

Produksi Humic-Like Substances dari Ampas Tebu melalui Proses Hidrotermal Sekuensial Asam-Alkali

Berliana Putri¹⁾ dan Ratna Sri Harjanti^{1,*)}

¹⁾Program Studi Teknologi Rekayasa Kimia Industri, Politeknik LPP Yogyakarta

^{*)} Corresponding author: rsh@polteklpp.ac.id

Abstrak

Ampas tebu merupakan limbah lignoselulosa yang melimpah dan berpotensi dikonversi menjadi produk bernilai tambah berupa senyawa humat. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh variasi konsentrasi KOH terhadap rendemen dan karakteristik produk humic-like substances dari ampas tebu setelah pretreatment HCl. Ampas tebu dikeringkan, dihaluskan hingga lolos ayakan 60 mesh, kemudian dipretreatment menggunakan HCl 0,1 N dengan rasio padatan terhadap larutan 1:10 (b/v) pada suhu 200 °C selama 4 jam. Residu hasil pretreatment diekstraksi secara hidrotermal menggunakan KOH dengan konsentrasi 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; dan 1,25 M pada suhu 200 °C selama 4 jam. Filtrat diasamkan menggunakan HCl hingga pH 1–2, kemudian endapan dicuci dan dikeringkan. Produk dianalisis berdasarkan rendemen, kadar air, FTIR, dan uji aplikasi awal pada tanaman kangkung. Rendemen meningkat dari 1,82% pada 0,25 M menjadi 39,33% pada 1,25 M, dengan massa produk tertinggi 2,7531 g dari 7 g bahan baku. Kadar air produk sebesar 2,88%, lebih rendah dibandingkan ampas tebu awal sebesar 8,50%. Spektrum FTIR menunjukkan keberadaan gugus O–H, C=O, C=C aromatik, C–H alifatik, dan C–O yang mengindikasikan karakteristik kimia menyerupai senyawa humat. Uji aplikasi awal secara visual menunjukkan tanaman dengan perlakuan asam humat memiliki pertumbuhan lebih cepat, jumlah daun lebih banyak, dan warna daun lebih hijau dibandingkan kontrol. Pada kondisi penelitian yang diuji, konsentrasi KOH 1,25 M memberikan rendemen tertinggi dan produk dengan karakteristik FTIR yang paling lengkap, tetapi efektivitas sebagai pembenah tanah masih memerlukan pengujian kuantitatif dan karakterisasi lanjutan.

Kata kunci: ampas tebu; asam humat; hidrotermal alkali; KOH; FTIR

Abstract

Sugarcane bagasse is an abundant lignocellulosic residue with potential to be converted into value-added humic-like products. This study aimed to determine the effect of KOH concentration on the yield and characteristics of humic-like substances obtained from sugarcane bagasse after HCl pretreatment. Bagasse was dried and milled to pass a 60-mesh sieve, followed by pretreatment with 0.1 N HCl at a solid-to-liquid ratio of 1:10 (w/v) at 200 °C for 4 h. The pretreated residue was subjected to alkaline hydrothermal extraction using KOH at 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, and 1.25 M at 200 °C for 4 h. The filtrate was acidified with HCl to pH 1–2, and the precipitate was washed and dried. Products were evaluated for yield, moisture content, FTIR characteristics, and preliminary application to water spinach. Yield increased from 1.82% at 0.25 M to 39.33% at 1.25 M, with the highest product mass of 2.7531 g obtained from 7 g of feedstock. Product moisture content was 2.88%, lower than the initial bagasse moisture content of 8.50%. FTIR spectra indicated O–H, C=O, aromatic C=C, aliphatic C–H, and C–O groups, indicating chemical characteristics resembling humic substances. Preliminary visual observations showed faster growth, more leaves, and greener leaves in plants treated with the humic product than in the control. Under the tested conditions, 1.25 M KOH produced the highest yield and the most complete FTIR characteristics; however, its effectiveness as a soil conditioner requires quantitative testing and further characterization.

