

Research Paper

Delignifikasi Kandungan Lignoselulosa Bagas Tebu (*Saccharum officinarum*) dengan Variasi Ukuran dan Waktu *Pretreatment*

Delignification of Lignocellulosic Content of Sugarcane Bagasse (*Saccharum officinarum*) with Variations in Size and Pretreatment Time

Andi Asdiana Irma Sari Yusuf*, Sakinah Islamiati Abadi, Sariwahyuni.

Jurusan Teknik Kimia Mineral, Politeknik ATI Makassar, Jl. Sunu No.220, Makassar, Sulawesi Selatan 90211, Indonesia

Artikel Histori : Submitted 29 August 2024, **Revised** 25 September 2024, **Accepted** 4 October 2024, **Online** 30 November 2024

 <https://doi.org/10.33096/jcpe.v9i2.976>

ABSTRAK: Bagas tebu (*Saccharum officinarum*) merupakan limbah dari proses produksi gula yang memiliki potensi sebagai bahan baku dalam pembuatan bioetanol karena kandungan lignoselulosa. Pada lignoselulosater terdapat komponen penting seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Penelitian ini berfokus pada upaya delignifikasi bagas tebu (*Saccharum officinarum*) melalui kombinasi perlakuan mekanis dan autoklaf dengan variasi ukuran partikel dan waktu pemanasan. Adapun tujuan dari studi ini yaitu penurunan kandungan lignin dan juga meningkatkan proporsi selulosa dan hemiselulosa, komponen penting yang digunakan untuk menghasilkan produk bernilai seperti bioetanol. Dalam penelitian ini, bagas tebu diproses dengan ukuran partikel 60, 70, dan 80 mesh serta dipanaskan dalam autoklaf selama 30, 45, dan 60 menit, kemudian metode Chesson-Datta digunakan untuk menganalisis kandungan lignoselulosa bagas tebu yang telah melalu proses delignifikasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ukuran partikel 80 mesh dan waktu pemanasan 60 menit memberikan hasil terbaik dengan kandungan lignin terendah sebesar 14,27%, sementara selulosa dan hemiselulosa masing-masing mencapai 44,3% dan 26,75%. Hal tersebut menunjukkan bahwa variasi ukuran partikel dan durasi pemanasan sangat mempengaruhi efektivitas proses delignifikasi. Optimasi kedua parameter ini penting untuk meningkatkan kandungan selulosa dan hemiselulosa serta mengurangi lignin. Penelitian lebih lanjut diharapkan dapat mengembangkan teknik pretreatment yang lebih efektif untuk meningkatkan efisiensi konversi biomassa bagas tebu dalam aplikasi industri.

Kata Kunci: Bagas Tebu; Lignoselulosa; Delignifikasi

ABSTRACT: Sugarcane bagasse (*Saccharum officinarum*) is a byproduct of the sugar production process and holds potential as a raw material for bioethanol production due to its lignocellulose content. Lignocellulose contains important components such as cellulose, hemicellulose, and lignin. This study focuses on the delignification of sugarcane bagasse (*Saccharum officinarum*) through a combination of mechanical and autoclave treatments, with variations in particle size and heating time. The goal of this study is to reduce the lignin content and increase the proportion of cellulose and hemicellulose, key components for producing valuable products for instance bioethanol. In this research, sugarcane bagasse was processed with particle sizes of 60, 70, and 80 mesh, and heated in an autoclave for 30, 45, and 60 minutes. The Chesson-Datta method was used to analyze the lignocellulose content of the bagasse after the delignification process. The results showed that the best outcome was achieved with a particle size of 80 mesh and a heating time of 60 minutes, yielding the lowest lignin content at 14.27%, while cellulose and hemicellulose reached 44.3% and 26.75%, respectively. This indicates that variations in particle size and heating duration significantly affect the effectiveness of the delignification process. Optimizing these two parameters is crucial for increasing cellulose and hemicellulose content while reducing lignin. Further research is expected to develop more effective pretreatment techniques to enhance the efficiency of sugarcane bagasse biomass conversion for industrial applications.

Keywords: Bagasse; Lignocellulose; Delignification.

