

# Delignifikasi Kulit Singkong Menggunakan Pelarut Alkali dengan *Sonication Assisted*

Diannita Tri Rachmawati\*, Marchelino Farhan Sayyaf, Lilik Suprianti

Program Studi Teknik Kimia, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

\*Koresponden email: 22031010113@student.upnjatim.ac.id

Diterima: 5 Mei 2026

Disetujui: 09 Mei 2026

## Abstract

Cassava peel waste contains cellulose that has the potential to be utilized as an economically valuable product, such as bioethanol for renewable fuel. This study aimed to increase the cellulose content through a delignification process or the degradation of lignin in cassava peel using sonication assisted with varying sonication power (0, 30, and 60 watts) and delignification time (30, 50, and 70 minutes). Cellulose content that released from the lignin was analyzed using the Chesson-Datta method. The results showed that the highest lignin content (24.954%) was obtained at 60 watts of sonication power and 30 minutes of delignification time, while the highest cellulose content (75.180%) was obtained at 60 watts of sonication power and 70 minutes of delignification time. The FTIR spectrum confirmed the presence of several functional groups characteristic of lignin (COOH, CH<sub>2</sub>, and CH<sub>3</sub>), indicating that significant amounts of lignin were still present under these sonication conditions. Morphological observations by SEM analysis also confirmed changes in the surface morphology of the cassava peel due to the application of sonication. Overall, the optimal conditions were achieved at a sonication power of 60 watts and a delignification time of 70 minutes. The high cellulose content has the potential to yield high levels of reducing sugars and enhance bioethanol fermentation.

**Keywords:** *cassava peels, cellulose, lignin, delignification, sonication.*

## Abstrak

Limbah kulit singkong mengandung selulosa yang berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai produk bernilai ekonomis seperti bioethanol guna bahan bakar terbarukan. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kadar selulosa dengan proses delignifikasi atau degradasi lignin pada kulit singkong menggunakan bantuan sonikasi dengan variasi daya sonikasi (0; 30; dan 60 watt) dan waktu delignifikasi (30; 50; dan 70 menit). Analisis kadar selulosa yang telah lepas dari lignin dilakukan dengan metode Chesson-Datta. Hasil penelitian menunjukkan kadar lignin tertinggi (24,954%) diperoleh pada daya sonikasi 60 watt dan waktu delignifikasi 30 menit, sedangkan kadar selulosa tertinggi (75,180%) diperoleh pada daya sonikasi 60 watt dan waktu delignifikasi 70 menit. Spektrum FTIR mengkonfirmasi adanya beberapa gugus yang dimiliki lignin (COOH, CH<sub>2</sub>, dan CH<sub>3</sub>) dimana mengindikasikan lignin masih banyak terbentuk pada daya sonikasi tersebut. Penampakan morfologi melalui uji SEM juga mengkonfirmasi adanya perubahan morfologi permukaan kulit singkong akibat penambahan sonikasi. Secara keseluruhan, kondisi optimum diperoleh pada daya sonikasi 60 watt dengan waktu delignifikasi 70 menit. Kadar selulosa yang tinggi berpotensi sebagai penghasil gula reduksi yang tinggi dan meningkatkan fermentasi bioethanol.

**Kata Kunci:** *kulit singkong, selulosa, lignin, delignifikasi, sonikasi*

## 1. Pendahuluan

Biomassa menjadi sumber energi terbarukan yang melimpah di Indonesia dengan potensi pemanfaatan sebagai bahan baku biofuel, termasuk bioethanol [1]. Biomassa tersusun atas komponen utama berupa selulosa, hemiselulosa, dan lignin [2]. Keberadaan lignin pada lignoselulosa menjadi pengikat antara selulosa dan hemiselulosa yang dapat mengurangi pemanfaatan biomassa menjadi produk bernilai ekonomis [3]. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, perlu dilakukan proses delignifikasi untuk memisahkan lignin dari struktur lignoselulosa [4].

Salah satu biomassa yang melimpah di Indonesia adalah singkong dengan produksi sekitar 20 juta ton setiap tahunnya [5]. Produksi singkong menghasilkan limbah kulit singkong sebanyak 4-5 juta ton yang belum dimanfaatkan secara optimal [6]. Kulit singkong mengandung selulosa (43,62%), pati (36,58%), hemiselulosa (10,38%), dan lignin (7,64%) [5]. Kandungan lignin tersebut dapat menghambat pemanfaatan kulit singkong sebagai sumber energi, sehingga diperlukan proses delignifikasi untuk meningkatkan aksesibilitas enzim dalam mengkonversi selulosa menjadi produk secara maksimal [7]