Keywords: sugarcane bagasse; humic acid; alkaline hydrothermal; KOH; FTIR

PENDAHULUAN

Ampas tebu merupakan limbah padat hasil samping industri gula yang jumlahnya melimpah dan masih banyak dimanfaatkan secara terbatas sebagai bahan bakar boiler, pakan ternak, atau dibuang. Padahal, ampas tebu tersusun atas selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang termasuk biomassa lignoselulosa dan berpotensi dikonversi menjadi senyawa humat. Pemanfaatan biomassa tersebut dapat meningkatkan nilai tambah limbah sekaligus mendukung pengelolaan sumber daya yang lebih berkelanjutan. Produk humat memiliki gugus fungsi oksigen yang berperan dalam interaksi dengan tanah dan unsur hara, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai pembenah tanah.

Proses humifikasi alami berlangsung sangat lambat, sehingga teknologi humifikasi buatan diperlukan untuk mempercepat pembentukan senyawa yang memiliki karakteristik menyerupai asam humat. Proses hidrotermal merupakan salah satu pendekatan yang dapat mengonversi biomassa menjadi humic-like substances dalam waktu relatif singkat. Pada kondisi hidrotermal, komponen lignoselulosa mengalami hidrolisis, depolimerisasi, dehidrasi, kondensasi, polimerisasi, dan aromatisasi. Kondisi basa terutama berperan dalam depolimerisasi lignin dan pembentukan struktur aromatik serta gugus beroksigen pada produk humat (Yang et al., 2019; Shao et al., 2023) (Ischia et al., 2026).

Efektivitas ekstraksi dipengaruhi oleh kondisi proses, termasuk suhu, waktu, ukuran partikel, jenis biomassa, dan konsentrasi alkali. KOH dapat meningkatkan pelarutan fraksi lignin dan senyawa humat sehingga fraksi humic-like substances lebih mudah diekstraksi. Li dan Yuan (2021) menunjukkan bahwa penambahan KOH dapat memengaruhi rendemen dan karakteristik asam humat, sedangkan Song et al., (2025) menunjukkan bahwa konsentrasi alkali berpengaruh terhadap pembentukan dan struktur produk humat dari komponen lignoselulosa.

Strategi pretreatment asam sebelum ekstraksi basa juga berpotensi meningkatkan aksesibilitas biomassa. Perlakuan asam dapat menghidrolisis sebagian hemiselulosa dan membuka struktur lignoselulosa sehingga tahap ekstraksi basa menjadi lebih efektif. Penelitian Shao et al., (2025) menunjukkan bahwa kombinasi kondisi asam dan basa dapat meningkatkan hasil humifikasi biomassa. Penelitian Yang et al., (2025) juga menunjukkan bahwa proses air heating–alkaline hydrothermal mampu menghasilkan rendemen artificial humic acid yang tinggi dari biomassa limbah. Meskipun demikian, kajian yang secara khusus mengombinasikan pretreatment HCl dengan variasi konsentrasi KOH pada ampas tebu masih terbatas (Nurlina et al., 2018).

Produk hidrotermal tidak selalu identik dengan asam humat alami, sehingga istilah humic-like substances atau hydrothermal humic acid lebih tepat digunakan. Identifikasi gugus fungsi dapat dilakukan menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), sedangkan kadar air digunakan sebagai salah satu parameter karakteristik fisik produk. Dalam penelitian ini, variasi KOH 0,25–1,25 M digunakan untuk memperoleh kondisi dengan rendemen tertinggi sekaligus mengevaluasi karakteristik produk yang dihasilkan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi konsentrasi KOH terhadap rendemen dan karakteristik humic-like substances dari ampas tebu hasil pretreatment HCl, mengetahui karakteristik produk berdasarkan kadar air dan FTIR, serta mengevaluasi secara awal potensi aplikasi produk terhadap pertumbuhan tanaman kangkung.