1. PENDAHULUAN

Produksi energi terbarukan dari biomassa lignoselulosa telah menjadi salah satu topik penelitian yang sangat menarik dalam dekade terakhir [1]. Salah satu sumber biomassa yang paling melimpah di negara-negara tropis adalah bagas tebu, yang merupakan residu dari industri gula [2]. Penggilingan tebu (*Saccharum officinarum*) menghasilkan banyak bagas tebu sebagai hasil samping dari proses penyulingan gula, yang merupakan sisa dari ekstraksi nira [3]. Industri gula memanfaatkan bagas tebu sebagai bahan

Published by
Department of Chemical Engineering
Faculty of Industrial Technology
Universitas Muslim Indonesia, Makassar

Address

Jalan Urip Sumohardjo km. 05 (Kampus 2 UMI) Makassar- Sulawesi Selatan
e-mail : jcpe@umi.ac.id

Corresponding Author *
andiasdianaisy@atim.ac.id



bakar untuk menggerakkan boiler yang mengoperasikan pabrik gula. Selain itu, bagas tebu juga dapat dimanfaatkan untuk memproduksi barang bernilai ekonomis karena kandungan lignoselulosa yang terkandung. Jumlah komponen lignoselulosa dalam hasil samping industri pertanian dari berbagai sumber dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kandungan lignoselulosa

| No | Hasil Samping Industri Pertanian | Lignin | Selulosa | Hemiselulosa |
|----|----------------------------------|-------------|--------------|--------------|
| 1 | Ampas Tebu [5] | 19,72-21,7% | 41,1- 45,26% | 23,01-26,4% |
| 2 | Jerami Padi [6] | 11,12% | 27,09% | 17,46% |
| 3 | Tandan Kosong Sawit [3] | 27,35% | 40,57% | 20,40% |
| 4 | Serabut Kelapa [16] | 39,9% | 21,7% | 20,1% |

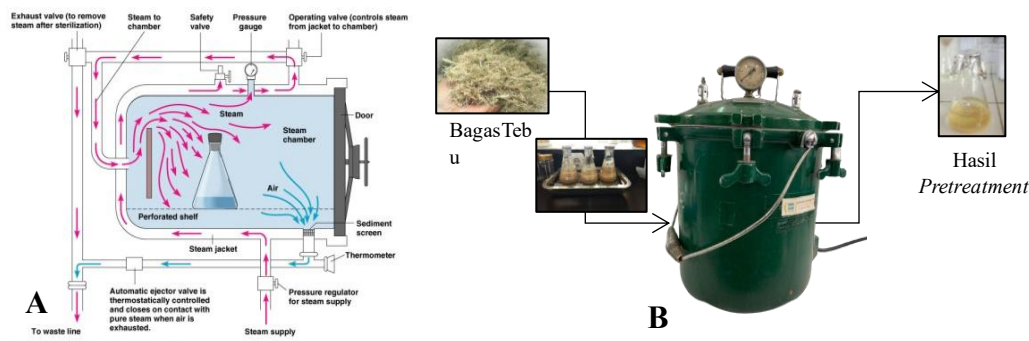
Lignoselulosa merupakan komponen yang menyusun sel dinding tanaman sehingga tanaman tersebut menjadi kokoh [3]. Selulosa, lignin, dan hemiselulosa adalah komponen utama lignoselulosa. Selulosa merupakan salah satu dari ketiga komponen tersebut yang dapat dimanfaatkan dalam produksi kertas dan bioetanol yang memberikan banyak keuntungan. Di sisi lain, lignin dapat digunakan sebagai perekat, sementara hemiselulosa sebagai bahan dasar dalam produksi bioetanol [5]. Keberadaan lignin pada kondisi tertentu tidak menguntungkan. Lignin yang terkandung dalam lignoselulosa menjadi penghalang utama dalam proses hidrolisis enzimatis, sehingga delignifikasi menjadi langkah kritis untuk memaksimalkan konversi selulosa menjadi produk yang bernilai, seperti bioetanol [7].

Pretreatment sebagai “tahap krusial” dalam konversi bahan organik, yang bertujuan memodifikasi bahan lignoselulosa dari segi struktur dan ukuran dengan cara mengurangi kandungan lignin dan meningkatkan kandungan selulosa serta hemiselulosa [8]. Tahap awal *pretreatment* baik secara fisik maupun mekanis, bertujuan untuk mengurangi ukuran biomassa dan meningkatkan luas permukaan sampel, sehingga mempermudah proses degradasi [9]. Ukuran partikel merupakan parameter penting yang mempengaruhi luas permukaan yang tersedia untuk reaksi kimia. Partikel yang lebih kecil cenderung memiliki luas permukaan yang lebih besar, sehingga memungkinkan reaksi yang lebih cepat dan efisien [10][11][12]. Selain itu, waktu *pretreatment* juga berperan penting dalam menentukan derajat delignifikasi. Waktu yang lebih lama umumnya meningkatkan tingkat delignifikasi, tetapi dapat menyebabkan degradasi selulosa dan hemiselulosa jika terlalu lama [13][14][15]. Oleh karena itu, optimasi kedua parameter ini dalam proses *pretreatment* sangat penting untuk mencapai hasil yang maksimal.