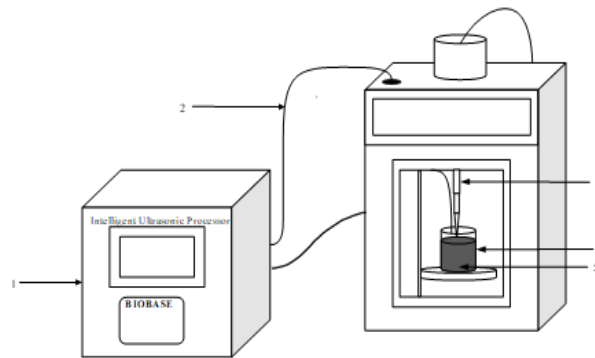
Delignifikasi dapat dilakukan dengan beberapa pelarut, salah satunya pelarut basa yang terbagi atas basa kuat dan basa lemah [8]. Proses yang sederhana dan selektif terhadap lignin menjadi kelebihan dalam penggunaan pelarut basa [9]. Namun, delignifikasi dengan pelarut basa diketahui membutuhkan waktu yang cukup lama. Untuk memaksimalkan proses delignifikasi, dapat digunakan sonikasi guna membuka struktur lignoselulosa melalui pembentukan gelembung mikroskopis yang dapat merusak struktur lignoselulosa karena timbulnya titik panas dan kenaikan [10]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan sonikasi pada delignifikasi kertas koran dengan NaOH 1 N menghasilkan persen delignifikasi sekitar 80%, lebih tinggi dibandingkan tanpa sonikasi yang hanya 37,7% [11], [12].

Sebelumnya telah banyak penelitian yang menggunakan sonikasi pada proses delignifikasi dengan kondisi-kondisi yang berbeda, seperti variasi konsentrasi NaOH, waktu, suhu, daya ultrasonik, dan duty cycle [12], [13], [14]. Namun, penelitian mengenai pengaruh sonikasi terhadap delignifikasi kulit singkong masih perlu dikaji lebih lanjut. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan proses sonikasi terhadap kadar lignin, selulosa, dan hemiselulosa pada kulit singkong, serta peningkatan temperatur yang terjadi pada larutan. Analisis kadar lignin, selulosa, dan hemiselulosa dilakukan dengan metode Chesson-Datta dan NDF, morfologi dianalisis dengan SEM, dan gugus fungsi dianalisis dengan FTIR.

## 2. Metode Penelitian

### Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah generator, thermocouple, probe, beaker glass, corong kaca, batang pengaduk, kertas saring, gelas ukur, ayakan 40 mesh, magnetic stirrer hotplate, magnetic stirrer bar, neraca analitik, oven, dan grinder. Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah kulit singkong yang didapatkan dari PT. Ladang Sehat Indonesia, NaOH 96% (Arkitos), dan aquadest.



**Gambar 1:** Rangkaian Alat Sonikasi

Keterangan :

1. Generator
2. Thermocouple
3. Probe
4. Beaker glass
5. Campuran bahan

### Preparasi Kulit Singkong

Kulit singkong yang telah disiapkan dikeringkan terlebih dahulu menggunakan oven pada suhu 70°C selama satu jam. Kulit singkong yang sudah kering kemudian dikecilkan ukurannya menggunakan grinder hingga ukuran 40 mesh. Selanjutnya, kulit singkong diayak menggunakan ayakan 40 mesh guna memastikan ukuran bahan telah sesuai. Setelah didapatkan ukuran bahan yang sesuai kulit singkong disimpan untuk tahap selanjutnya.

### Preparasi Larutan NaOH

Larutan natrium hidroksida (NaOH) disiapkan dengan cara melarutkan 16 gram padatan NaOH 96% menggunakan aquadest hingga diperoleh konsentrasi 1 N. Proses dimulai dengan memasukkan 16 gram padatan NaOH yang telah ditimbang di neraca analitik ke dalam beaker glass. Selanjutnya, aquadest ditambahkan hingga mencapai tanda batas volume 400 ml pada beaker glass. Setelah itu, larutan diaduk menggunakan batang pengaduk secara perlahan untuk memastikan homogenitas dan seluruh padatan NaOH telah terlarut.

### Proses Delignifikasi Tanpa Bantuan Sonikasi

Kulit singkong yang sudah siap ditimbang seberat 20 gram menggunakan neraca analitik, kemudian dimasukkan ke dalam gelas beaker. Selanjutnya, larutan NaOH sebanyak 400 ml dengan konsentrasi 1 N yang telah disiapkan ditambahkan ke dalam gelas beaker yang berisi kulit singkong. Kemudian, magnetic stirrer bar dimasukkan dan beaker diletakkan di atas magnetic stirrer hotplate. Proses delignifikasi dilakukan dengan suhu 25°C dan kecepatan pengadukan sebesar 200 rpm selama (30, 50, dan 70) menit. Setelah proses delignifikasi selesai, larutan disaring dan dinetralkan menggunakan air mengalir untuk memperoleh substrat netral sebagai hasil delignifikasi. Selanjutnya, substrat atau kulit singkong hasil delignifikasi dikeringkan menggunakan oven dengan suhu 110-120°C hingga benar-benar kering.