METODE

Persiapan bahan baku dilakukan dengan mencuci ampas tebu menggunakan akuades, mengeringkannya pada 60–70 °C selama 24 jam, menghaluskannya, kemudian mengayak hingga diperoleh ukuran 60 mesh. Sebanyak 7 g ampas tebu kering diberikan perlakuan awal menggunakan HCl 0,1 N dengan rasio padatan terhadap larutan 1:10 (b/v). Campuran diproses dalam reaktor hidrotermal pada 200 °C selama 4 jam, kemudian didinginkan, disaring, dicuci hingga pH mendekati netral, dan dikeringkan.

Residu hasil perlakuan awal selanjutnya diekstraksi secara hidrotermal menggunakan larutan KOH dengan variasi konsentrasi 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; dan 1,25 M dengan rasio padatan terhadap larutan 1:15 (b/v). Ekstraksi dilakukan pada 200 °C selama 4 jam. Setelah reaksi selesai, campuran disaring untuk memperoleh filtrat yang mengandung fraksi humat terlarut sebagai kalium humat.

Filtrat kemudian dipresipitasi menggunakan HCl 0,1 N secara bertahap hingga pH 1–2 dan didiamkan selama 12–24 jam. Endapan yang terbentuk disaring, dicuci dengan akuades hingga pH netral, kemudian dikeringkan pada 40–60 °C. Rendemen dihitung dari perbandingan massa produk kering terhadap massa awal ampas tebu dikalikan 100%.

Karakterisasi produk meliputi pengukuran kadar air dan analisis FTIR pada rentang 4000–400 cm^{-1} . FTIR digunakan secara kualitatif untuk mengidentifikasi gugus fungsi utama yang berhubungan dengan karakteristik humic-like substances, meliputi O–H, C=O, C=C aromatik, C–H alifatik, dan C–O. Uji aplikasi awal dilakukan pada tanaman kangkung dengan membandingkan perlakuan produk humat dan kontrol. Pengamatan dilakukan

secara visual terhadap pertumbuhan vegetatif, jumlah daun, warna daun, dan ketahanan tanaman setelah tidak disiram selama satu minggu. Karena jumlah perlakuan dan ulangan terbatas, hasil uji aplikasi disajikan secara deskriptif dan tidak digunakan untuk menarik kesimpulan statistik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh konsentrasi KOH terhadap rendemen

Hasil ekstraksi menunjukkan bahwa kenaikan konsentrasi KOH diikuti peningkatan rendemen produk. Data rendemen pada seluruh perlakuan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rendemen produk hasil ekstraksi ampas tebu pada berbagai konsentrasi KOH

Konsentrasi KOH (M)	Ukuran partikel (mesh)	Massa produk (g)	Rendemen (%)
0,25	60	0,1272	1,82
0,50	60	0,2432	3,47
0,75	60	1,6352	23,36
1,00	60	2,3232	33,19
1,25	60	2,7531	39,33

Rendemen meningkat dari 1,82% pada KOH 0,25 M menjadi 39,33% pada KOH 1,25 M. Peningkatan paling jelas terjadi ketika konsentrasi dinaikkan dari 0,50 M menjadi 0,75 M. Pada konsentrasi yang lebih tinggi, peningkatan rendemen tetap berlangsung tetapi cenderung lebih landai. Kondisi 1,25 M menghasilkan 2,7531 g produk dari 7 g bahan baku. Hasil ini menunjukkan bahwa pada rentang konsentrasi yang diuji, jumlah ion OH^- yang lebih tinggi mendukung pelarutan dan pelepasan senyawa organik yang memiliki karakteristik humat dari matriks biomassa.

Kecenderungan tersebut sejalan dengan prinsip ekstraksi alkali, yaitu kondisi basa dapat memutus sebagian ikatan pada matriks lignoselulosa dan meningkatkan kelarutan fraksi humat. Kondisi basa juga mendukung depolimerisasi lignin dan pembentukan struktur aromatik yang menjadi bagian penting dari humic-like substances (Yang et al., 2019); Li & Yuan, 2021). Hasil penelitian ini juga konsisten dengan laporan bahwa kombinasi perlakuan asam dan basa dapat meningkatkan humifikasi biomassa lignoselulosa Shao et al., (2025). Namun, rendemen tertinggi tidak dengan sendirinya menunjukkan kemurnian tertinggi karena perhitungan rendemen didasarkan pada massa produk terhadap massa awal bahan dan belum dilengkapi analisis kemurnian.

