

POTENSI BIOETHANOL DARI LIMBAH NANAS TERDELIGNIFIKASI GELOMBANG MIKRO

Safaah Nurfaizin*

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Wahid Hasyim
Jl. Menoreh Tengah X/22, Sampangan, Semarang 50236.

*Email: nurfaizin@unwahas.ac.id

Abstrak

Bioethanol berpotensi besar sebagai salah satu sumber energi alternatif yang ramah lingkungan untuk mewujudkan global zero emission. Proses produksi bioethanol yang sangat sederhana melalui proses fermentasi anaerob dari biomassa yang mengandung selulosa. Pemanfaatan biomassa yang terintegrasi akan mengatasi permasalahan berkesinambungan dan meningkatkan nilai ekonomis dari biomassa tersebut. Limbah nanas adalah biomassa yang berpotensi sebagai rujukan bahan baku bioethanol, akan tetapi kandungan lignin yang akan menghambat hidrolisis bahan organik menjadi bioethanol. Maka dari itu penelitian ini bertujuan untuk menghilangkan kandungan lignin dalam limbah nanas melalui pretreatment gelombang mikro (microwave) sebagai bahan rujukan produksi bioethanol. Dalam penelitian ini digunakan beberapa variabel proses yaitu: rasio 1:20 (b/v), waktu kontak 10 menit, dan variabel suhu 70, 80 dan 90°C. Dari hasil analisa dengan menggunakan metode Chesson-Data didapatkan hasil yang menunjukan bahwa pengaruh pretreatment microwave cukup signifikan dengan kondisi optimum operasi pada suhu 90°C dengan hasil lignin yang terlarutkan sebanyak 9,05%, Hal tersebut juga berimbas positif terhadap selulosa yang terlarut sebanyak 29,42% jauh lebih banyak dibandingkan tanpa pretreatment.

Kata Kunci: Bioethanol, Delignifikasi, Limbah Nanas, Microwave.

Abstract

Bioethanol has great potential as one of the environmentally friendly alternative energy sources to realize global zero emission. The very simple bioethanol production process through anaerobic fermentation process of biomass containing cellulose. Integrated biomass utilization will overcome sustainable problems and increase the economic value of the biomass. Pineapple waste is a biomass that has the potential as a reference for bioethanol raw materials, but the lignin content will inhibit the hydrolysis of organic materials into bioethanol. Therefore, this study aims to eliminate lignin content in pineapple waste through microwave pretreatment as a reference material for bioethanol production. In this study, several process variables were used, namely: ratio 1:20 (w / v), contact time 10 minutes, and temperature variables 70, 80 and 90°C. From the analysis results using the Chesson-Data method, the results showed that the effect of microwave pretreatment was quite significant with optimum operating conditions at a temperature of 90°C with a dissolved lignin result of 9.05%, This also had a positive impact on dissolved cellulose of 29.42% much more than without pretreatment.

Keywords: Bioethanol, Delignification, Pineapple Waste, Microwave.

1. PENDAHULUAN

Revolusi dunia dalam perencanaan *green energy* dan mengurangi ketergantungan energi fosil diperkirakan meningkat tiga kali lipat pada tahun 2030 (Zhao et al., 2022). Untuk mewujudkan hal tersebut salah satu yang dapat dilakukan dengan memanfaatkan energi terbarukan yang ramah lingkungan. Salah satu produk *green energy* yang sangat potensial adalah bioethanol (Roy & Abedin, 2022). Hal tersebut dikuatkan semua biomassa yang mengandung selulosa dapat difermentasi menjadi bioethanol (Joseph et al., 2023).

Sampai saat ini, bioethanol menjadi rujukan dunia untuk mencapai *zero emission* karena

selain *sustainable* juga memiliki nilai oktan tinggi (Betiku et al., 2023). Pemanfaatan limbah sebagai bahan baku dalam produksi bioethanol menjadi alasan mendasar dan dapat mengurangi permasalahan sampah serta pencemaran lingkungan (Jayakumar et al., 2023). Dengan adanya penanganan limbah yang terintegrasi akan mampu meningkatkan kemanfaatan limbah (Kapoor et al., 2020).