### Proses Delignifikasi Dengan Bantuan Sonikasi

Kulit singkong yang sudah siap ditimbang seberat 20 gram menggunakan neraca analitik, kemudian dimasukkan ke dalam gelas beaker. Selanjutnya, larutan NaOH sebanyak 400 ml dengan konsentrasi 1 N yang telah disiapkan ditambahkan ke dalam gelas beaker yang berisi kulit singkong. Kemudian, probe dimasukkan dan thermocouple dipasang untuk memantau suhu. Beaker diletakkan di dalam box sonikator sembari generator dinyalakan. Proses delignifikasi dengan bantuan sonikasi dilakukan dengan daya (30 dan 60) watt selama (30, 50, dan 70) menit dengan duty cycle 80%. Setelah proses delignifikasi selesai, larutan disaring dan dinetralkan menggunakan air mengalir untuk memperoleh substrat netral sebagai hasil delignifikasi. Selanjutnya, substrat atau kulit singkong hasil delignifikasi dikeringkan menggunakan oven dengan suhu 110-120°C hingga benar-benar kering.

### Analisis Kandungan Lignoselulosa dengan Metode Chesson-Datta

Proses pengujian ini dilakukan di Laboratorium Material Maju, Fakultas Teknik dan Sains, UPN “Veteran” Jawa Timur. Metode Chesson-Datta ini digunakan untuk menentukan persentase kandungan lignoselulosa (lignin, hemiselulosa, dan selulosa) yang masih dimiliki oleh substrat hasil delignifikasi tanpa dan dengan bantuan sonikasi. Metode Chesson-Datta memiliki kesamaan dengan uji gravimetri, dimana dilakukan dengan prosedur ekstraksi HWS (Hot Water Soluble), ekstraksi hemiselulosa, ekstraksi selulosa, dan lignin (pengabuan).

### Analisis Gugus Fungsi Dengan Uji Fourier Transform Infrared (FTIR)

Proses pengujian ini dilakukan di Laboratorium Instrumen, Fakultas Teknik dan Sains, UPN “Veteran” Jawa Timur. Uji Fourier Transform Infrared (FTIR) ini digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi kimia yang terkandung dalam substrat hasil delignifikasi tanpa dan dengan bantuan sonikasi berdasarkan pola serapan spektrum inframerah pada panjang gelombang tertentu.

### Analisis Morfologi Dengan Uji Scanning Electron Microscope (SEM)

Proses pengujian ini dilakukan di Research Center, UPN “Veteran” Jawa Timur. Uji Scanning Electron Microscope (SEM) ini digunakan untuk mengidentifikasi perubahan morfologi dari permukaan dari substrat hasil delignifikasi tanpa dan dengan bantuan sonikasi dengan perbesaran tertentu.

## 3. Hasil dan Pembahasan

Penentuan persentase kandungan lignoselulosa dalam kulit singkong dilakukan menggunakan metode Chesson-Datta. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui komposisi awal lignoselulosa dalam kulit singkong sebelum dilakukan proses delignifikasi tanpa dan dengan bantuan sonikasi. Data yang dihasilkan disajikan dalam bentuk persen berat (%b/b) yang menunjukkan kadar lignin, hemiselulosa, dan selulosa terhadap total massa senyawa lignoselulosa dan zat ekstraktif. Hasil pengujian metode Chesson-Datta ditampilkan pada **Tabel 1** berikut.

**Tabel 1.** Komposisi Awal Lignoselulosa pada Kulit Singkong

| Komponen     | Persentase Kadar (%b/b) |
|--------------|-------------------------|
| Hemiselulosa | 2,103                   |
| Selulosa     | 37,964                  |
| Lignin       | 15,531                  |

