

Research Paper

Pretreatment Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) menggunakan Autoclave dengan Variasi Konsentrasi Pelarut H₂SO₄ untuk Meningkatkan Kadar Selulosa

Pre-Treatment of Empty Oil Palm Bunches (EOPB) Using Autoclave with Variations in H₂SO₄ Solvent Concentration to Increase Cellulose Content

Melani Ganing^{*a}, Annisa Inayah Suleman^a, Suriati Eka Putri^b, Sri Diana^a, Achmad Qodim Syafaatullah^a.

^aTeknik Kimia Mineral, Politeknik ATI Makassar, Jl. Sunu No. 220, Makassar, 90211, Indonesia.

^bJurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Makassar, Jl. Daeng Tata, Makassar, Indonesia.

Artikel Histori : Submitted : 28 Juli 2024, Revised : 31 October 2024, Accepted : 17 November 2024, Online : 30 November 2024

 <https://doi.org/10.33096/jcpe.v9i2.986>

ABSTRAK: Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) merupakan produk limbah dari pabrik kelapa sawit, limbah tersebut dihasilkan dalam jumlah besar, namun sebagian besar pabrik kelapa sawit belum memanfaatkan produk limbah ini secara memadai. Terdapat beberapa kandungan dari TKKS yaitu selulosa, hemiselulosa dan lignin yang masing-masing memiliki nilai ekonomis sehingga dapat dimanfaatkan lebih lanjut. Salah satu peluang yang signifikan bahwa selulosa dalam TKKS akan diubah menjadi glukosa atau bioetanol. Bioetanol merupakan salah satu pilihan dalam menyokong ketersediaan sumber daya energi terbarukan. Proses pembuatan bioetanol terdiri dari perlakuan awal *pretreatment*, hidrolisis, fermentasi dan pemurnian. Proses delignifikasi tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dengan menggunakan *pretreatment* fisik dan kimiawi dapat mengurai lignin dan hemiselulosa sehingga selulosa dapat dikonversi menjadi glukosa pada produksi bioethanol. Prosedur *pretreatment* dengan pelarut H₂SO₄ digunakan untuk meningkatkan kandungan selulosa. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana konsentrasi H₂SO₄ yang berbeda mempengaruhi jumlah selulosa dalam proses *pretreatment* TKKS. Studi tambahan mengenai bioetanol dapat dilakukan dengan kandungan selulosa ini. Ada komponen eksperimental dalam penelitian ini yaitu melalui pengamatan langsung dan pengujian bahan yang mengandung konsentrasi H₂SO₄ yang berbeda yaitu 3%, 5%, dan 7%, data dikumpulkan melalui percobaan laboratorium. Kadar selulosa untuk konsentrasi H₂SO₄ 0% sebesar 16,15%, H₂SO₄ 3% sebesar 30,00%, H₂SO₄ 5% sebesar 36,35%, dan H₂SO₄ 7% sebesar 41,09% menunjukkan bahwa pelarut H₂SO₄ dapat meningkatkan kadar selulosa.

Kata Kunci: Tandan Kosong Kelapa sawit (TKKS), *Pretreatment*, H₂SO₄, Selulosa, Bioetanol.

ABSTRACT: Empty Oil Palm Bunches (EOPB) are waste products from palm oil mills, the waste is produced in large quantities, but most palm oil mills have not utilized this waste product adequately. There are several contents of EOPB, namely cellulose, hemicellulose and lignin, each of which has economic value so that it can be utilized further. One significant opportunity is that cellulose in EOPB will be converted into glucose or bioethanol. Bioethanol is one of the options in supporting the availability of renewable energy resources. The bioethanol production process consists of initial *pretreatment*, hydrolysis, fermentation and purification. The delignification process of Empty Oil Palm Bunches (EOPB) using physical and chemical *pretreatment* can break down lignin and hemicellulose so that cellulose can be converted into glucose in bioethanol production. The *pretreatment* procedure with H₂SO₄ solvent is used to increase cellulose content. The purpose of this study was to determine how different concentrations of H₂SO₄ affect the amount of cellulose in the EOPB *pretreatment* process. Additional studies on bioethanol can be done with this cellulose content. There is an experimental component in this study, namely through direct observation and testing of materials containing different concentrations of H₂SO₄, namely 3%, 5%, and 7%, data were collected through laboratory experiments. The cellulose content for 0% H₂SO₄ concentration was 16.15%, 3% H₂SO₄ was 30.00%, 5% H₂SO₄ was 36.35%, and 7% H₂SO₄ was 41.09% indicating that the H₂SO₄ solvent can increase the cellulose content.

Keywords: Empty Oil Palm Bunches (EOPB), *Pretreatment*, H₂SO₄, Cellulose, Bioethanol.