Teknik pemanasan autoklaf pada prinsipnya memiliki tujuan yang sama dengan *pretreatment* subkritis; namun, autoklaf beroperasi pada tekanan dan suhu yang lebih rendah dibandingkan dengan metode subkritis [16]. Berdasar pada kelebihan autoklaf tersebut, maka dalam tahap *pretreatment* penelitian ini digunakan autoklaf agar lebih hemat energi. Penelitian yang telah dilakukan [16] dengan proses *pretreatment* secara fisik/mekanis dan menggunakan autoklaf menghasilkan lignin yang besar sehingga akan mengganggu pengolahan lanjutan. Dengan penggunaan *pretreatment* untuk delignifikasi bagas tebu (*Saccharum officinarum*) ditujukan menghasilkan hasil *pretreatment* dengan lignin yang sedikit dan akan memberikan keuntungan untuk proses konversi selulosa atau hemiselulosa lanjutan agar menjadi produk bernilai tambah serta mendukung pengurangan zat sisa industri tebu Arasoe, Bone, Sulawesi Selatan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi ukuran partikel dan waktu *pretreatment* terhadap efisiensi delignifikasi bagas tebu. Dengan memahami interaksi antara kedua parameter ini, diharapkan dapat ditemukan kondisi optimal yang menghasilkan pengurangan lignin maksimal dengan kehilangan minimal pada komponen selulosa dan hemiselulosa.

2. METODE PENELITIAN

Sampel penelitian yang digunakan adalah bagas tebu (*Saccharum officinarum*) yang sering ditemukan menumpuk pada gudang industri gula Arasoe, Bone, Sulawesi Selatan dan pada tahap analisis lignoselulosa dengan metode Chesson-Datta digunakan aquades, HCl 1N dan H₂SO₄ 72%. Alat utama yang digunakan yaitu autoklaf dapat dilihat pada Gambar 1. Selain itu, beberapa alat yang digunakan meliputi neraca analitik, preangkat refluks, penangas air, oven, peralatan gelas dan sieve shaker 60, 70 dan 80 mesh.



Gambar 1. (A) Proses dalam Autoklaf (B) Autoklaf

2.1. Proses Delignifikasi

Untuk menghilangkan kotoran dari bagas tebu, langkah pertama dilakukan pembersihan bahan uji kemudian dipisahkan air dari bagas. Setelah itu, bagas tebu dijemur di bawah sinar matahari untuk mengurangi kadar air. Setelah kering, bagas tebu dicacah menjadi potongan kecil. Ukuran diperkecil lebih lanjut dengan menggunakan blender hingga menjadi serbuk. Untuk proses pengayakan digunakan ukuran 60, 70, dan 80 mesh. Sepuluh gram sampel uji dimasukkan ke dalam erlenmeyer, diisi dengan 200 mL aquades, ditutup dengan aluminium foil kemudian dimasukkan ke dalam autoklaf pada suhu 100°C dan tekanan 0,5 bar selama 30, 45 dan 60 menit. Setelah proses autoklaf, sampel disaring dan dikeringkan sebelum diuji dengan metode Chesson-Datta penentuan jumlah lignoselulosa yang tersisa.

2.2. Pengujian Lignoselulosa

Teknik Chesson-Datta digunakan untuk menentukan jumlah lignoselulosa dalam sampel. Metode ini meliputi penimbangan sampel 1 gram (berat a), kemudian ditambah 150 mL air suling. Sampel kemudian dipanaskan dalam penangas air pada suhu 100°C selama satu jam. Residu yang dihasilkan dikumpulkan dan dibilas dengan 300 mL aquades panas. Setelah itu, residu dikeringkan dalam oven hingga bobot konstan, kemudian ditimbang kembali (berat b). Selanjutnya, 100 mL HCl 1N ditambahkan ke dalam residu, lalu dipanaskan kembali dalam penangas air selama 1 jam. Setelah penyaringan dan pembilasan hingga pH mencapai 7, residu dikeringkan hingga bobot konstan (berat c). Kemudian, 100 mL H₂SO₄ 72% ditambahkan ke dalam residu kering dan campuran dibiarkan terendam pada suhu kamar selama 4 jam. Setelah penambahan 150 mL H₂SO₄ 1N, sampel direfluks selama 60 menit pada 100°C dalam penangas air. Setelah filtrat dibuang, residu dibilas dengan air hingga pH mencapai 7, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C hingga benar-benar kering dan ditimbang (berat d). Proses selanjutnya adalah pengabuan sebelum penimbangan terakhir (berat e). Untuk menentukan jumlah lignoselulosa dalam sampel digunakan persamaan berikut [17,18]:

1) Analisa Hemiselulosa

$$\text{Hemiselulosa (\%)} = (b-c)a \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

2) Analisa Selulosa

$$\text{Selulosa (\%)} = (c-d)a \times 100 \dots \dots \dots (2)$$

3) Analisa Lignin

$$\text{Lignin (\%)} = (d-e)a \times 100 \dots \dots \dots (3)$$

Keterangan :

a = Bobot sampel awal (gram)

b = Bobot residu penimbangan ke-2 (gram)

c = Bobot residu penimbangan ke-3 (gram)

d = Bobot residu penimbangan ke-4 (gram)

e = Bobot abu (gram)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada tabel 2 didapatkan hasil kandungan lignoselulosa dengan variasi ukuran 60,70 dan 80 mesh dengan waktu pemanasan 30, 45 dan 60 menit.

Tabel 2. Kandungan Lignoselulosa Bagas Tebu

| Ukuran (Mesh) | Waktu (Menit) | Kandungan Lignoselulosa | | |
|------------------|------------------|-------------------------|-----------------|-------------|
| | | Lignin(%) | Hemiselulosa(%) | Selulosa(%) |
| Kontrol | 0 | 24,32 | 23,13 | 20,75 |
| 60 | 30 | 21,28 | 28,51 | 27,32 |
| | 45 | 16,96 | 28,37 | 34,22 |
| | 60 | 15,82 | 36,21 | 36,61 |
| | 30 | 16,15 | 20,28 | 25,37 |
| 70 | 45 | 19,28 | 21,86 | 36,97 |
| | 60 | 18,55 | 29,36 | 36,80 |
| | 30 | 21,70 | 22,79 | 28,13 |
| | 45 | 18,63 | 24,67 | 42,61 |
| 80 | 60 | 14,27 | 27,75 | 44,30 |

3.1 Perubahan Warna Pelarut

Untuk prosedur delignifikasi digunakan aquades sebagai pelarut. Aquades memiliki sejumlah keuntungan, antara lain aman bagi lingkungan dan tidak meninggalkan residu yang berpotensi berbahaya. Selama proses pemanasan, warna pelarut akan berubah dari bening menjadi kekuningan. Perubahan warna ini terjadi karena air terurai menjadi ion H^+ dan OH^- , yang memungkinkan air berinteraksi dengan bagas tebu. Interaksi ini menyebabkan komponen-komponen dalam bagas tebu terurai melalui proses delignifikasi [18].



Sebelum *Pretreatment*



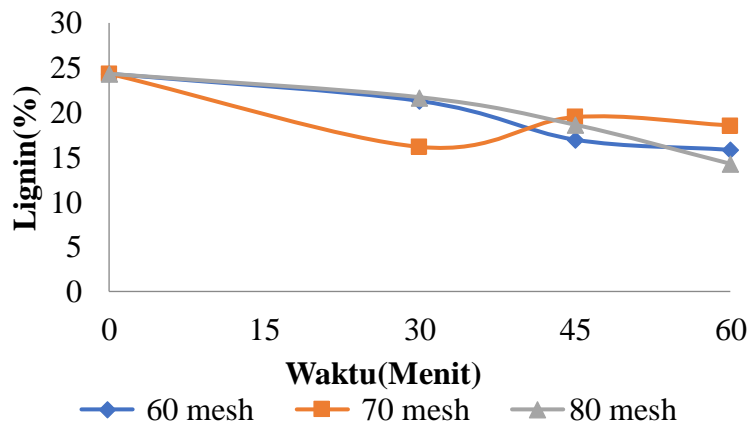
Setelah *Pretreatment*

Gambar 2. Perubahan warna pelarut sebelum dan setelah *pretreatment*

3.2. Kandungan Lignin

Pretreatment secara fisik efektif dalam menurunkan jumlah lignin [19]. Pada gambar 3 terlihat terjadi penurunan kandungan lignin secara keseluruhan setelah melewati proses delignifikasi dengan *Pretreatment* menggunakan autoclaf. *Pretreatment* menyebabkan pemecahan lignin yang dapat menjadi

penghalang akses enzim terhadap selulosa dan hemiselulosa pada proses lanjutan di tahap hidrolisis [20]. Lignin membungkus hemiselulosa sehingga menghalangi aksesibilitas air [21].