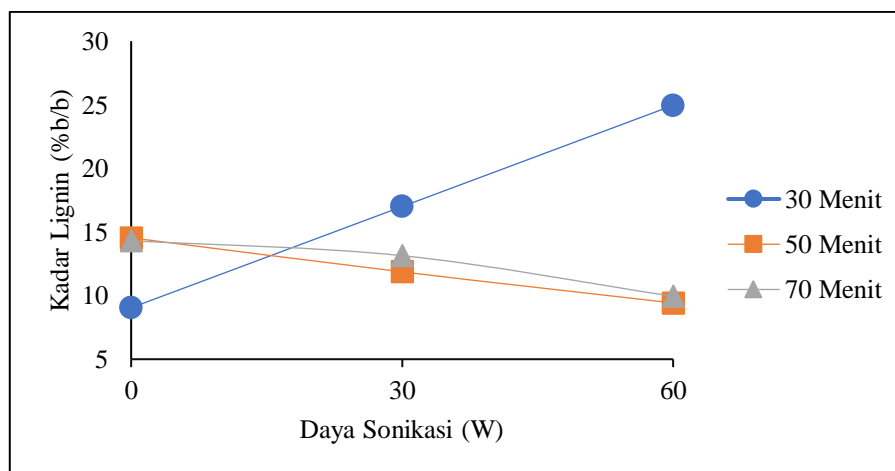
Hasil analisis menggunakan metode Chesson-Datta, sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 1** menunjukkan adanya kadar lignin yang masih tergolong tinggi sebesar 15,531%. Keberadaan lignin dapat menghambat kerja enzim hidrolisis dalam mengkonversi hemiselulosa dan selulosa menjadi gula reduksi dalam pembuatan bioenergi seperti bioethanol. Oleh karena itu, proses delignifikasi dibutuhkan guna mendegradasi lignin sehingga dapat meningkatkan kandungan hemiselulosa dan selulosa dalam biomassa. Adanya bantuan sonikasi dalam proses delignifikasi juga berpotensi untuk mempercepat degradasi lignin dan menghasilkan kadar selulosa yang tinggi.

### Pengaruh Daya Sonikasi pada Proses Delignifikasi terhadap Kadar Lignin Kulit Singkong

Penentuan kandungan lignin dan selulosa dalam kulit singkong setelah proses delignifikasi tanpa dan dengan sonikasi kembali dilakukan menggunakan metode Chesson-Datta. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan kadar lignin dan selulosa setelah diberikan perlakuan atau proses delignifikasi tanpa dan dengan bantuan sonikasi setelah proses refluks, pengeringan, dan penimbangan berulang. Data yang diperoleh disajikan dalam bentuk persen berat (%b/b), yang merepresentasikan kadar lignin dan selulosa terhadap total massa senyawa lignoselulosa dan zat ekstraktif. Hasil pengujian metode Chesson-Datta ditampilkan pada **Tabel 2** dan **Gambar 2** berikut

**Tabel 2.** Kadar Lignin Sesudah Delignifikasi pada Berbagai Variasi Daya dan Waktu Sonikasi

| Daya (W) | Waktu (Menit) |        |        |
|----------|---------------|--------|--------|
|          | 30            | 50     | 70     |
| 0        | 9,045         | 14,544 | 14,316 |
| 30       | 16,999        | 11,868 | 13,140 |
| 60       | 24,954        | 9,419  | 9,948  |

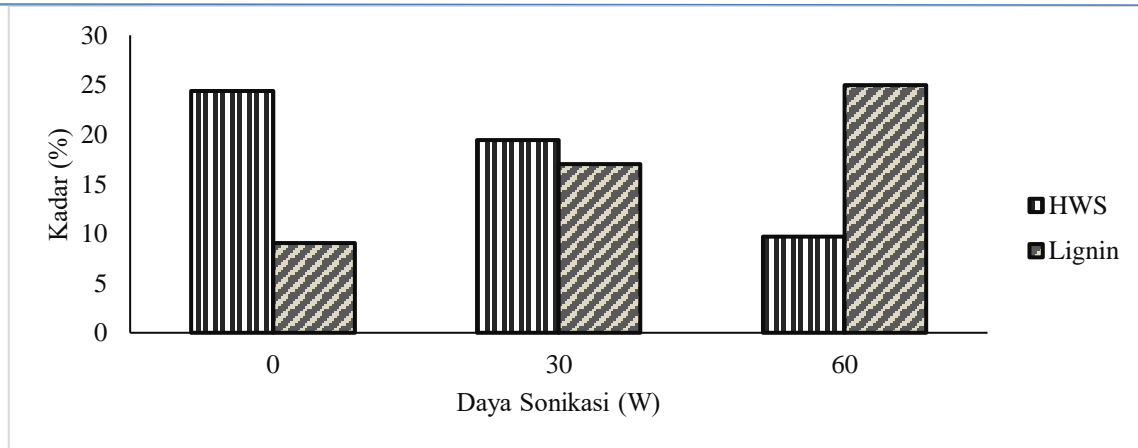


**Gambar 2.** Pengaruh Daya Sonikasi Terhadap Kadar Lignin Pada Berbagai Variasi Waktu

Berdasarkan **Gambar 2**, delignifikasi pada 30 menit mengalami kenaikan kadar lignin seiring bertambahnya daya sonikasi. Kenaikan kadar lignin ini disebabkan oleh keberadaan senyawa ekstraktif yang mengakibatkan penentuan kadar lignin terganggu [15]. Senyawa ekstraktif yang ada dalam biomassa merupakan semua kelompok senyawa heterogen yang mencakup semua senyawa organik seperti waxes, protein, pati, dan pektin [16]. Senyawa ekstraktif disini juga dapat disebut sebagai Hot Water Soluble. Penurunan kadar senyawa ekstraktif diikuti dengan meningkatnya kadar lignin, sehingga dapat diketahui semakin hilangnya senyawa ekstraktif maka lignin yang teridentifikasi mengalami kenaikan. Perbandingan kadar lignin dan Hot Water Soluble ditunjukkan pada **Gambar 3**.