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 *
melaning@atim.ac.id



1. PENDAHULUAN

Indonesia menghasilkan banyak limbah sebagai produsen palm kernel oil (PKO) dan crude palm oil (CPO) terbesar di dunia. Kulit buah, serat, abu janjang, bungkil inti sawit, dan tandan buah merupakan produk sampingan padat dari produksi minyak kelapa sawit [1] [2]. Kelapa sawit, atau *Elaeis guineensis* Jacq, ditanam di Indonesia dan Malaysia meskipun berasal dari Afrika [3]. Kelapa sawit menghasilkan 40% minyak nabati dunia untuk memasak, perawatan tubuh, pakan ternak, dan bahan bakar [4]. Pabrik-pabrik kelapa sawit di Indonesia memiliki tandan kosong yang berlimpah. “Mayoritas kota dan pabrik kelapa sawit memanfaatkan tandan kosong dari pohon kelapa sawit. Meskipun sudah ada larangan, sebagian besar pabrik kelapa sawit di Indonesia masih menggunakan insinerator untuk membakar tandan kosong kelapa sawit”. Tandan kosong kelapa sawit juga dapat dijadikan kompos atau dibuang ke tempat pembuangan akhir (TPA) [5].

Etanol yang diproduksi dari biomassa yang mengandung selulosa sebagai komponen utamanya dikenal sebagai bioetanol. Salah satu pilihan untuk mempromosikan ketersediaan sumber energi terbarukan adalah bioetanol. Perlakuan awal, hidrolisis, fermentasi, dan pemurnian adalah langkah-langkah dalam pembuatan bioetanol. [6][7]. Perlakuan awal berupa proses delignifikasi tandan kosong kelapa sawit bertujuan untuk mengurangi kadar lignin dalam bahan berlignoselulosa dengan penggunaan larutan asam atau basa [8] [9] [10].

Bisnis kelapa sawit menghasilkan tandan buah kelapa sawit lignoselulosa yang belum dipanen. Perkebunan kelapa sawit hanya memanfaatkan tandan kosong sebagai kompos, pengeras jalan, dan bahan bakar boiler. Tandan kosong kelapa sawit dapat digunakan untuk membuat bioetanol karena mengandung 45,95% selulosa [11]. Fotosintesis menghasilkan selulosa, hemiselulosa, dan lignin, tiga komponen utama biomassa tanaman [12]. Secara khusus, sebagai limbah dari industri kehutanan, perkebunan, dan pertanian, sumber biomassa lignoselulosa melimpah, menjadikannya sumber daya yang prospektif untuk proses konversi yang dapat menghasilkan energi biologis, kimiawi, dan fisika [13]. *Pretreatment* adalah langkah pertama dalam menggunakan biomassa lignoselulosa; tujuannya adalah untuk memisahkan selulosa dari matriks polimer lignoselulosa untuk mempercepat proses penguraian dan meningkatkan akses ke polimer [14].

Selulosa, hemiselulosa, dan lignin merupakan bahan utama dalam tandan kosong kelapa sawit [15]. Tandan kosong kelapa sawit dapat digunakan untuk membuat bioetanol, glukosa, atau bahan baku kimia. Selulosa yang ditemukan dalam ikatan lignoselulosa dapat digunakan dalam proses pembuatan bioetanol, tetapi pertama-tama lignin dalam lignoselulosa perlu dipecah [16]. *Pretreatment* adalah tahapan dalam proses pembuatan bioetanol dari bahan lignoselulosa yang bertujuan untuk meningkatkan porositas bahan, menurunkan kristalinitas selulosa, dan menghilangkan kandungan lignin (delignifikasi) [17]. Diperkirakan bahwa perlakuan awal akan menghasilkan peningkatan kandungan selulosa dan degradasi lignin, yang memungkinkan selulosa yang telah diolah sebelumnya mengalami hidrolisis.

Tandan buah kelapa sawit yang tidak terpakai adalah sejenis sampah lignoselulosa. Perkebunan kelapa sawit selama ini hanya memanfaatkan tandan kosong untuk bahan bakar boiler, kompos, dan pengaspalan jalan. Salah satu potensi penggunaan TKKS adalah sebagai komponen dalam pembuatan bioetanol, karena konsentrasi selulosanya yang tinggi. Tujuan utama dari *pretreatment* kimiawi adalah untuk menurunkan derajat polimerisasi dan kristalinitas selulosa, serta menghilangkan lignin dan/atau hemiselulosa untuk meningkatkan biodegradasi selulosa. Untuk menghasilkan produk kertas berkualitas tinggi, teknologi ini juga dikembangkan di industri kertas untuk mendelignifikasi bahan selulosa [3]. Dalam Penelitian ini, larutan yang digunakan untuk proses *pretreatment* adalah H₂SO₄. H₂SO₄ memiliki keunggulan, antara lain tidak memerlukan konsentrasi tinggi dan mampu melarutkan lignin lebih baik dibandingkan asam lemah [4] [18].