Penelitian besar-besaran telah dilakukan untuk mengkaji biomassa sebagai rujukan bioethanol, diantaranya buah pisang (Sathendra Elumalai et al., 2023), jerami padi (Nazar et al., 2022), limbah kentang (Chauhan et al., 2022) dan

limbah pertanian lainnya (Rocha-Meneses et al., 2020) serta limbah industri (Suresh et al., 2020).

Melihat hal tersebut, biomassa yang memiliki potensi besar yaitu limbah nanas. Mengingat bahwa nanas mengandung 20-40% (b/b) limbah dalam bentuk inti dan kulit (Sanguanchaipaiwong & Leksawasdi, 2018). Nanas memiliki kandungan air dan serat yang tinggi seperti, *selulosa 38-48%*, *hemiselulosa 67%*, *lignin 17%*, *alpha selulosa 31%* serta *pentose* (Sarangi et al., 2018).

Kendati demikian, kandungan lignin dalam limbah nanas menjadi penghambat dalam proses hidrolisis (Nurfaizin & Hartati, 2023). Babarapa upaya dilakukan untuk mengoptimalkan proses hidrolisis bioethanol dari limbah nanas seperti penambahan katalis (Imman et al., 2021), perlakuan biologi (Casabar et al., 2020), getaran untrasonik (Balaraman et al., 2022) dan perlakuan tradisional lainnya.

Beberapa tahun terakhir perkembangan teknologi gelombang mikro/*microwave* menjangkau dalam berbagai bidang, salah satunya proses degradasi polimer (Li et al., 2023). Teknologi *microwave* mampu mengubah struktur selulosa, menurunkan polimerisasi dan kristalin selulosa, hidrolisis hemi selulosa dan depolimerisasi lignin (Eskicioglu et al., 2007). Sehingga turunnya konsentrasi lignin dapat meningkatkan yield bioethanol.

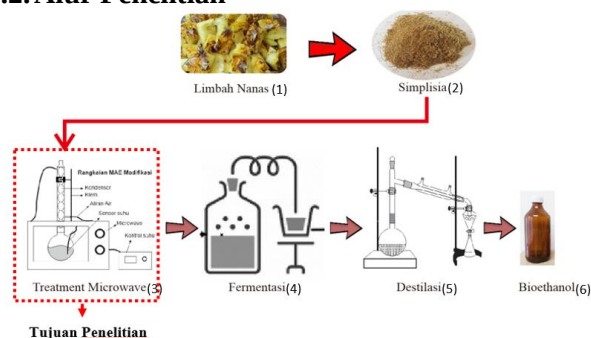
Menimbang potensi tersebut, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui potensi limbahkulit nanas terdelignifikasi gelombang mikro sebagai rujukan bahan baku bioethanol.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya limbah nanas, ragi, HCl dan NaOH, NPK dan Urea. Kemudian alat yang digunakan diantaranya blender, pemanas listrik, gelas beaker, Erlenmeyer, pengaduk, timbangan analitik, pipet, alat destilasi.

2.2. Alur Penelitian



Gambar 1. Alur Penelitian

1. Perlakuan Gelombang Mikro

Perlakuan gelombang mikro menggunakan oven microwave merk Electrolux type MM823AB4-P00C dengan daya maksimal 800 watt yang telah dimodifikasi dengan penambahan control suhu dan pengaduk stirer. Kemudian untuk mendapatkan data optimasi proses akan digunakan variable tetap berupa limbah nanas dan pelarut. Sedangkan untuk variable kontrol berupa rasio bahan dan pelarut 1:20 (b/v), suhu operasi 70, 80 dan 90 (C) dan waktu pemanasan 10 (menit), serta data respon berupa konsentrasi lignin yang terlarut.