Sedangkan pada delignifikasi 50 dan 70 menit, kadar lignin tampak mengalami penurunan seiring bertambahnya daya sonikasi. Penurunan kadar lignin pada delignifikasi dengan daya sonikasi 0 hingga 60 watt diakibatkan oleh terlarutnya lignin yang disebabkan oleh pelarut NaOH dan juga efek sonikasi. Larutnya lignin oleh pelarut NaOH diakibatkan oleh terputusnya ikatan eter (C-O-C) antara selulosa dengan kompleks lignin sehingga membentuk cincin epoksi (C-O-C) [17][18]. Sementara efek sonikasi menghasilkan kavitasasi yang melepaskan sejumlah energi sehingga menyebabkan terjadinya hotspot. Hotspot yang dihasilkan akan memberikan energi untuk mendorong terjadinya delignifikasi karena mengakibatkan kenaikan suhu selama proses delignifikasi yang mempercepat proses degradasi dari lignin [19][18][20].

Penurunan kadar lignin dibuktikan dengan meningkatnya kadar selulosa yang ditunjukkan pada **Tabel 3** pada grafik ditunjukkan kadar selulosa mengalami kenaikan ketika delignifikasi menggunakan daya 0 hingga 60 Watt Hal ini menunjukkan hasil yang sejalan dengan penurunan serta kenaikan kadar dari lignin.



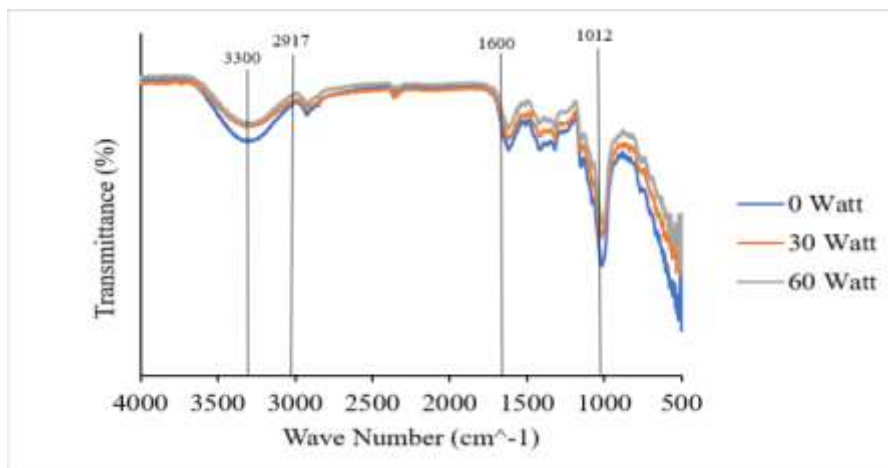
Gambar 3. Perbandingan Kadar Lignin Dan Hot Water Soluble Pada Rentang Daya 0 Hingga 60 Watt

Tabel 3. Kadar Selulosa Sesudah Delignifikasi pada Berbagai Variasi Daya dan Waktu Sonikasi

| Daya (W) | Waktu (Menit) |        |         |
|----------|---------------|--------|---------|
|          | 30            | 50     | 70      |
| 0        | 48,878        | 60,380 | 65,448  |
| 30       | 52,572        | 67,780 | 66,9045 |
| 60       | 56,266        | 68,361 | 75,180  |

#### Analisis Gugus Fungsi Kulit Singkong Dengan Fourier Transform Infrared (FTIR)

Kulit singkong hasil delignifikasi tanpa dan dengan bantuan sonikasi memiliki gugus fungsi tertentu yang dapat menunjukkan keberadaan lignoselulosa di dalamnya. Penentuan gugus fungsi lignoselulosa yang dimiliki dilakukan menggunakan spektrofotometri FTIR (Fourier Transform Infrared). Spektrum gelombang gugus fungsi ditampilkan dalam panjang gelombang (Wave number) dengan satuan  $\text{cm}^{-1}$  dan intensitas pita serapan ditampilkan dalam persentase transmisi (Transmittance) dengan satuan %. Spektrum gelombang ini ditampilkan dalam Gambar 4 berikut.