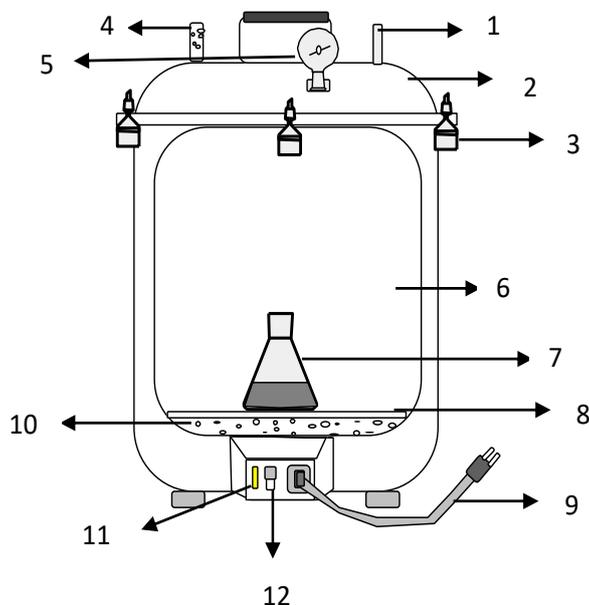
Berdasarkan Latar Belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi Konsentrasi H₂SO₄ terhadap kandungan selulosa dalam proses *Pretreatment* tandan kosong kelapa sawit (TKKS).

2. METODE PENELITIAN

2.1 Bahan dan Alat

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah aluminium foil, kertas lakmus, air suling, kertas saring, tandan kosong kelapa sawit (TKKS), dan H₂SO₄ (Merck, 98%).

Peralatan gelas, timbangan analitik, oven, tanur, pisau, blender, penangas air tipe Lab Tech, cawan porselen, gegep besi, kain kasa asbes, dan autoklaf merupakan beberapa instrumen yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 1. Rangkaian Alat Autoclave.

Keterangan : 1. Sensor temperature 2. Tutup Autoclave, 3. Katup pengaman, 4. Katup pengeluaran uap, 5. Ampere meter, 6. Panci Autoclave, 7. Sampel, 8. Saringan/rak autoclave, 9. Kabel Listrik, 10. Batas Air dan terdapat lempeng sumber panas, 11. Lampu indicator, 12. Tombol on/off

2.2 Prosedur Kerja

Dalam rangka mengumpulkan data primer untuk penelitian ini, pengujian langsung terhadap objek yang diteliti dilakukan di laboratorium. Penelitian ini mempelajari bagaimana perubahan konsentrasi H₂SO₄ sebesar 3%, 5%, dan 7% mempengaruhi kadar selulosa dan lignin pada perlakuan awal Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). Penelitian ini melibatkan langkah-langkah berikut:

2.2.1 Persiapan TKKS

Langkah pertama dari percobaan ini adalah mengumpulkan bahan-bahan yang diperlukan. Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) adalah bahan mentah yang telah dibersihkan dan dipotong kecil-kecil. Keesokan harinya, bahan baku tersebut dijemur di bawah sinar matahari. Sampel dikeringkan, dihaluskan, dan disaring dengan saringan 60 mesh untuk mencapai konsistensi yang diinginkan..

2.2.2 Proses Pre-treatment TKKS

Erlenmeyer diisi dengan 30 g sampel TKKS yang telah diayak. Erlenmeyer tersebut kemudian ditambah dengan 3% H₂SO₄. Erlenmeyer yang berisi sampel kemudian dimasukkan ke dalam autoklaf selama 60 menit pada suhu 121°C setelah ditutup dengan aluminium foil. Setelah perlakuan awal, produk didinginkan dan disaring. Residu dibersihkan dengan Aquadest hingga pH mencapai 7, atau netral. Pada suhu 105°C, residu yang telah bersih dikeringkan dengan oven selama empat jam. Dengan menggunakan larutan 5% dan 7% H₂SO₄, proses ini diulangi..

2.2.3 Analisa Lignoselulosa [10]

Sampel *pretreatment* (dengan konsentrasi yang bervariasi) ditimbang hingga satu gram (**berat a**) dan ditambahkan 150 mL Aquadest. Langkah selanjutnya adalah melakukan teknik refluks selama 1 jam pada suhu 100°C dengan menggunakan penangas air. Hasil refluks disaring menggunakan kertas saring. Residu kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama satu jam dan ditimbang (**berat b**). Residu direfluks dalam penangas air pada suhu 100°C selama satu jam setelah ditambahkan 150 mL H₂SO₄ 1 N. Sisa bahan kemudian disaring dan dicuci hingga pH-nya 7. Setelah itu, residu dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama satu jam lalu ditimbang kembali (**berat c**). Residu yang telah dikeringkan dicampur dengan 10 ml H₂SO₄ 72% dan didiamkan pada suhu kamar selama 4 jam. Campuran direfluks dalam penangas air pada suhu 100°C selama satu jam setelah 150 ml H₂SO₄ 0,5 M ditambahkan. Setelah disaring, residu dinetralkan dengan *Aquadest*. Residu dikeringkan kembali selama satu jam dalam oven pada suhu 105°C sebelum ditimbang (**berat d**). Langkah terakhir, residu dikeringkan dalam tanur pada suhu 575°C sampai konstan (**berat e**). Analisis gugus fungsi dengan alat spektroskopi *Fourier Transform Infrared* (FTIR).

