



## Pengaruh Suhu Pada Proses Sintesis Etanol dan Furfural Dari Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Menggunakan *Deep Eutectic Solvents* (DES)

Marcela Shakila\*<sup>1</sup>, Chintya Septa Hasannah<sup>2</sup>, Alfietta Rohmaful Aeni<sup>3</sup>, Muryanto<sup>4</sup>

<sup>\*1,2,3,4</sup> Program Studi Teknik Kimia, Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang, Indonesia

\*Email Penulis Korespondensi: [2010631230012@student.unsika.ac.id](mailto:2010631230012@student.unsika.ac.id)

### Abstrak

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) adalah limbah dengan kandungan lignoselulosa yang tinggi, hal tersebut menghambat kemampuannya untuk diproduksi menjadi bioetanol. Penelitian ini bertujuan untuk menurunkan kandungan lignin pada TKKS melalui proses pretreatment menggunakan Deep Eutectic Solvent (DES). DES disintesis dari campuran Kolin Klorida, Asam Oksalat, dan Etilen Glikol (CH:OA:EG) sebagai donor dan akseptor ikatan hidrogen. Pretreatment dilakukan selama 180 menit dengan variasi suhu 80, 100, 120, dan 140°C. Analisis lignin menggunakan metode National Renewable Energy Laboratory (NREL), furfural ditentukan dengan spektrofotometri UV-Vis, sedangkan bioetanol menggunakan HPLC. Hasil menunjukkan bahwa kondisi optimum dicapai pada suhu 140°C dengan kandungan lignin tersisa 17,79%, glukosa 3,05%, bioetanol 21.896 ppm (2,19%), dan furfural 0,34%. Penurunan lignin ini menunjukkan efektivitas DES dalam memecah struktur lignoselulosa TKKS sehingga meningkatkan ketersediaan gula sederhana untuk produksi bioetanol. Dengan demikian, metode ini berpotensi mendukung pemanfaatan limbah perkebunan sawit menjadi produk bernilai tambah sekaligus mendukung pengembangan energi terbarukan.

**Kata kunci**—TKKS, Bioetanol, Furfural, DES, Pretreatment.

### Abstract

Empty Fruit Bunches (EFB) of oil palm are waste materials with a high lignocellulosic content, which limits their potential for bioethanol production. This study aims to reduce the lignin content in EFB through a pretreatment process using Deep Eutectic Solvent (DES). The DES was synthesized from a mixture of Choline Chloride, Oxalic Acid, and Ethylene Glycol (CH:OA:EG) as hydrogen bond donor and acceptor components. Pretreatment was carried out for 180 minutes at varying temperatures of 80, 100, 120, and 140°C. Lignin content was analyzed using the National Renewable Energy Laboratory (NREL) method, furfural was determined by UV-Vis spectrophotometry, and bioethanol was quantified using HPLC. The results showed that the optimum condition was achieved at 140°C, with remaining lignin content of 17.79%, glucose concentration of 3.05%, bioethanol yield of 21,896 ppm (2.19%), and furfural concentration of 0.34%. The reduction in lignin indicates the effectiveness of DES in breaking down the

*lignocellulosic structure of EFB, thereby enhancing the availability of simple sugars for bioethanol production. Therefore, this method has the potential to support the utilization of oil palm plantation waste into value-added products while promoting the development of renewable energy.*

**Keywords**— TKKS, Bioethanol, Furfural, DES, Pretreatment.

## 1. PENDAHULUAN

Kelapa sawit merupakan komoditas perkebunan terbesar di Indonesia dengan total luas lahan mencapai 16,83 juta hektar. Pada November 2024, total produksi *crude palm oil* (CPO) tercatat sebesar 4,5 juta ton, sedangkan produksi *palm kernel oil* (PKO) mencapai 4 juta ton per tahun [1]. Produksi tersebut diperkirakan terus meningkat selama satu dekade ke depan dengan rata-rata pertumbuhan sekitar 8% per tahun [1]. Namun, industri kelapa sawit di Indonesia juga menghasilkan limbah dalam jumlah besar, sehingga sering dianggap kurang ramah lingkungan. Salah satu limbah utama, yaitu tandan kosong sawit, tercatat mencapai sekitar 31 juta ton pada tahun 2015 dan diproyeksikan meningkat hingga 54 juta ton pada tahun 2030 [2].

Peningkatan produksi minyak kelapa sawit setiap tahunnya turut menyebabkan bertambahnya jumlah limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang dihasilkan. Salah satu bentuk pemanfaatan limbah kelapa sawit yang telah dikomersialisasi adalah *palm kernel cake* (PKC), dengan volume produksi mencapai 8,34 juta ton pada tahun 2014 dan dimanfaatkan sebagai pakan ternak [3].

