadi biodiesel, apa manfaat yang anda harapkan?

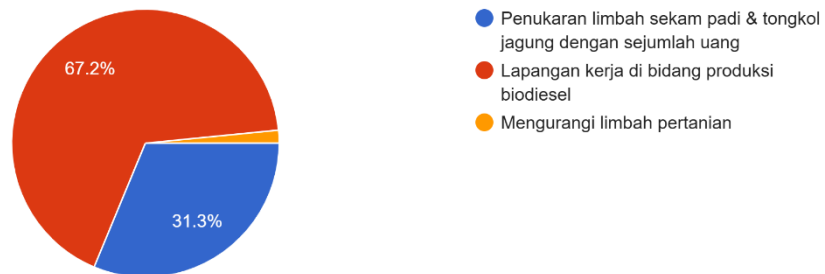
64 responses



Gambar 17. Pertanyaan 6 (Bentuk keinginan untuk membantu)

Dalam bentuk apa, ruang untuk kontribusi yang Anda harapkan?

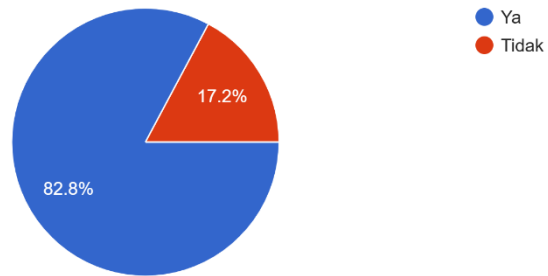
64 responses



Gambar 18. Pertanyaan 7 (Harapan ruang kontribusi)

Mempertimbangkan manfaat tersebut, apabila kami membuka ruang untuk Anda membantu proses pengolahannya, apakah Anda bersedia berkontribusi?

64 responses



Gambar 19. Pertanyaan 8 (Keterbukaan untuk membantu)

Tabel 6. Lampiran Target dan Hiperparameter Model ML Terbaik

Target	Best Model	Hiperparameter
Calorific value (MJ/kg)	ExtraTrees	n_estimators= 500, max_depth= 65,min_samples_split= 2, min_samples_leaf= 1, random_state=42
O/C ratio (-)	ExtraTrees	n_estimators= 200, max_depth= 65, min_samples_split=2, min_samples_leaf= 1, random_state=42
Bio-char Yield (%)	ExtraTrees	n_estimators= 400, max_depth=35, min_samples_split= 2, min_samples_leaf= 1,random_state=42
Syngas CO ₂ (mol%)	ExtraTrees	n_estimators= 600, max_depth= 20, min_samples_split= 2, min_samples_leaf= 1, random_state=42
Bio-oil Yield (%)	ExtraTrees	n_estimators= 400, max_depth=50, min_samples_split= 2, min_samples_leaf=1, random_state=42
Syngas H ₂ (mol%)	ExtraTrees	n_estimators= 300, max_depth= 35, min_samples_split= 2, min_samples_leaf= 1, random_state=42
H/C ratio (-)	LGB	n_estimators= 200, learning_rate= 0.1, max_depth= 20, min_child_samples= 6, num_leaves= 60, random_state=42
Syngas Yield (%)	LGB	n_estimators= 300, learning_rate= 0.01, max_depth= 20, min_child_samples=7, num_leaves= 50, random_state=42
Syngas CO (mol%)	ExtraTrees	n_estimators= 400, max_depth= 20, min_samples_split= 4, min_samples_leaf= 1, random_state=42
H/N ratio (-)	ExtraTrees	n_estimators= 200, max_depth= 80, min_samples_split= 2, min_samples_leaf= 1, random_state=42
Syngas CH ₄ (mol%)	ExtraTrees	n_estimators= 400,max_depth= 80, min_samples_split= 4, min_samples_leaf= 1, random_state=42

Daftar Tautan Sintaks/Coding dan Dataset

[https://colab.research.google.com/drive/1z-](https://colab.research.google.com/drive/1z-FWC88qALBJLxWNYkQ9KzjeW6bNj8hC?usp=sharing)

[FWC88qALBJLxWNYkQ9KzjeW6bNj8hC?usp=sharing](https://colab.research.google.com/drive/1z-FWC88qALBJLxWNYkQ9KzjeW6bNj8hC?usp=sharing)

https://docs.google.com/spreadsheets/d/17nvxNZJpU8gks4WMI04Jap3lQ_zSGsq4IWP7seSI/edit?usp=sharing

Lampiran 1a. Biodata Ketua Tim

HANIF YUSRAN MAKARIM

Bandung, Indonesia | +62 8979177745 | haaniifysrn@gmail.com [linkedin.com/in/hanif-yusran-makarim-0aa565274/](https://www.linkedin.com/in/hanif-yusran-makarim-0aa565274/)

EDUCATION

BANDUNG INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Aug 2022 - Present

Agricultural Engineering, School of Life Sciences and Technology – Engineering Program

- Awardee of Ganesha Karsa (Ganesha Awards for Scientific Research and Social Humanities) 2024.