2.3 Analisis Data

Kandungan lignoselulosa ditentukan dalam penelitian ini dengan menggunakan teknik analisis data Kanani, dkk. (2019). Rumus berikut digunakan untuk menghitung kandungan lignoselulosa:

2.3.1 Perhitungan Kadar Hemiselulosa

$$\text{Kadar Hemiselulosa (\%)} : \frac{(b-c)}{a} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan :

a : Berat kering sampel sebelum di refluks (gram)

b : Berat kering sampel residu refluks dengan Aquadest (gram)

c : Berat kering sampel residu setelah di refluks dengan 0,5 M H₂SO₄ (gram)

2.3.2 Perhitungan Kadar Selulosa

$$\text{Kadar Selulosa (\%)} : \frac{(c-d)}{a} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan :

a : Berat kering sampel sebelum di refluks (gram)

c : Berat kering sampel residu setelah di refluks dengan 0,5 M H₂SO₄ (gram)

d : Berat kering sampel residu setelah di perlakukan dengan 72% H₂SO₄ dan kemudian ditambahkan menjadi 1 N H₂SO₄ (gram)

2.3.3 Perhitungan Kadar Lignin

$$\text{Kadar Lignin (\%)} : \frac{(d-e)}{a} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan :

a : Berat kering sampel sebelum di refluks (gram)

d : Berat kering sampel residu setelah di perlakukan dengan 72% H₂SO₄ dan kemudian ditambahkan menjadi 1 N H₂SO₄ (gram)

e : Berat kering sampel residu yang telah diabukan

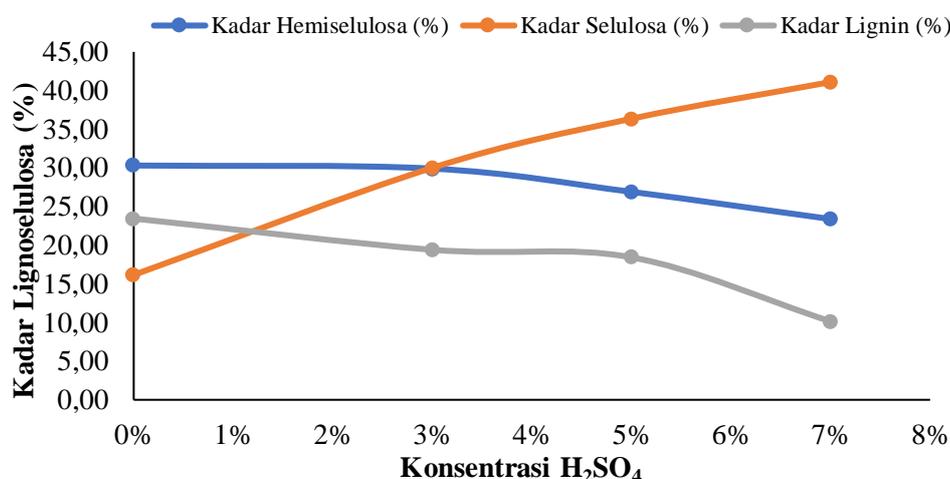
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data *pretreatment* tandan kosong kelapa sawit, juga dikenal sebagai TKKS, diperoleh dari hasil penelitian. Metode gravimetri digunakan untuk menganalisis bahan baku dan memastikan kadar selulosa, lignin, dan hemiselulosa di dalam tandan kosong kelapa sawit. Tabel 1 berikut ini menampilkan hasil analisis:

Tabel 1. Komposisi Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)

Konsentrasi H ₂ SO ₄	Suhu (°C)	Tekanan (bar)	Kadar Hemiselulosa (%)	Kadar Selulosa (%)	Kadar lignin (%)
0%			30,30	16,15	23,44
3%	121	1	29,90	30,00	19,40
5%			26,89	36,35	18,42
7%			23,38	41,09	10,14

Konsentrasi H₂SO₄ divariasikan secara kimiawi dengan menggunakan tandan kosong kelapa sawit, dan perlakuan awal secara fisik dilakukan dengan menggunakan *autoklaf*. Gambar 2 menampilkan data kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin.