Dengan demikian, konsentrasi KOH 1,25 M dapat dipandang sebagai kondisi terbaik dalam rentang perlakuan yang diuji berdasarkan parameter rendemen. Penetapan kondisi optimum secara menyeluruh tetap perlu mempertimbangkan karakteristik kimia dan kemurnian produk, bukan hanya massa produk yang diperoleh.

Kadar air produk

Kadar air digunakan sebagai parameter pendukung untuk mengevaluasi karakteristik fisik produk. Perbandingan kadar air bahan awal dan produk hasil ekstraksi ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan kadar air ampas tebu awal dan produk hasil ekstraksi

Sampel	Kadar air (%)
Ampas tebu awal	8,50
Produk hasil ekstraksi	2,88

Produk hasil ekstraksi memiliki kadar air 2,88%, sedangkan ampas tebu awal memiliki kadar air 8,50%. Dengan demikian, terjadi penurunan kadar air sebesar 5,62 poin persentase. Penurunan tersebut berkaitan dengan rangkaian proses ekstraksi, pencucian, dan pengeringan yang mengurangi kandungan air pada bahan.

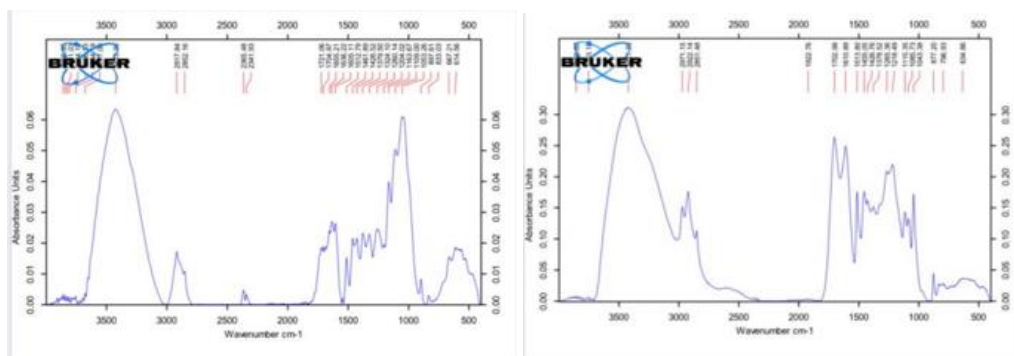
Kadar air yang lebih rendah dapat mendukung stabilitas dan kemudahan penanganan produk selama penyimpanan. Li dan Yuan (2021) menjelaskan bahwa kadar air merupakan salah satu faktor yang memengaruhi kestabilan bahan humat. Meskipun demikian, kadar air dalam penelitian ini belum cukup untuk menentukan mutu keseluruhan produk karena belum dilakukan pengujian seperti kadar abu, komposisi unsur, total acidity, atau kapasitas tukar kation.

Karakteristik FTIR

Analisis Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) dilakukan untuk mengidentifikasi perubahan gugus fungsi pada ampas tebu sebelum dan sesudah proses hidrotermal sekuensial HCl–KOH. Pada penelitian ini, sampel A0 merupakan ampas tebu awal, sedangkan sampel A4 merupakan produk hasil ekstraksi menggunakan KOH 1,25 M. Konsentrasi 1,25 M digunakan sebagai sampel produk karena menghasilkan rendemen tertinggi pada rentang konsentrasi KOH yang diuji. Spektrum kedua sampel tersebut kemudian dibandingkan dengan spektrum asam humat yang dilaporkan pada jurnal *Extraction of Humic Acid from Lignite by KOH-Hydrothermal* sebagai spektrum pembanding.