PROJECTS & PAPER

- (2025) Project ALFRED: Floating CCUS Dome Integrated with Microalgae for Co-firing and Circular Carbon Reduction in Offshore Oil and Gas Industries, **won** 3rd Place in Paper and Poster BOREYES International Energy Fair 2025.
- (2025) CHARLIE: Development of Active Packaging Teknologi based on nano-Hydroxyapatite Nanomaterial (n-HAP) from *Pangasius* Catfish for Extending Shelf Life of Agroindustrial Product in Indonesia, **published** in **Journal of Food Industrial Technology** (JoFIT) vol. 2 no. 1, January 2025 (page 14-26)
- (2024) CYRIL: An Installation of Green Infrastructure for Industrial Wastewater and Carbon Dioxide Valorization System Implemented via Green Wall Panel and Anaerobic Digester using *Chlorella vulgaris* for a Renewable Source of Electricity in FMCG Industrial Area, **won** the **Gold Medal** at SICLUS International 2024.
- (2024) CLAIRE: Integration of a Cellulose-based Nanocomposite with Anthocyanin Biofilm from Dragon Fruit Skin (*Hylocereus costaricensis*) for Intelligent Packaging to Enhance Shelf Life and Indicate Quality of Agroindustry Products, **won** the **Best Pitching** of Idea Pitching International Agroindustry Competition 2024.
- (2024) Production of Omega-3-enriched Health Supplement for Reducing Risk of Cardiac Arrhythmia and Anti-Inflammatory Action from Tuna Fish Waste in Sukabumi with Implementation of *Ultrasonic Assisted Extraction* (UAE) Method, **won** the **Silver Medal** for Paper at **National** Diponegoro Science Competition (DSC) 2024.
- Mentor for multiple projects (Advance Learning #2 SRE ITB 23/24, Kingmakers Team as the Winner of GSIC 2023, etc.).

Lampiran 1b. Biodata Anggota 1

BONDAN ATTORIQ

Bandung, Indonesia | +62 81225944037 | bondanatr123@gmail.com |
[linkedin.com/in/bondan-attoriq-775320320](https://www.linkedin.com/in/bondan-attoriq-775320320)

EDUCATION

BANDUNG INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Aug 2024 - Present

Metallurgical Engineering, Faculty of Mining and Petroleum Engineering

PROJECTS & PAPER

- (2025) Optimization Of Rate Of Penetration (Rop) In Enhanced Geothermal System (Egs) Drilling Based On Multi-model Machine Learning With 30 Driving Factors, **won** 4th Place in Paper and Poster BOREYES International Energy Fair 2025.
- (2025) PRECISE: Pemodelan Prediktif Emisi Gas Rumah Kaca di Pulau Jawa Berbasis Multi-Machine Learning, **won 1st** Place in National Essay Competition (NEC) IYREF 2025
- (2025) Upcycling Plastic Waste into Supercapacitor-Integrated Hybrid Photovoltaic (PV) Cells: Sustainable Framework for Waste Management and Renewable Energy Efficiency Waste to Energy, **won 3rd** Place in Essay Competition Indonesia Chemical Engineering Event (I-CHALLENGE) 2025
- (2025) EGSmart 1.0: Enhanced Geothermal System (EGS) Drilling Optimization Based on Multi-Model Machine Learning with 30 Driving Factors, **currently** finalist Renewable Energy Innovation Competition Reenergize Summit 2025
- (2025) Data-Driven Optimization and Generative Design of Metal-Organic Frameworks (MOFs) for Carbon Capture Using Machine Learning and Metaheuristic Algorithm, **currently** semi-finalist in APECX Paper and Poster Competition 2025

Lampiran 1c. Biodata Anggota 2

MUHAMMAD DAFFA ANRIZKY

Bandung, Indonesia | +62 83865605880 | muhammad.daffaanrizky@gmail.com
<http://www.linkedin.com/in/muhammad-daffa-anrizky>

EDUCATION

BANDUNG INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Aug 2022 - Present

Bioenergy and Chemurgy Engineering, Faculty of Industrial Engineering

PROJECTS & PAPER

- (2025) Project ALFRED: Floating CCUS Dome Integrated with Microalgae for Co-firing and Circular Carbon Reduction in Offshore Oil and Gas Industries, **won** 3rd Place in Paper and Poster BOREYES International Energy Fair 2025.

Lampiran 2. Hasil Turnitin Keseluruhan Essay

https://drive.google.com/drive/folders/1yoe5XW2oZT9SzAts1cz1tu6_1qsTJYc?usp=sharing