Gambar 2. Grafik Pengaruh Konsentrasi H₂SO₄ terhadap Kadar lignoselulosa

Gambar 2 mengilustrasikan bahwa jumlah lignin menurun seiring dengan meningkatnya konsentrasi H₂SO₄. Karena belum terjadi pemecahan lignin, sampel tandan kosong kelapa sawit yang belum melalui prosedur *pretreatment* memiliki konsentrasi lignin terbesar (23,42%). Setelah melalui prosedur *pretreatment*, konsentrasi 7% memiliki kadar lignin terendah, dengan kandungan lignin sebesar 10,14%. Hal ini dikarenakan biomassa mendapatkan kekuatan dari lignin, yang mungkin saja ikatan kimianya terputus oleh perlakuan awal dengan H₂SO₄. Zat kompleks yang disebut lignin berfungsi sebagai penghalang untuk melindungi selulosa dan hemiselulosa, tetapi juga secara signifikan menghalangi kemampuannya untuk terurai [19]. Proses *pretreatment* dilakukan untuk mengurai lignin sehingga lignoselulosa akan mudah dihidrolisis karena lignin sangat kuat melindungi selulosa [20]. Alasan penurunan konsentrasi lignin ketika asam kuat digunakan adalah karena asam kuat lebih reaktif daripada asam lemah dalam hal memecah dan melarutkan lapisan lignin [21]. Selain itu, semakin banyak molekul yang mampu mendegradasi struktur lignin, maka semakin besar konsentrasi larutan. Selain menaikkan suhu, penambahan tekanan memungkinkan penguraian lignin terjadi secara lebih signifikan. Hal ini dikarenakan asam, yang diwakili oleh H₂SO₄, mempermudah pemutusan ikatan lignin. Lebih banyak selulosa yang dapat bereaksi selama proses hidrolisis ketika terjadi penurunan lignin yang lebih besar [19].

Hal ini terlihat dari kandungan selulosa yang meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi H₂SO₄. Sampel tandan kosong kelapa sawit tanpa perlakuan awal memiliki persentase selulosa paling rendah (16,15%). Sementara itu, sampel tandan kosong kelapa sawit yang mengalami *pretreatment* memiliki kandungan selulosa terbesar (41,09%) pada konsentrasi 7%. Karena lignin dipecah selama prosedur

pretreatment, maka terjadi peningkatan kandungan selulosa pada biomassa sebagai akibat dari penurunan kandungan lignin [22]. Lignin dapat diuraikan oleh larutan H_2SO_4 , yang menyebabkan lignin larut dalam larutan ketika dipanaskan dan meningkatkan konsentrasi selulosa. Selain menaikkan suhu, penambahan tekanan juga meningkatkan jumlah selulosa dalam biomassa. Jika proporsi selulosa meningkat, *pretreatment* dianggap efektif [23].

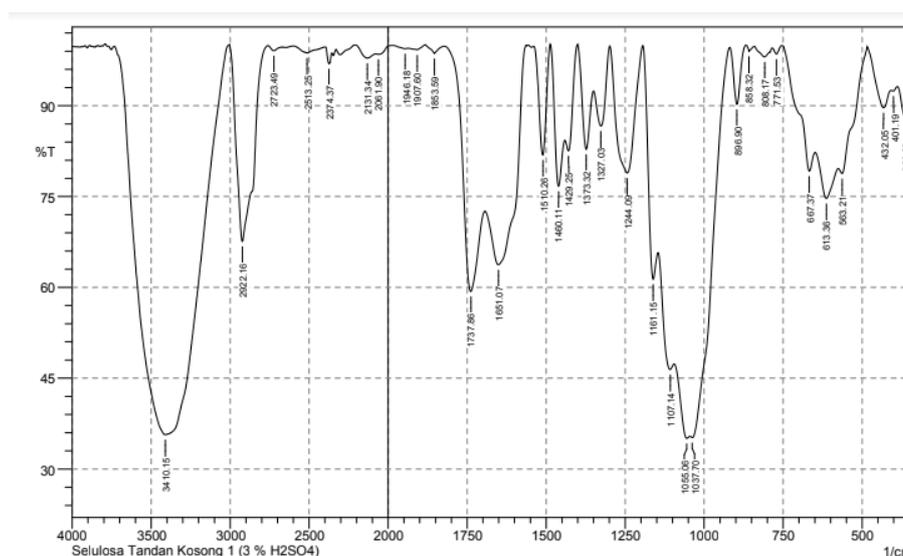
Ditemukan bahwa jumlah hemiselulosa yang dihasilkan menurun dengan meningkatnya konsentrasi H_2SO_4 . Sampel tandan kosong kelapa sawit tanpa perlakuan awal memiliki konsentrasi hemiselulosa tertinggi, yaitu 30,3%. Hemiselulosa ditemukan sebanyak 23,38% pada sampel tandan kosong kelapa sawit yang diberi perlakuan awal 7%. Karena pelunakan lignin, larutan tersebut dapat melepaskan dan mengurangi sebagian hemiselulosa yang terikat. Perlakuan awal memecah lignin dan hemiselulosa, seperti yang ditunjukkan oleh kandungan yang lebih rendah. Hal ini karena hemiselulosa, molekul karbohidrat dalam bahan lignoselulosa, lebih sedikit terpolimerisasi daripada selulosa. Oleh karena itu, hemiselulosa lebih rentan terhadap suhu tinggi, tekanan, dan asam daripada selulosa.