Tabel 3. Pita FTIR utama produk hasil ekstraksi

Daerah bilangan gelombang (cm^{-1})	Hasil penelitian	Interpretasi
3400–3500	O–H	Gugus hidroksil, termasuk karakter fenolik/karboksilat
3000–2800	2927; 2851	C–H alifatik
1720–1700	1702	C=O, karbonil/karboksil
1620–1600	1611	C=C aromatik
1515–1500	1513	Struktur aromatik yang berkaitan dengan lignin/humic-like substances
1265–1043	1265; 1218; 1115; 1085; 1043	C–O fenol, alkohol, dan eter



Gambar 1. Perbandingan spektrum FTIR ampas tebu awal (A0), produk hasil ekstraksi KOH 1,25 M (A4), dan spektrum asam humat dari jurnal pembandingan

Berdasarkan Gambar 1, spektrum FTIR sampel A0 dan A4 menunjukkan adanya beberapa pita serapan pada daerah bilangan gelombang yang berkaitan dengan gugus fungsi hidroksil, karbonil, struktur aromatik, gugus C–H alifatik, dan C–O. Pada sampel A4 terlihat pita serapan yang melebar pada daerah sekitar 3400–3500 cm^{-1} yang berkaitan dengan vibrasi ulur gugus O–H. Gugus tersebut dapat berasal dari gugus hidroksil pada senyawa fenolik maupun alkohol dan menunjukkan keberadaan gugus yang bersifat polar pada produk.

Pita serapan di sekitar 1702 cm^{-1} pada sampel A4 berkaitan dengan vibrasi gugus karbonil (C=O). Keberadaan pita tersebut menunjukkan adanya senyawa yang mengandung gugus karbonil dalam produk hasil ekstraksi. Gugus karbonil merupakan salah satu gugus beroksigen yang umum ditemukan pada material humat. Dibandingkan

dengan bahan awal, munculnya atau menguatnya karakter pita pada daerah karbonil menunjukkan adanya perubahan kimia selama proses hidrotermal sekuensial.

Pada daerah sekitar 1611 dan 1513 cm^{-1} terdapat pita yang berkaitan dengan vibrasi struktur aromatik C=C. Keberadaan pita tersebut pada produk A4 menunjukkan bahwa sebagian struktur aromatik tetap terdapat setelah proses hidrotermal. Struktur aromatik tersebut dapat berkaitan dengan komponen lignin yang terdapat pada ampas tebu serta senyawa aromatik hasil transformasi selama proses hidrotermal. Oleh karena itu, keberadaan pita aromatik tidak dapat digunakan secara tunggal sebagai bukti terbentuknya asam humat, tetapi dapat digunakan sebagai salah satu indikasi perubahan struktur lignoselulosa menuju material yang memiliki karakter humic-like.

Selanjutnya, pada daerah 1265–1043 cm^{-1} terdapat pita serapan yang berkaitan dengan vibrasi C–O. Gugus C–O dapat berasal dari berbagai senyawa beroksigen yang terdapat dalam material hasil konversi biomassa. Keberadaan gugus C–O bersama dengan gugus O–H dan C=O menunjukkan bahwa produk A4 memiliki gugus fungsi yang mengandung oksigen dan bersifat polar.

Jika dibandingkan dengan spektrum A0, spektrum A4 menunjukkan perubahan pada pola dan intensitas beberapa pita serapan. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa proses hidrotermal sekuensial HCl–KOH menyebabkan transformasi terhadap struktur kimia ampas tebu. Tahap pretreatment menggunakan HCl berperan dalam menghidrolisis sebagian komponen lignoselulosa dan meningkatkan aksesibilitas struktur biomassa. Selanjutnya, perlakuan KOH pada kondisi hidrotermal dapat membantu pemutusan sebagian ikatan pada matriks lignoselulosa sehingga komponen organik lebih mudah terlarut dan mengalami transformasi.