2. Fermentasi

Fermentasi dilakukan menggunakan botol plastik PE yang telah dimodifikasi dengan pembuangan gas pada kondisi anaerob. Proses fermentasi dilakukan pada kondisi standar yaitu pada tekanan dan suhu ruang selama 7 hari. Waktu dipilih 7 hari karena sesuai hasil penelitian Wardani (2018) yang melaporkan bahwa kenaikan hasil fermentasi bioethanol yang cukup signifikan diperoleh pada rentang waktu 6-7 hari meskipun pada perpanjangan waktu fermentasi yang lebih lama masih menghasilkan konversi bioethanol akan tetapi hanya sedikit sekali. Kemudian untuk mendapatkan data optimasi akan digunakan variabel rasio simplisia limbah nanas dan starter.

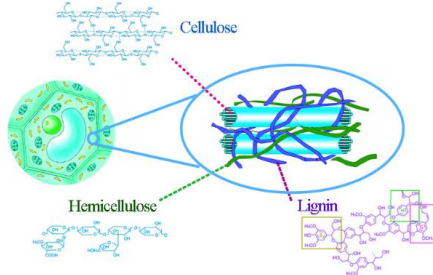
3. Destilasi

Destilasi merupakan proses pemisahan zat cair antara bioethanol dan air yang didasarkan pada perbedaan titik didih dari kedua zat. Seperangkat alat destilasi yang digunakan dalam penelitian ini berada di Laboratorium Teknik Kimia yang terdiri dari mantel panas dengan pengatur suhu, kondensor kaca dengan pendingin air dan tempat penampung hasil kondensasi bioethanol. Destilasi dilakukan pada kondisi titik didih bioethanol yaitu pada suhu 78°C, dimana pada kondisi tersebut bioethanol akan berubah fasa dari cair menjadi uap sehingga terpisah dengan air yang memiliki titik didih 100°C. selanjutnya uap bioethanol dikondensasi dalam kondensor berpendingin air untuk merubah kembali fasa uap bioethanol menjadi cair. Proses destilasi minimal dilakukan dua kali untuk mendapatkan hasil bioethanol yang lebih murni (Susilo et al., 2017). Proses destilasi dikatakan selesai apabila sudah tidak terjadi penguapan didalan sampel hasil fermentasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengaruh Perlakuan Gelombang Mikro

Potensi sumber energi dari limbah nanas sangat besar. Diketahui bahwa mengandung selulosa, hemi selulosa dan lignin. Akan tetapi adanya lignin menjadi penghambat yang merupakan senyawa yang susah terdegradasi dan memiliki kestabilan tinggi, sehingga sulit dihidrolisis secara enzimatik ataupun dengan bantuan bakteri.

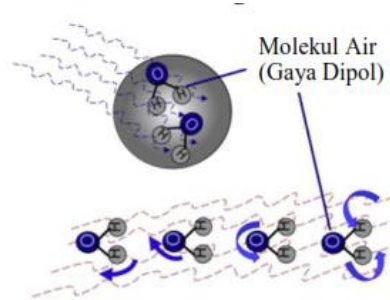


Gambar 2. Selulosa dikelilingi Hemicelulosa dan Lignin (Wu et al., 2023)

Penelitian yang telah dilakukan oleh Jian (2000), menginformasikan bahwa perlakuan gelombang mikro dapat merubah struktur selulosa, mendegradasi lignin dan hemicelulosa dalam lignoselulosa. Pengaruh dari pancaran gelombang mikro mengakibatkan konduksi atau rotasi dipol dari meningkatnya tumbukan secara langsung antar bahan polar atau pelarut. Pada saat yang berbeda medan elektromagnetik yang beresilasi dengan frekuensi tertentu mempengaruhi molekul polar untuk berusaha mengikuti medan tersebut dan bergabung didalamnya.