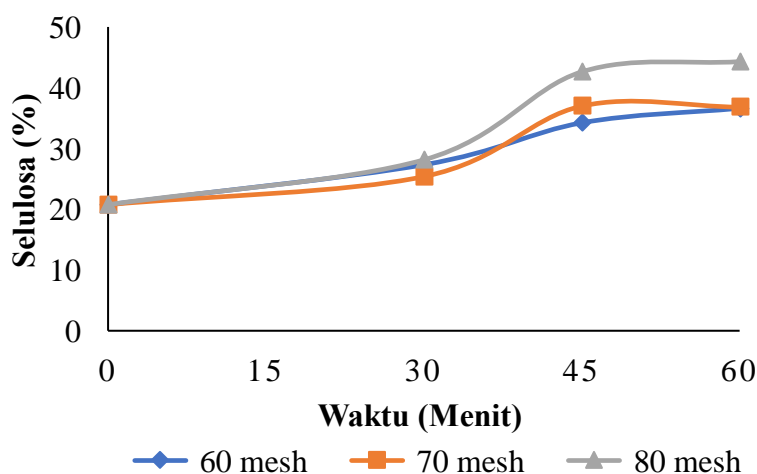


Gambar 3. Grafik kandungan lignin berdasarkan variasi ukuran dan waktu pemanasan

Gambar 3 memvisualisasikan data mengenai kandungan lignin berdasarkan variasi ukuran dan waktu pemanasan dengan kecenderungan lignin yang semakin berkurang dengan penambahan waktu delignifikasi. Lignin terendah didapatkan pada waktu *pretreatment* 60 menit. Berdasarkan [19], degradasi struktur biomassa lignoselulosa disebabkan oleh pemberian tekanan dan suhu yang tinggi di dalam autoclaf yang mengakibatkan pemutusan ikatan lignin dengan komponen lain yang terkandung dalam struktur kaku lignoselulosa. Dengan demikian, semakin lama waktu pemanasan maka semakin banyak penguraian lignin yang terjadi sehingga kandungan lignin akan semakin menurun. Variasi ukuran partikel bagas tebu secara sinergis dengan lama waktu pemanasan memberikan pengaruh signifikan, semakin kecil partikel bagas tebu maka pengurangan lignin semakin banyak, dengan kadar terendah pada bagas tebu 80 mesh. *Trend* berbeda terjadi untuk ukuran 70 mesh pada menit ke 30-45 yang berbeda dengan *trend* secara umum. Perbedaan tersebut disebabkan oleh pemecahan lignoselulosa yang hanya terjadi secara parsial karena tekanan tidak merata pada semua partikel bagas tebu. Mekanisme sama terjadi pada penelitian [20] yang menunjukkan bahwa ketidakseimbangan suhu dan tekanan pada semua bagian bagas tebu menyebabkan lignoselulosa sulit dipecah menjadi komponen yang lebih kecil. Beberapa bagian mengalami tekanan dan suhu tinggi, yang mempercepat pemecahan, sementara bagian lain tetap pada suhu yang lebih rendah dan mengalami pemecahan yang lebih lambat

3.3. Kandungan Selulosa

Setelah proses delignifikasi, kadar selulosa dalam sampel bagas tebu mengalami peningkatan. Bagas tebu yang diproses dengan ukuran 80 mesh dan waktu pemanasan 60 menit menunjukkan kadar selulosa tertinggi sebesar 44,3%.