Perbandingan spektrum A4 dengan spektrum asam humat dari jurnal pembanding menunjukkan adanya kesamaan pada beberapa daerah serapan, terutama pada daerah O–H, karbonil, struktur aromatik, dan C–O. Kesamaan tersebut menunjukkan bahwa produk hasil ekstraksi memiliki beberapa karakteristik gugus fungsi yang serupa dengan material humat yang dilaporkan dalam literatur. Namun, kesamaan pola FTIR tersebut belum dapat digunakan untuk menyatakan bahwa produk yang diperoleh merupakan asam humat murni karena FTIR pada penelitian ini digunakan secara kualitatif dan tidak memberikan informasi mengenai tingkat kemurnian maupun komposisi senyawa secara keseluruhan.

Dengan demikian, hasil FTIR menunjukkan bahwa proses hidrotermal sekuensial HCl–KOH menyebabkan perubahan karakteristik kimia ampas tebu dan menghasilkan produk yang memiliki gugus fungsi O–H, C=O, C=C aromatik, C–H alifatik, dan C–O

yang menyerupai karakteristik senyawa humic-like. Hasil ini mendukung bahwa produk yang diperoleh memiliki karakter kimia yang menyerupai senyawa humat. Meskipun demikian, diperlukan karakterisasi lebih lanjut, seperti total acidity, rasio E4/E6, analisis unsur, kadar abu, dan kapasitas tukar kation untuk memastikan karakteristik dan kualitas produk secara lebih menyeluruh.

Uji aplikasi awal pada tanaman kangkung

Uji aplikasi dilakukan sebagai pengamatan pendahuluan terhadap potensi produk humat dalam mendukung pertumbuhan tanaman kangkung. Hasil pengamatan visual dirangkum pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil pengamatan visual pertumbuhan tanaman kangkung

Perlakuan	Kondisi tanaman	Jumlah daun	Warna daun	Tanpa penyiraman
Kontrol	Pertumbuhan lambat	Lebih sedikit	Hijau pucat	Layu setelah 1 minggu
Asam humat	Pertumbuhan lebih cepat	Lebih banyak	Hijau lebih segar	Masih hidup setelah 1 minggu

Tanaman yang diberi perlakuan produk humat menunjukkan kecenderungan pertumbuhan vegetatif yang lebih baik dibandingkan kontrol, ditandai dengan pertumbuhan lebih cepat, jumlah daun lebih banyak, dan warna daun lebih hijau. Tanaman perlakuan juga masih mampu bertahan setelah satu minggu tanpa penyiraman, sedangkan kontrol mengalami kelayuan. Secara teoritis, humic substances dapat membantu memperbaiki kondisi tanah, ketersediaan unsur hara, dan kemampuan media mempertahankan air. Penelitian Ihsan dan Rahayu (2018) juga melaporkan pengaruh positif asam humat terhadap beberapa parameter pertumbuhan tanaman.

Walaupun demikian, hasil aplikasi pada penelitian ini bersifat observasi visual dengan jumlah perlakuan dan ulangan yang terbatas. Oleh sebab itu, temuan tersebut hanya menunjukkan indikasi awal dan belum dapat digunakan sebagai bukti kuantitatif efektivitas produk. Pengujian lanjutan perlu menggunakan ulangan yang memadai, parameter tinggi tanaman, jumlah daun, biomassa, panjang akar, serta analisis statistik. Karakterisasi tanah sebelum dan sesudah aplikasi juga diperlukan untuk menguji mekanisme produk sebagai pembenah tanah.

KESIMPULAN DAN SARAN

Variasi konsentrasi KOH pada proses hidrotermal alkali setelah pretreatment HCl menunjukkan kecenderungan meningkatkan rendemen produk hasil ekstraksi ampas tebu