Akan tetapi adanya gaya intermolekular antar molekul polar menyebabkan molekul polar tidak dapat mengikuti medan. Fenomena tersebut menyebabkan terjadinya gerak acak molekul dan menghasilkan panas. Panas yang dihasilkan dari peningkatan aktifitas antar molekul akan membantu memecah struktur bahan yang kompleks menjadi struktur senyawa penyusunnya yang lebih sederhana (Nurfaizin & Hartati, 2023)

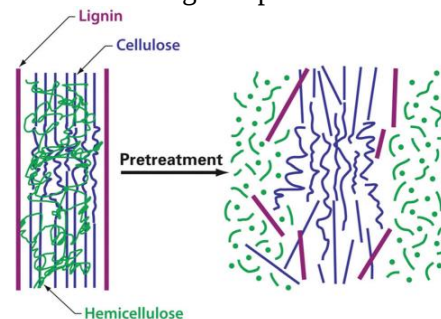
Konsep pemanasan microwave dapat dilihat pada gambar 2 yang menunjukkan perbedaan antara pemanasan dengan memanfaatkan gelombang mikro dan pemanasan konvensional:



Gambar 3. Perbedaan Pemanasan Konvensional dan Pemanasan menggunakan Microwave

Konsep pemanasan pada gambar 3 menunjukkan bahwa pemanasan secara konvensional hanya meneruskan energi panas dari luar menuju inti bahan melalui konsep radiasi antar molekul bahan sehingga temperatur luar akan lebih tinggi dibandingkan dengan bagian dalam. Beda halnya dengan pemanasan gelombang mikro yang secara sengaja meningkatkan pergerakan antar melekul (gaya dipol) sehingga menimbulkan panas yang akibat dari tumbukan molekul polar yang menghasilkan pemanasan yang lebih merata (Tyagi & Lo, 2013).

Secara umum proses degradasi lignin dapat dilihat pada gambar 3 yang menggambarkan proses degradasi dinding sel lignin sehingga selulosa yang terikat diantara jaringan lignin dapat dihidrolisa dengan cepat dan mudah.

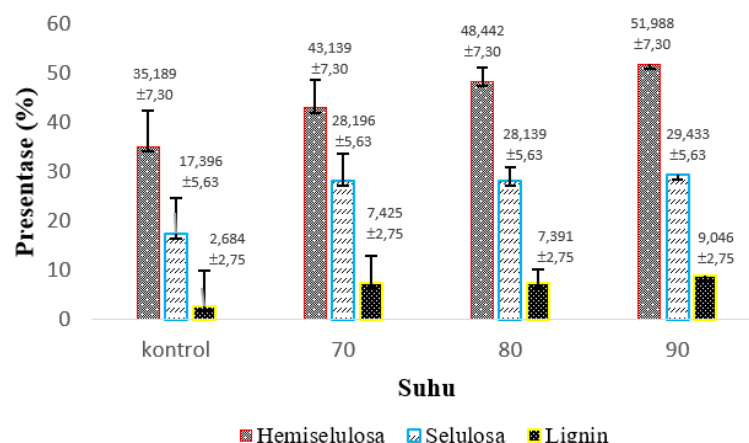


Gambar 4. Skema Pretreatment Degradasi Lignoselulosa (Brandt et al., 2013)

Rusaknya jaringan lignin yang terjadi akibat gaya dipol juga akan mengakibatkan *swelling poit* yang mengidentifikasi terjadinya pembesaran pori dari partikel bahan (Haghighi Mood et al., 2013).