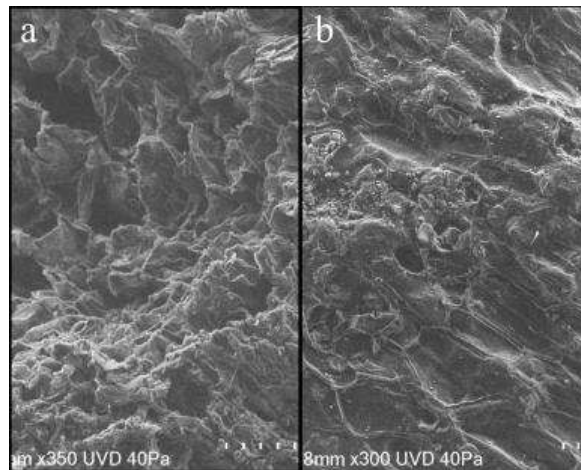
Gambar 4. Spektrum FTIR Pada Kulit Singkong Setelah Delignifikasi Tanpa dan Dengan Sonikasi

Pengaruh delignifikasi dengan bantuan sonikasi dibuktikan melalui perubahan pada titik  $1600 \text{ cm}^{-1}$  dan  $2917 \text{ cm}^{-1}$ . Puncak pada  $1600 \text{ cm}^{-1}$  menunjukkan peregangan gugus COOH pada cincin aromatik lignin, sedangkan puncak  $2917 \text{ cm}^{-1}$  mengidentifikasi gugus fungsi  $\text{CH}_2$  dan  $\text{CH}_3$  lignin [21], [22]. Pada sampel tanpa sonikasi, kedua puncak menunjukkan serapan yang lebih tinggi, hal ini menunjukkan keberadaan lignin yang masih utuh. Namun, seiring peningkatan daya sonikasi menjadi 30 W dan 60 W, terjadi peningkatan nilai transmittance pada kedua bilangan gelombang tersebut. Peningkatan transmittance ini menandakan bahwa ikatan aromatik dan rantai hidrokarbon pada lignin telah terdegradasi akibat efek kavitas sonikasi.

Kondisi optimum selulosa tercapai pada daya 60 W, yang ditunjukkan oleh analisis pada titik 1012  $\text{cm}^{-1}$  dan 3300  $\text{cm}^{-1}$ . Puncak 1012  $\text{cm}^{-1}$  mengindikasikan pembengkokan senyawa metilen  $\text{CH}_2$  selulosa dan gugus  $\text{C-OH}$ , di mana puncak terendah menunjukkan penumpukan senyawa selulosa akibat hilangnya lignin [23], [24]. Pada 3300  $\text{cm}^{-1}$ , terbentuk puncak melebar yang menunjukkan gugus fungsi  $\text{OH}^-$  yang tetap teridentifikasi dengan baik pada daya 60 W. Keberadaan kedua puncak ini mengonfirmasi bahwa kerangka dasar selulosa masih teridentifikasi. Dengan demikian, daya 60 W merupakan kondisi optimum yang menyeimbangkan degradasi lignin maksimal dan kadar selulosa.

#### Perubahan Morfologi Permukaan Kulit Singkong Dengan Scanning Electron Microscope (SEM)

Kulit singkong yang telah delignifikasi baik tanpa dan dengan bantuan sonikasi dianalisis adanya perubahan morfologi menggunakan SEM (Scanning Electron Microscope). Hal ini menunjukkan adanya pengaruh sonikasi terhadap morfologi permukaan kulit singkong sehingga dapat menjadi pembanding penentuan kondisi sonikasi terefektif. Perbedaan morfologi permukaan kulit singkong hasil delignifikasi tanpa dan dengan bantuan sonikasi ditampilkan dalam **Gambar 5**.



**Gambar 5.** Hasil SEM Morfologi Permukaan Kulit Singkong a) Tanpa Sonikasi 350x  
 b) Penambahan Sonikasi Daya 60 watt 300x

Berdasarkan **Gambar 5a**, dapat diketahui adanya proses delignifikasi tanpa bantuan sonikasi membentuk morfologi permukaan kulit singkong yang mulai terkoyak dan acak, namun belum terbuka sempurna. Sedangkan, berdasar **Gambar 5b** dapat diketahui proses delignifikasi dengan penambahan sonikasi membentuk morfologi permukaan menjadi lebih pecah, terdapat pola robekan lingkaran yang teratur dimana menandakan selulosa telah terbuka dari ikatan lignin. Penambahan sonikasi juga menyebabkan terbentuknya lubang seperti bekas letupan akibat fenomena kavitasi, yaitu fenomena dimana gelembung sonikasi yang membesar lalu meledak dan melepaskan energi [25]. Energi yang dilepaskan mempercepat degradasi lignin dari lignoselulosa. Hasil yang didapatkan sejalan dengan penelitian [26] dan [27], yang menunjukkan adanya sonikasi menghasilkan kerusakan biomassa yang lebih masif dengan pola robekan melingkar teratur sehingga dapat meningkatkan efektivitas proses delignifikasi.