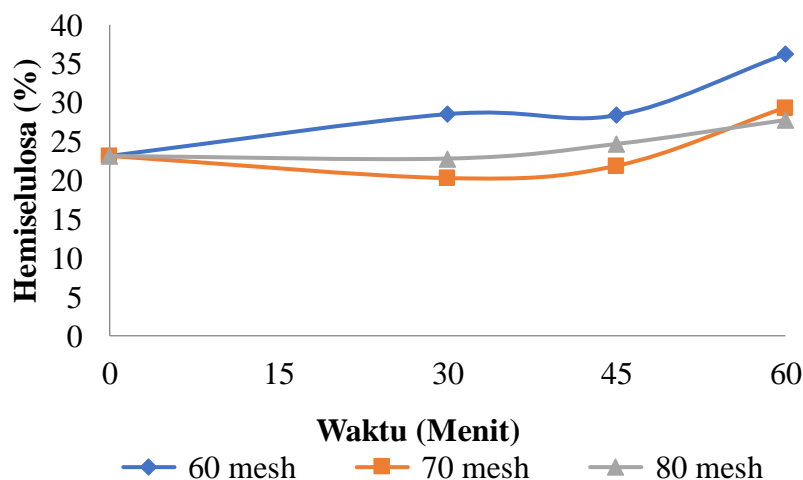


Gambar 4. Kandungan Selulosa Berdasarkan Variasi Ukuran dan Waktu Pemanasan

Proses delignifikasi menyebabkan lignoselulosa terdegradasi sehingga jumlah selulosa meningkat. Kebanyakan selulosa berasosiasi dengan lignin [21][22]. Penurunan jumlah lignin penghalang yang membungkus selulosa terjadi seiring dengan pemecahan struktur lignoselulosa yang disebabkan oleh pemanasan, semakin lama waktu pemanasan maka semakin banyak lignin yang terurai. Pemecahan struktur lignoselulosa menyebabkan ukuran partikel lebih kecil sehingga memberikan keuntungan, seperti pada penelitian terdahulu [23] bahwa biomassa yang lebih kecil cenderung memiliki luas permukaan spesifik yang lebih besar, sehingga memungkinkan kontak yang lebih baik antara agen delignifikasi dengan lignin. Hal tersebut meningkatkan kecepatan dan efisiensi proses delignifikasi serta dapat mempercepat reaksi kimia atau enzimatik.

3.4 Kandungan Hemiselulosa

Gambar 5 menunjukkan bahwa jumlah hemiselulosa meningkat seiring dengan peningkatan lama waktu pemanasan karena terjadi rekonstruksi struktur lignoselulosa dengan adanya tekanan yang dihasilkan dari pemanasan autoklaf. Setelah pemanasan 60 menit, kadar hemiselulosa yang dicapai pada 60 mesh relatif tinggi, yaitu sebesar 36,21 %.

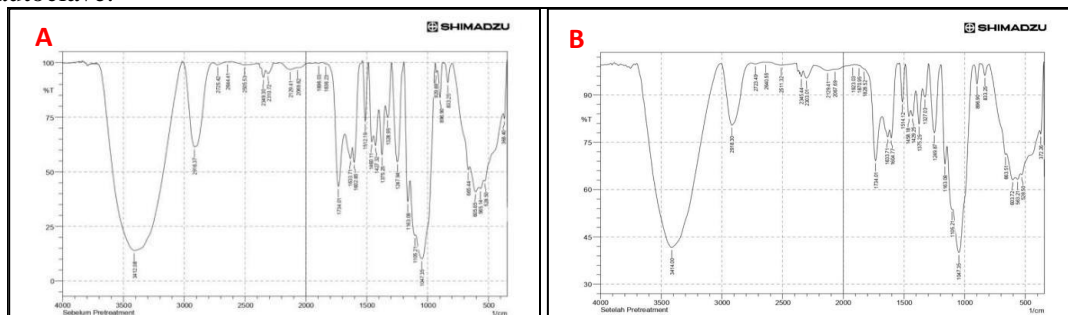


Gambar 5. Kandungan Hemiselulosa Berdasarkan Variasi Ukuran dan Waktu pemanasan

Proses degradasi lignin dalam bagas tebu menyebabkan lignin larut ke dalam filtrat, yang pada gilirannya mendukung pemecahan hemiselulosa [24][25]. Hal tersebut penyebab konsentrasi hemiselulosa meningkat. Kadar hemiselulosa yang lebih rendah dicapai dengan ukuran 70 dan 80 mesh yang dipanaskan selama 60 menit, dengan persentase hemiselulosa masing-masing sebesar 29,36% dan 27,75%. Variasi ini menunjukkan kadar hemiselulosa yang rendah karena hemiselulosa yang ada terhidrolisis bersama dengan lignin. Menurut [26][27], hemiselulosa memiliki sifat mudah larut karena rantai polimer yang pendek dan tidak teratur, yang menyebabkan sebagian kandungan hemiselulosa terlarut bersama lignin.

3.5 Hasil Uji FTIR

Gambar 6 menunjukkan hasil uji FTIR dari sampel bagas tebu sebelum (A) dan setelah (B) *pretreatment*, terdapat pergeseran puncak yang signifikan, karena sampel telah melewati proses pemanasan dengan autoclave.



Gambar 6. Hasil Uji FTIR Pada Sampel Sebelum (A) dan setelah (B) *Pretreatment*

Nilai absorpsi yang tinggi pada daya serapan $3300\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ [28] menyebabkan O-H *stretching* pada grup hidroksi selulosa, dan ikatan deformasi –OH pada daerah sekitar 3414 cm^{-1} menunjukkan terjadi penyerapan air. Penyerapan air dapat menyebabkan degradasi struktur lignoselulosa sehingga menimbulkan rekonstruksi yang berdampak pada perubahan kandungan selulosa, hemiselulosa dan lignin. Ikatan lignin ditunjukkan pada daerah serapan C=C dengan gelombang $1200\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$, dengan pengurangan intensitas setelah proses *pretreatment* dengan autoclave yang mengindikasikan telah terjadi proses delignifikasi. Pada daerah serapan terdapat *bending* karena adanya regangan pada molekul yang bervibrasi menunjukkan ikatan antara hemiselulosa dan selulosa. Dengan demikian dapat diindikasikan bahwa hasil uji FTIR menunjukkan bagas tebu yang telah mengalami *pretreatment* autoclaf memberikan dampak delignifikasi pada lignoselulosa dengan masih menyisakan sebagian kadar lignin yang ditunjukkan pada rentang peak $1200\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$.