3.2. Hasil Analisa Selulosa dengan Metode Chesson-Data

Data hasil analisa selulosa, hemicelulosa dan lignin yang telah dilakukan pada limbah kulit nanas dengan perlakuan gelombang mikro dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Hasil Analisa Selulosa Limbah Kulir Nanas dengan Metode Chesson-Data

Gambar 5 menunjukkan bahwa perlakuan gelombang mikro dapat meningkatkan degradasi berbagai senyawa yang terdapat pada limbah kulit nanas. Pada penelitian ini sampel kontrol merupakan bahan tanpa perlakuan gelombang mikro yang menunjukkan hasil kelarutan lignin dalam sampel hanya 2,68% dari berat sampel. Kemudian setelah dilakukan perlakuan gelombang mikro, terjadi peningkatan kelarutan lignin yang linier dengan kenaikan suhu microwave sesuai dengan variable suhu. Jumlah kelarutan lignin terbanyak mencapai 9,05% berat diperoleh pada suhu 90°C dari limbah nanas.

Hal tersebut dikarenakan panas yang dihasilkan dari aktivitas elektromagnetik memaksa sebagian besar molekul air untuk bergerak lebih cepat dan meningkatkan tumbukan antar molekul yang lebih kuat. Semakin kuat tumbukan menghasilkan suhu yang semakin tinggi dan juga meningkatkan degradasi ikatan lignin (Dehani et al., 2013). Hal tersebut dapat terjadi mengingat pancaran radiasi gelombang mikro dapat meningkatkan efisiensi dan efektifitas proses degradasi lignin (Binod et al., 2012).

Merujuk pada kenaikan kelarutan lignin juga terjadi pada kelarutan selulosa yang ikut meningkat pula. Gambar 5 menginformasikan bahwa kenaikan kelarutan selulosa dari 17,39% pada sampel kontrol meningkat hingga 29,42% pada sampel dengan perlakuan gelombang mikro pada suhu 90°C. Perbedaan hasil yang cukup signifikan didapatkan seiring dengan kenaikan suhu yang juga merupakan kondisi optimum proses.

Penelitian yang dilakukan Rocha-Meneses et al., (2020) menginformasikan bahwa variabel suhu sangat berpengaruh

terhadap kelarutan bahan organik. Penelitian tersebut dilakukan untuk melarutkan lignoselulosa jerami padi pada suhu 150-200°C dengan pemanasan konvensional. Perlu diperhatikan pula hasil penelitian dari Version and Wildt, (2011) yang menyampaikan bahwa pemanasan menggunakan *microwave* melebihi temperatur ambien uap air yaitu 100°C akan mengurangi volume air dan untuk mencapai suhu tersebut dibutuhkan waktu 18 menit.

4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian diatas dapat disimpulkan bahwa perlakuan gelombang mikro memiliki efek yang cukup signifikan terhadap degradasi lignin dari limbah nanas sebagai bahan untuk produksi bioethanol. Optimasi proses delignifikasi didapatkan pada temperatur 90°C dengan total kelarutan lignin sebanyak 9,05% dan juga meningkatkan kelarutan selulosa hingga 29,42% berat sampel. Hasil tersebut membuktikan bahwa gelombang mikro dapat membantu proses hidrolisis bahan-bahan organik.

DAFTAR PUSTAKA

- Balaraman, H. B., Umasekar, S., Rajmohan, K. S., & Rathnasamy, S. K. (2022). Sustainable eutectic mixture-based ultrasound assisted multifaceted valorisation of pineapple waste for bromelain and bioethanol production. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 30, 100876. <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2022.100876>
- Betiku, E., Olatoye, E. O., & Latinwo, L. M. (2023). Bioprocessing of underutilized *Artocarpus altilis* fruit to bioethanol by