Gambar 2 mengilustrasikan bagaimana, setelah prosedur *pretreatment*, konsentrasi selulosa meningkat dan konsentrasi lignin serta hemiselulosa menurun. Prosedur *pretreatment* yang memecah lignin dan hemiselulosa adalah penyebabnya. Proses *pretreatment* dipengaruhi oleh penggunaan tekanan, jika tekanan dikurangi, waktu yang dibutuhkan lebih sedikit. Suhu juga berdampak pada *pretreatment*. Ini mengindikasikan bahwa suhu $121^\circ C$ lebih baik untuk *pretreatment* karena suhu tinggi memecah selulosa, sedangkan suhu rendah membuat lignin lebih sulit didelignifikasi, menutupi selulosa dan mengurangi jumlahnya [24].

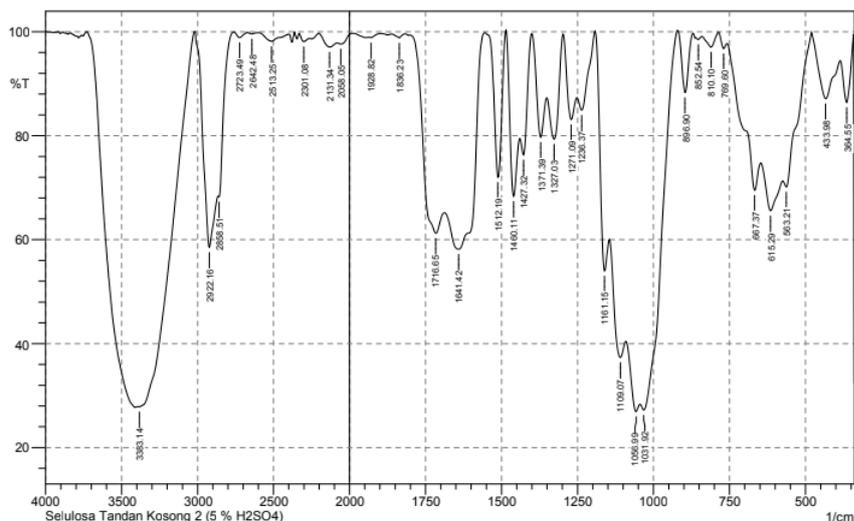
Gambar 3, 4, dan 5 (yang menampilkan grafik spektrum untuk setiap konsentrasi H_2SO_4) dan Tabel 2 menyajikan temuan-temuan dari alat spektroskopi FTIR terhadap gugus fungsi selulosa.

Tabel 2. Bilangan gelombang dan gugus fungsi selulosa hasil *pretreatment*.

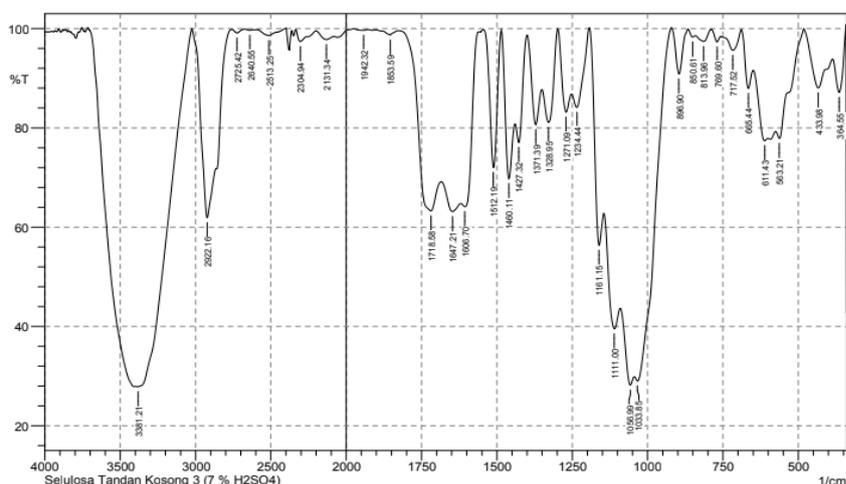
Bilangan Gelombang (cm^{-1})			Gugus Fungsi
H_2SO_4 3 %	H_2SO_4 5 %	H_2SO_4 7 %	
3410	3383	3381	O-H
2922	2922	2922	C-H
1737	1716	1718	C=O
1161	1161	1161	C-O-C
1037-1055	1031-1056	1033-1056	C-O
896	896	896	C-H