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kadar lignoselulosa pada bagas tebu dipengaruhi oleh ukuran dan waktu pemanasan selama proses delignifikasi. Dengan ukuran sampel 80 mesh dan waktu pemanasan 60 menit, penelitian ini memperoleh konsentrasi lignin terendah sebesar 14,27%. Sementara itu, kadar selulosa dan hemiselulosa masing-masing mencapai 44,30% dan 27,75%. Kadar lignin yang rendah memberikan petunjuk penting untuk tahap pengolahan lanjutan dalam konversi bagas tebu menjadi produk bernilai guna. Hal ini dipengaruhi oleh rendahnya kadar lignin terhadap peningkatan jumlah selulosa dan hemiselulosa yang dihasilkan selama proses dekomposisi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada UPPM Politeknik ATI Makassar untuk pendanaan publikasi dan kepada pihak-pihak yang membantu pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Z. Ma and Y. Liu, "Advances in lignocellulosic biomass pretreatment: A review," **Bioresource Technology**, vol. 344, p. 126232, 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2021.126232.
- [2] R. Kumar and C. E. Wyman, "Effects of particle size on the hydrolysis of cellulose by cellulase," **Biotechnology and Bioengineering**, vol. 111, no. 4, pp. 663-669, 2014, doi: 10.1002/bit.25101.
- [3] Sutini, Widiastuty, Y. R., Murdowo, M. R., and A. N. Ramadhani, "Optimasi Produksi Fermentable Sugar dengan Hidrolisis Enzimatis Limbah Daun Nanas (*Ananas comosus* [L] Merr) Sebagai Bahan Baku Biofuel Ramah Lingkungan," **Proceedings National Conference PKM Center**, pp. 119-123, 2020.
- [4] Sutikno, Marniza, and N. Sari, "Pengaruh Perlakuan Awal Basa dan Hidrolisis Asam terhadap Kadar Gula Reduksi Ampas Tebu," **Jurnal Teknologi Industri & Hasil Pertanian**, vol. 20, no. 2, pp. 65-72, 2015.
- [5] F. Ni'mah, B. D. Argo, M. Lutfi, D. M. Maharani, and A. W. Putranto, "Perbandingan Proses Pretreatment Degradasi Lignin Jerami Padi Dengan Wet Milling dan Dry Milling Pada Produksi Bioetanol," **Jurnal Teknologi Pertanian**, vol. 15, no. 2, pp. 77-84, 2014.
- [6] F. Junianti, **Produksi Hidrogen dari Sabut Kelapa melalui Pretreatment Air Subkritis dan Hidrolisis Enzimatis**, Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2016.
- [7] Y. Zhang and J. Zhang, "Recent advances in biomass fractionation and delignification strategies," **Green Chemistry**, vol. 25, no. 4, pp. 1503-1524, 2023, doi: 10.1039/D3GC00241G.
- [8] Munawara, **Pengaruh Waktu Pretreatment terhadap Kandungan Lignoselulosa pada Ampas Kelapa Sebagai Bahan Baku Pembuatan Bioetanol**, Makassar: Politeknik ATI Makassar, 2022.