- Saccharomyces cerevisiae*: A fermentation condition improvement study. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. <https://doi.org/10.1016/J.JOBAB.2023.03.002>
- Binod, P., Satyanagalakshmi, K., Sindhu, R., Janu, K. U., Sukumaran, R. K., & Pandey, A. (2012). Short duration microwave assisted pretreatment enhances the enzymatic saccharification and fermentable sugar yield from sugarcane bagasse. *Renewable Energy*, 37(1), 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.007>
- Brandt, A., Gräsvik, J., Hallett, J. P., & Welton, T. (2013). Deconstruction of lignocellulosic biomass with ionic liquids. *Green Chemistry*, 15(3), 550–583. <https://doi.org/10.1039/c2gc36364j>
- Casabar, J. T., Ramaraj, R., Tipnee, S., & Unpaprom, Y. (2020). Enhancement of hydrolysis with *Trichoderma harzianum* for bioethanol production of sonicated pineapple fruit peel. *Fuel*, 279, 118437. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2020.118437>
- Chauhan, M., Dutt, S., Manjul, A. S., Singh, B., & Garlapati, V. K. (2022). A sustainable approach of turning potato waste towards bioethanol production using indigenous microbes of Himachal Pradesh, India. *Chemosphere*, 299, 134429. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHER.2022.134429>
- Dehani, F. R., Argo, B. D., & Yulianingsih, R. (2013). Utilization of Microwave Irradiation to Maximize Pretreatment Process of Lignin Levels Reduction of Paddy Straw (on the production of bioethanol). *Jurnal Bioproses Komoditas Tropis*, 1(1), 13–20.
- Eskicioglu, C., Terzian, N., Kennedy, K. J., Droste, R. L., & Hamoda, M. (2007). Athermal microwave effects for enhancing digestibility of waste activated sludge. *Water Research*, 41(11), 2457–2466. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.03.008>
- Haghighi Mood, S., Hossein Golfeshan, A., Tabatabaei, M., Salehi Jouzani, G., Najafi, G. H., Gholami, M., & Ardjmand, M. (2013). Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 77–93. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.033>
- Imman, S., Kreetachat, T., Khongchamnan, P., Laosiripojana, N., Champreda, V., Suwannahong, K., Sakulthaew, C., Chokejaroenrat, C., & Suriyachai, N. (2021). Optimization of sugar recovery from pineapple leaves by acid-catalyzed liquid hot water pretreatment for bioethanol production. *Energy Reports*, 7, 6945–6954. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2021.10.076>
- Jayakumar, M., Gindaba, G. T., Gebeyehu, K. B., Periyasamy, S., Jabesa, A., Baskar, G., John, B. I., & Pugazhendhi, A. (2023). Bioethanol production from agricultural residues as lignocellulosic biomass feedstock's waste valorization approach: A comprehensive review. *Science of The Total Environment*, 879, 163158. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.163158>
- Jian, X. (2000). Influence of Microwave on the Ultrastructure of Cellulose I. *Journal of South China University of Technology*.
- Joseph, A. M., Tulasi, Y., Shrivastava, D., & Kiran, B. (2023). Techno-economic feasibility and exergy analysis of bioethanol production from waste. *Energy Conversion and Management: X*, 18(December 2022), 100358. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100358>
- Kapoor, R., Ghosh, P., Kumar, M., Sengupta, S., Gupta, A., Kumar, S. S., Vijay, V., Kumar, V., Kumar Vijay, V., & Pant, D. (2020). Valorization of agricultural waste for biogas based circular economy in India: A research outlook. *Bioresour Technol*, 304, 123036. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2020.123036>
- Li, M., Li, P., Xu, Y., Zhang, B., Li, J., Zhong, W., Zang, H., Zheng, H., Rong, H., & Ma, F. (2023). Degradation of polymeric polyproanthocyanidins from black chokeberry by microwave-assisted nucleophilic technique of sulfite/catechin: Reaction kinetics, antioxidation and structural analysis. *Food Chemistry*, 408, 135220. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2022.135220>
- Nazar, M., Xu, L., Ullah, M. W., Moradian, J.