#### 4. Kesimpulan

Proses delignifikasi kulit singkong dengan bantuan sonikasi berhasil meningkatkan kadar selulosa melalui degradasi lignin. Kadar selulosa tertinggi (75,180%) diperoleh pada daya sonikasi 60 watt dengan waktu delignifikasi 70 menit. FTIR mengonfirmasi adanya penurunan intensitas gugus fungsi lignin ( $\text{COOH}$  pada 1600  $\text{cm}^{-1}$ ,  $\text{CH}_2$  dan  $\text{CH}_3$  pada 2917  $\text{cm}^{-1}$ ). Analisis SEM menunjukkan perubahan morfologi permukaan yang signifikan dengan terbentuknya pola robekan melingkar teratur dan lubang akibat fenomena kavitasi, yang mengindikasikan terbukanya struktur selulosa dari ikatan lignin. Secara keseluruhan, kondisi optimum diperoleh pada daya sonikasi 60 watt dengan waktu delignifikasi 70 menit. Kadar selulosa yang tinggi ini berpotensi sebagai penghasil gula reduksi yang tinggi dan meningkatkan efisiensi fermentasi bioethanol.

#### 5. Saran

Penulis menyarankan untuk melakukan evaluasi terhadap temperatur yang dicapai ketika menggunakan daya sonikasi yang tinggi. Hal tersebut dilakukan untuk menghindari pembentukan gugus

keton pada selulosa. Selain itu penulis juga menyarankan agar duty cycle dapat disesuaikan dengan variable daya dan waktu yang digunakan agar larutan tidak mencapai temperatur yang terlalu tinggi.

## 6. Referensi

- [1] M. Zaki, R. Mamat, and H. Susanto, "Potential And Utilization Of Biomass For Heat Energy In Indonesia: A Review," *International Journal Of Scientific & Technology Research*, vol. 9, no. 10, 2020, [Online]. Available: [www.ijstr.org](http://www.ijstr.org)
- [2] A. Zoghalmi and G. Paës, "Lignocellulosic Biomass: Understanding Recalcitrance and Predicting Hydrolysis," Dec. 18, 2019, *Frontiers Media S.A.* doi: 10.3389/fchem.2019.00874.
- [3] D. Watkins, M. Nuruddin, M. Hosur, A. Tcherbi-Narteh, and S. Jeelani, "Extraction and characterization of lignin from different biomass resources," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 26–32, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.jmrt.2014.10.009.
- [4] J. Minmunin, P. Limpitipanich, and A. Promwungkwa, "Delignification of Elephant Grass for Production of Cellulosic Intermediate," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, Nov. 2015, pp. 220–225. doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.468.
- [5] E. Hartulistiyoso, O. Farobie, and M. Zaky, "Delignification of Cassava Peel as Bioethanol Raw Material using Combined Alkali and Microwave Heating Methods," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2022. doi: 10.1088/1755-1315/1038/1/012021.
- [6] Gumulya, Devanny, and Jason Aditya. "Eksplorasi kulit singkong dan aplikasinya menjadi produk tas." *Industri Inovatif: Jurnal Teknik Industri* 14.2 (2024): 134-144.
- [7] Y. C. Park and J. S. Kim, "Comparison of various alkaline pretreatment methods of lignocellulosic biomass," *Energy*, vol. 47, no. 1, pp. 31–35, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.08.010.
- [8] S. Rezanía *et al.*, "Different pretreatment technologies of lignocellulosic biomass for bioethanol production: An overview," *Energy*, vol. 199, May 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117457.
- [9] J. S. Kim, Y. Y. Lee, and T. H. Kim, "A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass," Jan. 01, 2016, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.biortech.2015.08.085.
- [10] O. Onu Olughu, L. G. Tabil, and T. Dumonceaux, "Ultrasonic delignification and microstructural characterization of switchgrass," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 2, Jan. 2021, doi: 10.3390/en14020263.
- [11] M. Bilal, M. Asgher, H. M. N. Iqbal, and M. Ramzan, "Enhanced Bio-ethanol Production from Old Newspapers Waste Through Alkali and Enzymatic Delignification," *Waste Biomass Valorization*, vol. 8, no. 7, pp. 2271–2281, Oct. 2017, doi: 10.1007/s12649-017-9871-7.
- [12] P. B. Subhedar and P. R. Gogate, "Alkaline and ultrasound assisted alkaline pretreatment for intensification of delignification process from sustainable raw-material," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 21, no. 1, pp. 216–225, 2014, doi: 10.1016/j.ultsonch.2013.08.001.
- [13] M. M. Kininge and P. R. Gogate, "Intensification of alkaline delignification of sugarcane bagasse using ultrasound assisted approach," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 82, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.ultsonch.2021.105870.
- [14] K. Thangavelu, R. Desikan, and S. Uthandi, "Delignification of Corn cob using Catalytic Hydrodynamic Cavitation Reactor," *Madras Agricultural Journal*, vol. 107, no. Special, 2020, doi: 10.29321/maj.s.000452.
- [15] D. Fengel and G. Wegener, *Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. New York: Walter de Gruyter, 1989.
- [16] C. Telmo and J. Lousada, "The explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood," *Biomass Bioenergy*, vol. 35, no. 5, pp. 1663–1667, May 2011, doi: 10.1016/j.biombioe.2010.12.038.
- [17] M. A. Pradana, H. Ardhyanta, and M. Farid, "Pemisahan Selulosa dari Lignin Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Proses Alkalisasi untuk Penguat Bahan Komposit Penyerap Suara," *JURNAL TEKNIK ITS*, vol. 6, no. 2, pp. 413–416, 2017.
- [18] S. Zhand, B. S. Yang, K.-Y. Kang, and M.-J. Jeong, "Robust Pretreatment in Combination with Ultrasound- Assisted Surfactant to Improve the Enzymatic Hydrolysis of *Eucalyptus pellita*," *Bioresources*, vol. 19, no. 2, pp. 2244–2271, 2024.
- [19] Y. Darni *et al.*, "Pengaruh proses ultrasonikasi terhadap ukuran serat selulosa dari batang sorgum," *Jurnal Teknologi dan Inovasi Industri*, vol. 01, no. 01, pp. 1–007, 2020.