- [9] N. L. Widyawati and B. D. Argo, "Pemanfaatan Microwave dalam Proses Pretreatment Degradasi Lignin Ampas Tebu (Bagasses) pada Produksi Bioetanol," **Jurnal Teknologi Pertanian**, vol. 15, no. 1, pp. 1-6, 2014.
- [10] Y. Zhao and Y. Xie, "Effects of Particle Size on Catalytic Reaction Rates: A Comprehensive Review," **Chemical Engineering Journal**, vol. 413, p. 128599, 2021, doi: 10.1016/j.cej.2020.128599.
- [11] J. Song and Z. Yao, "Nanoparticle Size and Surface Area as Determinants of Catalytic Activity in Chemical Reactions," **Journal of Physical Chemistry C**, vol. 124, no. 10, pp. 5337-5345, 2020, doi: 10.1021/acs.jpcc.9b11468.
- [12] Y. Lee and H. Kim, "Particle Size and Reactivity in Solid-State Reactions: Experimental and Theoretical Approaches," **Journal of Materials Chemistry A**, vol. 3, no. 12, pp. 6364-6370, 2015, doi: 10.1039/c4ta06123f.
- [13] F. Guo and Q. Zhang, "Impact of Pretreatment Time on Delignification and Cellulose Preservation in Lignocellulosic Biomass," **Bioresource Technology**, vol. 330, p. 124995, 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.124995.
- [14] Z. Liu and H. Chen, "Optimization of Pretreatment Time for Enhanced Delignification of Biomass: Balancing Lignin Removal and Cellulose Preservation," **Industrial Crops and Products**, vol. 138, p. 111576, 2019, doi: 10.1016/j.indcrop.2019.111576.
- [15] G. Kaur and A. Arora, "Effects of Pretreatment Duration on Delignification Efficiency and Enzymatic Hydrolysis of Agricultural Residues," **Renewable Energy**, vol. 121, pp. 699-708, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.01.017.
- [16] M. R. Hidayat, "Teknologi Pretreatment Bahan Lignoselulosa Dalam Proses Produksi Bioetanol," **BIOPROPAL INDUSTRI**, vol. 4, pp. 33-48, 2013.
- [17] W. Sulaiman, Sugiyarto, and E. Mahajoeno, "Biodelignification of Coconut Wood Sawdust Using *Pleuratus Sapidus*," **Seminar Nasional Edusainstek**, pp. 37-45, 2018.
- [18] A. Fauziah, Rodiansono, and Sunardi, "Analisis Spektroskopi Inframerah Transformasi Fourier (FTIR) dan Perubahan Warna Lignoselulosa Alang-alang (*Imperata cylindria*) Setelah Pretreatment Menggunakan Asam Encer," **Konversi**, vol. 8, pp. 10-16, 2019.
- [19] A. G. Hansen and B. L. Peterson, **Lignocellulose Degradation in Autoclave Systems: Chemical Reactions and Kinetics**, 3rd ed. New York, NY: Springer, 2020, pp. 100-105.
- [20] J. Doe, "Mechanical Pretreatment in Lignocellulosic Biomass: Effects on Sugarcane Bagasse," *Bioresource Technology*, vol. 150, no. 4, pp. 105-110, 2020. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.04.054
- [21] Novia, D. Wijaya, and P. Yanti, "Pengaruh Waktu Delignifikasi Terhadap Lignin dan Waktu SSF Terhadap Etanol Pembuatan Bioetanol Dari Sekam Padi," **Jurnal Teknik Kimia**, vol. 1, no. 23, pp. 19-27, 2017.
- [22] A. A. Yusuf, **Rekayasa Proses Produksi Xilitol Secara Mikrobial dari Tandan Kosong Sawit**, Bandung: Institut Teknologi Bandung, **AIP Conference Proceedings**, vol. 2085, no. 1, pp. 1-8, 2018.
- [23] M. Yu, Z. Wang, J. Wang, and J. Chen, "Effects of particle size on the hydrolysis and delignification of rice straw: Pretreatment with alkali solution and hydrogen peroxide," *BioResources*, vol. 11, no. 3, pp. 7480-7494, Sept. 2016
- [24] E. Mardawati, D. N. Daulay, D. W. Wira, and E. Sukarminah, "Pengaruh Konsentrasi Sel Awal dan pH Medium pada Fermentasi Xilitol dari Hidrolisat Tandan Kosong Sawit," **Jurnal Teknologi dan Manajemen Agroindustri**, vol. 7, pp. 23-30, 2018.

- [25] S. S. Amran, *Delignifikasi Ampas Kelapa dalam Pembuatan Bioetanol Menggunakan Pretreatment Fisika*, Makassar: Politeknik ATI Makassar, 2022.
- [26] M. R. Bina, Syaaruddin, L. O. Sahara, and M. Sayuti, "Kandungan Hemiselulosa, Selulosa dan Lignin Dalam Silase Ransum Komplit dengan Taraf Jerami Sorgum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) yang Berbeda," *Gorontalo Journal of Equatorial Animals*, vol. 2, pp. 44-53, 2023.
- [27] R. Smith and J. Brown, "Hemicellulose Structures and Their Interactions in Plant Cell Walls: Implications for Biomass Deconstruction," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, pp. 456-465, 2018.
- [28] A. G. Aditama, M. Farid, and H. Ardhyanta, "Isolasi Selulosa dari Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit untuk Nano Filter Komposit Absorpsi Suara: Analisis FTIR," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 6, pp. 228-231, 2017.