Gambar 3. Spektrum FTIR dengan konsentrasi H_2SO_4 3%



Gambar 4. Spektrum FTIR dengan konsentrasi H_2SO_4 5%



Gambar 5. Spektrum FTIR dengan konsentrasi H_2SO_4 7%

Gambar 3,4, dan 5 menunjukkan spektrum FTIR dengan variasi konsentrasi H_2SO_4 3%, 5%, dan 7% yang digunakan pada proses *pretreatment* tanda kosong kelapa sawit. Adanya vibrasi peregangan ikatan O-H dari alkohol dalam molekul selulosa ditunjukkan oleh pita lebar pada spektrum FTIR selulosa, yang membentang pada daerah serapan 3381 cm^{-1} hingga 3410 cm^{-1} . Vibrasi peregangan ikatan C-H rantai alkana pada daerah serapan 2922 cm^{-1} berada di urutan berikutnya. Selanjutnya, puncak vibrasi terdeteksi pada zona serapan yang membentang dari 1718 cm^{-1} hingga 1737 cm^{-1} , yang menunjukkan adanya vibrasi peregangan karbonil C=O yang berasal dari gugus ester. Vibrasi ini diperkuat lebih lanjut pada daerah serapan 1033 cm^{-1} hingga 1056 cm^{-1} oleh vibrasi regangan C-O pada selulosa atau cincin ester. Gugus eter pada ikatan gliksidik dan cincin piranosa selulosa diregangkan C-O-C, seperti yang terlihat pada puncak serapan pada 1161 cm^{-1} . Di sisi lain, vibrasi serapan ikatan C-H selulosa terletak pada daerah serapan 896 cm^{-1} [25]. Perkembangan puncak serapan untuk gugus C=O dan C-O, yang merupakan indikasi ester, pada hasil analisis menunjukkan bahwa senyawa selulosa telah terbentuk.

4. KESIMPULAN

Proses delignifikasi tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dengan menggunakan *pretreatment* fisik dan kimiawi dapat mengurai lignin dan hemiselulosa sehingga selulosa dapat dikonversi menjadi glukosa pada

produksi bioetanol. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi lignin adalah 23,42% tanpa adanya perlakuan awal dan setelah prosedur *pretreatment*, kandungan lignin turun menjadi 10,14%, kadar hemiselulosa menurun dari 30,30% menjadi 23,38%, sementara kandungan selulosa naik dari 16,15% menjadi 40,09% dengan menggunakan H₂SO₄ konsentrasi 7%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kepala Laboratorium Organik Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin; Jurusan Teknik Kimia Mineral, Politeknik ATI Makassar dan semua pihak yang telah membantu dalam penelitian ini diucapkan terima kasih.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Chairani Ritonga, S. Agustina Eka Putri, E. Setiawan, A. Desta Pramaysella, C. Kalo Bello Puyanggana, and P. Korespondensi, “Efektivitas Ekstraksi Selulosa Tandan Kosong Kelapa Sawit sebagai Absorben Menggunakan Metode Delignifikasi dan Bleaching,” *Jurnal Teknologi Pertanian*, vol. 24, no. 3, pp. 149–156, 2023.
- [2] T. Yuni Hendrawati *et al.*, “Sintesis dan Karakterisasi Nanoselulosa Serbuk dari Tandan Kosong Kelapa Sawit menggunakan Ultrasonifikasi,” *Jurnal Teknologi*, vol. 15, no. 1, pp. 159–166, 2023, doi: 10.24853/jurtek.15.1.159-166.
- [3] N. Mawarda Rilek, N. Hidayat, and Y. Sugiarto, “Hidrolisis Lignoselulosa Hasil Pretreatment Pelepah Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq) menggunakan H₂SO₄ pada Produksi Bioetanol,” *Industria: Jurnal Teknologi dan Manajemen Agroindustri*, vol. 6, no. 2, pp. 76–82, Jul. 2017, doi: 10.21776/ub.industria.2017.006.02.3.
- [4] E. Meijaard *et al.*, “The environmental impacts of palm oil in context,” Dec. 01, 2020, *Nature Research*. doi: 10.1038/s41477-020-00813-w.
- [5] F. Khairunnisa, “Sintesis Dan Karakterisasi Hidrogel Berbasis Lignin Hasil Isolasi Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit (Tkks),” 2022.
- [6] Faturochman, G. Supriyanto, and H. Oktavianty, “Karakterisasi Bioetanol dari Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit,” *BIOFOODTECH: Journal of Bioenergy and Food Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 1–8, Jul. 2024, doi: 10.55180/biofoodtech.v3i1.1087.
- [7] R. Yuniarti, A. W. Satria, W. Wiandini, N. Zaezarini, F. Achmad, and F. Yusupandi, “Pengaruh Perlakuan Awal terhadap Karakteristik Bioetanol dari Limbah Kulit Singkong Karet (*Manihot glaziovii*),” *Jurnal Teknik Kimia USU*, vol. 13, no. 1, pp. 1–8, Mar. 2024, doi: 10.32734/jtk.v13i1.13174.
- [8] 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*, vol. 12, no. 1, pp. 51–58, Mar. 2024, doi: 10.25181/jaip.v12i1.2729.
- [9] D. M. Ihsan, “Optimasi Delignifikasi Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Batch Lab-Scale Dan Ekstruksi Pada Reaktor Kontinu Untuk Produksi Bioetanol,” Jakarta, 2022.
- [10] C. Sindhuwati *et al.*, “Review: Potensi Tandan Kosong Kelapa Sawit sebagai Bahan Baku Pembuatan Bioetanol dengan Metode Fed Batch pada Proses Hidrolisis,” *Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan*, vol. 5, no. 2, pp. 128–144, Oct. 2021, doi: 10.33795/jtkl.v5i2.224.
- [11] Sirajuddin and A. C., “Bidang: Teknik Kimia dan Analisis Kimia Mineral Topik: Rekayasa dan Perancangan Proses Teknik Kimia. Pengaruh Waktu Aktivasi Kimia terhadap Karakteristik Karbon Aktif dari Tandan Kosong Kelapa Sawit (*Elaeis Guineensis*),” in *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri X*, 2023, pp. 195–198.