- M., Wang, Y., Sethupathy, S., Iqbal, B., Nawaz, M. Z., & Zhu, D. (2022). Biological delignification of rice straw using laccase from *Bacillus ligninophilus* L1 for bioethanol production: A clean approach for agro-biomass utilization. *Journal of Cleaner Production*, 360, 132171. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.132171>
- Nurfaizin, S., & Hartati, I. (2023). OPTIMASI SELULOSA LIMBAH KULIT NANAS UNTUK PRODUKSI BIOGAS MELALUI METODE DELIGNIFIKASI MAE (MICROWAVE ASISSTED EXTRACTION) DENGAN PELARUT AQUADES. 8(1991), 45–50.
- Rocha-Meneses, L., Ferreira, J. A., Mushtaq, M., Karimi, S., Orupöld, K., & Kikas, T. (2020). Genetic modification of cereal plants: A strategy to enhance bioethanol yields from agricultural waste. *Industrial Crops and Products*, 150, 112408. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2020.112408>
- Roy, D. K., & Abedin, M. Z. (2022). Potentiality of biodiesel and bioethanol production from feedstock in Bangladesh: A review. *Heliyon*, 8(11), e11213. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2022.E11213>
- Sanguanchaipaiwong, V., & Leksawasdi, N. (2018). Butanol production by *Clostridium beijerinckii* from pineapple waste juice. *Energy Procedia*, 153, 231–236. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.10.006>
- Sarangi, P. K., Nanda, S., & Das, R. (2018). Bioconversion of Pineapple Residues for Recovery of Value-Added Compounds. *International Journal of Research In Science & Engineering*, March, 210–217.
- Sathendra Elumalai, R., Ramanujam, P., Tawfik, M. A., Ravichandran, P., & Gurunathan, B. (2023). Optimization and kinetics modelling for enhancing the bioethanol production from banana peduncle using *Trichoderma reesei* and *Kluyveromyces marxianus* by Co-Pretreatment methods. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 103129. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2023.103129>
- Suresh, T., Sivarajasekar, N., Balasubramani, K., Ahamad, T., Alam, M., & Naushad, M. (2020). Process intensification and comparison of bioethanol production from food industry waste (potatoes) by ultrasonic assisted acid hydrolysis and enzymatic hydrolysis: Statistical modelling and optimization. *Biomass and Bioenergy*, 142, 105752. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2020.105752>
- Susilo, B., Sumarlan, S. H., & Nurirenia, D. F. (2017). Pemurnian Bioetanol Menggunakan Proses Distilasi Dan Adsorpsi Dengan Penambahan Asam Sulfat (H_2SO_4) Pada Aktivasi Zeolit Alam Sebagai Adsorben Purification Bioetanol Using A Process The Distillation And Adsorption By The Addition Of Sulphuric Acid (H_2SO_4). 19–26.
- Tyagi, V. K., & Lo, S. L. (2013). Microwave irradiation: A sustainable way for sludge treatment and resource recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18(71), 288–305. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.032>
- Version, D., & Wildt, D. (2011). *University of Groningen Biomass pyrolysis for chemicals de Wildt, Paulus*.
- Wardani, A. K. (2018). Pengaruh Lama Waktu Fermentasi pada Pembuatan Bioetanol dari *Sargassum* sp Menggunakan Metode Hidrolisis Asam dan Fermentasi Menggunakan *Universitas Sanata Dharma*. Yogyakarta, 6–7. [http://www.library.usd.ac.id/Data/PDF/F.Keguruan dan Ilmu Pendidikan/Pendidikan Biologi/141434085_full.pdf](http://www.library.usd.ac.id/Data/PDF/F.Keguruan%20dan%20Ilmu%20Pendidikan/Pendidikan%20Biologi/141434085_full.pdf)
- Wu, W., Li, P., Huang, L., Wei, Y., Li, J., Zhang, L., & Jin, Y. (2023). The Role of Lignin Structure on Cellulase Adsorption and Enzymatic Hydrolysis. *Biomass (Switzerland)*, 3(1), 96–107. <https://doi.org/10.3390/biomass3010007>
- Zhao, L., Liu, J., Li, D., Yang, Y., Wang, C., & Xue, J. (2022). China's green energy investment risks in countries along the Belt and Road. *Journal of Cleaner Production*, 380, 134938. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.134938>