pada rentang konsentrasi 0,25–1,25 M. Rendemen tertinggi pada rentang perlakuan yang diuji diperoleh pada KOH 1,25 M sebesar 39,33% dengan massa produk 2,7531 g dari 7 g bahan baku. Produk memiliki kadar air 2,88%, lebih rendah daripada ampas tebu awal sebesar 8,50%. Analisis FTIR menunjukkan keberadaan gugus O–H, C=O, C=C aromatik, C–H alifatik, dan C–O yang mengindikasikan karakteristik kimia menyerupai humic-like substances. Uji aplikasi awal pada tanaman kangkung menunjukkan kecenderungan pertumbuhan yang lebih baik dibandingkan kontrol berdasarkan pengamatan visual. Secara keseluruhan, KOH 1,25 M merupakan kondisi terbaik dalam rentang yang diuji berdasarkan rendemen dan kelengkapan karakteristik FTIR, tetapi kemurnian dan efektivitas produk sebagai pembenah tanah belum dapat dipastikan secara kuantitatif.

Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan sedikitnya tiga ulangan pada setiap perlakuan dan dilengkapi analisis statistik, termasuk ANOVA dan uji lanjut bila diperlukan. Karakterisasi produk sebaiknya diperluas melalui kadar abu, analisis unsur, total acidity, rasio E4/E6, kapasitas tukar kation, XRD, SEM, atau TGA. Uji aplikasi tanaman juga perlu menggunakan rancangan percobaan yang jelas, parameter pertumbuhan terukur, serta karakterisasi tanah sebelum dan sesudah aplikasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik LPP Yogyakarta, Program Studi Teknologi Rekayasa Kimia Industri, dosen pembimbing, laboran, dan seluruh pihak yang telah memberikan dukungan selama pelaksanaan penelitian dan penyusunan tugas akhir.

DAFTAR PUSTAKA

- Cheng, G., Niu, Z., Zhang, C., Zhang, X., & Li, X. (2019). Extraction of Humic Acid from Lignite by. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app9071356>
- Ihsan, M., & Rahayu, T. (2018). Ekstraksi Asam Humat Pupuk Kandang Sapi dan Pengaruhnya Untuk Meningkatkan Efektivitas Pemupukan Nitrogen Dari Beberapa Sumber Pada Tanaman Bayam. *Agronomika*, 13(1), 225–231.
- Ischia, G., Marzban, N., Schmidt, J., & Volikov, A. (2026). Transitioning from hydrothermal carbonization to humification for producing artificial humic substances. *Bioresource Technology*, 439, 133306. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.133306>

- Li, Y., & Yuan, S. (2021). Pengaruh penambahan KOH terhadap hasil dan karakteristik asam humat yang diekstrak dari lignit menggunakan NaOH.
- Nurlina, Syahbanu, I., Tamnasi, M. Tersiana, Nabela, C., & Furnata, Maria Desi. (2018). 26041-75676581467-1-Sm. Indonesian Journal of Pure and Applied Chemistry, 1(1), 30–38.
- Shao, Y., Zhao, J., Long, Y., & Lu, W. (2023). Two-step hydrothermal conversion of biomass waste to humic acid using hydrochar as intermediate. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 17(10). <https://doi.org/10.1007/s11783-023-1719-8>
- Shao, Y., Wang, J., Dong, Z., Wang, Y., He, W., Huo, W., Ye, R., Liu, Y., Liu, K., Xue, J., Lu, W., & Yang, T. (2025). Lignocellulosic biowaste hydrothermal humification: Is there a method for predicting humic acid? *Chemical Engineering Journal*, 504, 158824. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.158824>
- Song, C., Zhang, L., Yu, X., Wang, J., & Shu, X. (2025). Investigation into the hydrothermal humic acid production from the perspective of lignocellulosic biomass model components. *Energy*, 329, 136710. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136710>
- Yang, B., Zheng, J., Sun, Y., Chen, X., Yan, X., Davronbek, B., Wu, J., Boguta, P., Zhang, L., Ren, J., & Su, X. (2025). Air heating-alkaline hydrothermal production of artificial humic acid: Rapid and efficient humification of waste biomass. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(3), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116770>
- Yang, F., Zhang, S., Cheng, K., & Antonietti, M. (2019). A hydrothermal process to turn waste biomass into artificial fulvic and humic acids for soil remediation. *Science of the Total Environment*, 686, 1140–1151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.045>