- [20] H. A. Permana, F. Delvitasari, W. R. Hartari, and M. Maryanti, "Pengaruh Konsentrasi NaOH dan Suhu Delignifikasi pada Kandungan Lignoselulosa Tandan Kosong Kelapa Sawit," *Jurnal Agro Industri Perkebunan*, pp. 51–58, Mar. 2024, doi: 10.25181/jaip.v12i1.2729.
- [21] X. Li, Y. Wei, J. Xu, N. Xu, and Y. He, "Quantitative visualization of lignocellulose components in transverse sections of moso bamboo based on fir macro- and micro-spectroscopy coupled with chemometrics," *Biotechnol. Biofuels*, vol. 11, no. 1, pp. 1–16, 2018, doi: 10.1186/s13068-018-1251-4.
- [22] D. D. Anggoro, A. Prasetyaningrum, W. Udaibah, A. B. Imtinan, F. Nabilah, and B. U. Le Monde, "Effect of ultrasound-advanced oxidation processes for pretreatment of oil palm mesocarp fiber for cellulose extraction," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 13, no. 3, pp. 532–538, May 2024, doi: 10.61435/ijred.2024.60027.
- [23] A. B. D. Nandiyanto, R. Ragadhita, and M. Fiandini, "Interpretation of Fourier Transform Infrared Spectra (FTIR): A Practical Approach in the Polymer/Plastic Thermal Decomposition," *Indonesian Journal of Science and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 113–126, 2023, doi: 10.17509/ijost.v8i1.53297.
- [24] R. Md Salim, J. Asik, and M. S. Sarjadi, "Chemical functional groups of extractives, cellulose and lignin extracted from native *Leucaena leucocephala* bark," *Wood Sci. Technol.*, vol. 55, no. 2, pp. 295–313, Mar. 2021, doi: 10.1007/s00226-020-01258-2.
- [25] R. W. N. Nugroho, B. L. Tardy, S. M. Eldin, R. A. Ilyas, M. Mahardika, and N. Masruchin, "Controlling the critical parameters of ultrasonication to affect the dispersion state, isolation, and chiral nematic assembly of cellulose nanocrystals," Oct. 01, 2023, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.ultsonch.2023.106581.
- [26] F. Puspasari, "Produksi Gula Pereduksi dari Degradasi Pati Singkong melalui Proses Sonikasi disertai Pengadukan," *Majalah Polimer Indonesia*, vol. 21, no. 2, Dec. 2018, doi: 10.37889/mpi.2018.21.2.3.
- [27] V. Z. Ong, T. Y. Wu, C. B. T. L. Lee, N. W. R. Cheong, and K. P. Y. Shak, "Sequential ultrasonication and deep eutectic solvent pretreatment to remove lignin and recover xylose from oil palm fronds," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 58, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.ultsonch.2019.05.015.