- [12] L. H. Suryaningrum and R. Samsudin, "Potensi Enzim Selulase dalam Mendegradasi Material Lignoselulosa sebagai Bahan Pakan Ikan," in *Prosiding Seminar Nasional Hasil Riset Pengolahan Produk dan Bioteknologi Kelautan dan Perikanan*, Oct. 2019, pp. 71–75. doi: 10.31227/osf.io/xc9zr.
- [13] B. Y. E. Saputra, M. F. Fahmi, and T. Widjaja, "Fraksinasi Lignoselulosa dari TKKS dengan Metode Steam Explosion Pretreatment Disertai Penambahan Asam Formiat," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 11, no. 2, pp. F67–F72, 2022.
- [14] H. A. Darojati, "Prospek Pengembangan Teknologi Radiasi Sebagai Perlakuan Pendahuluan Biomassa Lignoselulosa," *Jurnal Forum Nuklir (JFN)*, vol. 11, no. 2, pp. 72–80, 2017.
- [15] A. Pramana, M. N. Cahyanto, H. Adhianata, and Y. Zalfiatri, "Karakteristik Fisik Lignin pada Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit PT. Tunggal Perkasa Plantations Provinsi Riau Menggunakan Metode Organosolv," *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, vol. 2, no. 1, pp. 43–49, Apr. 2020, doi: 10.35970/jppl.v2i1.153.
- [16] M. Octaviana, "Optimasi Preparasi Mikrokristalin Selulosa dari Sekam Padi menggunakan H₂O₂ dan NaOCl untuk Sintesis CMC (Carboxymethyl Cellulose)," Semarang, 2017.
- [17] K. MTAP, E. Mardawati, and T. Setiadi, "Production of Xylitol from Oil Palm Empty Fruits Bunch: A Case Study on Bio refinery Concept," *Mod Appl Sci*, vol. 9, no. 7, pp. 206–213, Jul. 2015, doi: 10.5539/mas.v9n7p206.
- [18] A. L. S. Simanjuntak, I. U. P. Rangkuti, and M. H. Ginting, "Potensi Limbah Padat Kelapa Sawit: Pelepah Kelapa Sawit dan Tandan Kosong Kelapa Sawit sebagai Bahan Baku Bioetanol," *Jurnal Teknik Pengolahan Hasil Perkebunan Kelapa Sawit dan Karet*, vol. 3, no. 2, pp. 2656–4831, 2021.
- [19] W. R. Hartari, F. Delvitasari, M. Maryanti, B. Undadraja, F. Hasbullah, and G. A. Deksono, "Pengujian Lignoselulosa Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Waktu Delignifikasi H₂SO₄ Menggunakan Uap Bertekanan," *Jurnal Agro Industri Perkebunan*, vol. 11, no. 3, pp. 151–158, Nov. 2023, doi: 10.25181/jaip.v11i3.3007.
- [20] P. R. Sari, "Optimasi Proses Delignifikasi Tandan Kosong Kelapa Sawit menggunakan Ozon pada Produksi Bioetanol," 2019.
- [21] A. M. Jannah and T. Aziz, "Pemanfaatan Sabut Kelapa menjadi Bioetanol dengan Proses Delignifikasi Acid-Pretreatment," *Jurnal Teknik Kimia*, vol. 23, no. 4, pp. 245–251, 2017.
- [22] G. A. Pasaribu, "Proses Delignifikasi Serbuk Pelepah Kelapa Sawit (*Elaeis Guineensis*) menggunakan NaOH dengan Berbagai Konsentrasi," Medan, 2018.
- [23] H. Khairiah and M. Ridwan, "Pengembangan Proses Pembuatan Bioetanol Generasi Ii dari Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit," *Jurnal Pangan dan Agroindustri*, vol. 9, no. 4, pp. 233–240, 2021.
- [24] F. Junianti, "Produksi Bioetanol Dari Ampas Kelapa Melalui Pretreatment Autoclave," in *e-Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri VIII*, 2021, pp. 415–419.
- [25] 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(2), no. 2, pp. F413–F416, 2017.