Pengembangan produksi etanol dari limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dilakukan sebagai upaya pemanfaatan limbah sekaligus solusi terhadap menurunnya cadangan minyak bumi di Indonesia selama satu dekade terakhir. Tercatat, cadangan minyak bumi Indonesia yang pada tahun 2008 sebesar 8,21 miliar barel mengalami penurunan menjadi 7,50 miliar barel pada tahun 2018. Untuk mengatasi kondisi tersebut, produksi etanol diperlukan sebagai sumber energi alternatif. Etanol dianggap sebagai salah satu solusi dalam mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil melalui program diversifikasi energi. Diversifikasi ini dilakukan dengan mengembangkan sumber energi baru yang memiliki ketersediaan bahan baku lebih terjamin, yakni sumber daya yang dapat diperbarui (*renewable*) dan berkelanjutan (*sustainable*). Salah satu biomassa yang berpotensi digunakan sebagai bahan baku etanol adalah limbah *lignoselulosa* seperti tandan kosong kelapa sawit (TKKS), yang ketersediaannya melimpah dan berbiaya rendah [4]. Biomassa *lignoselulosa* sendiri merupakan sumber energi terbarukan yang sangat melimpah dan memiliki potensi besar sebagai sumber daya hayati, yang dapat dikonversi menjadi berbagai produk bernilai tambah seperti bahan kimia dan energi. Struktur *biomassa lignoselulosa* tersusun secara kompleks dari tiga komponen utama, yaitu *selulosa*, *hemiselulosa*, dan *lignin* [5].

Kandungan *lignoselulosa* pada tandan kosong kelapa sawit (TKKS) memiliki potensi lain yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam produksi energi dan bahan kimia dasar. Komponen ini berpeluang untuk diolah menjadi *platform chemicals* seperti furfural, yang memiliki peranan penting di berbagai sektor industri serta nilai ekonomi yang tinggi. Furfural banyak digunakan dalam industri farmasi, pertanian, polimer, resin, dan sektor lainnya. Saat ini, kebutuhan furfural di Indonesia masih bergantung pada impor, padahal negara ini memiliki sumber biomassa yang melimpah. Dengan pengolahan yang optimal, Indonesia sebenarnya berpotensi untuk memproduksi *platform chemicals* seperti furfural secara mandiri [6].

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) memiliki kandungan *lignoselulosa* yang tinggi, sehingga sulit terdegradasi oleh mikroorganisme maupun enzim akibat adanya matriks kompleks antara selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Proses perlakuan awal (*pretreatment*) diperlukan untuk mengatasi hambatan tersebut dan menjadi tahap penting dalam biokonversi TKKS menjadi gula yang dapat difermentasi [5]. Tahapan ini berfungsi mengubah struktur *biomassa* dengan menghilangkan sebagian *lignin*, sehingga fraksi selulosa dalam biomassa lebih mudah terekspos [4]. Berbagai metode *pretreatment* telah dikembangkan, salah satunya menggunakan larutan

alkali seperti *natrium hidroksida* (NaOH). Penelitian oleh [4] melaporkan bahwa *pretreatment* TKKS dengan variasi konsentrasi NaOH efektif dalam memecah struktur *lignoselulosa*.

Proses perlakuan awal dengan menggunakan NaOH memiliki kesamaan dengan proses *kraft* yang diterapkan dalam industri pembuatan kertas. Walaupun perlakuan kimia menggunakan NaOH umumnya dilakukan pada suhu rendah, metode ini tetap memiliki kekurangan, yaitu menghasilkan produk samping yang kurang ramah lingkungan karena penggunaan bahan kimia pada *biomassa lignoselulosa*. Kondisi ini menimbulkan kekhawatiran terkait aspek keselamatan dan kesehatan. Oleh karena itu, berbagai penelitian kini difokuskan pada pengembangan pelarut alternatif yang lebih ramah lingkungan [6].

*Deep Eutectic Solvent (DES)* dapat dimanfaatkan sebagai larutan kimia untuk proses perlakuan awal karena memiliki berbagai keunggulan, antara lain biaya yang lebih rendah, proses sintesis yang mudah, sifat terbarukan, dapat didaur ulang, memiliki kemurnian tinggi, toksisitas rendah, tidak mudah terbakar, serta bersifat mudah terurai secara hayati [4]. DES merupakan jenis pelarut yang tersusun atas komponen *hydrogen bond acceptor (HBA)* dan *hydrogen bond donor (HBD)*, yang berperan penting dalam proses pemecahan molekul analit target. Umumnya, HBA berupa garam amonium kuartener, sedangkan HBD dapat berupa amina, asam karboksilat, alkohol, poliol, maupun karbohidrat [5].

Perlakuan awal DES dari *Etilen Glikol-Asam Sitrat* dilakukan oleh [7] mengenai delignifikasi sekam padi menggunakan larutan *DES Etilen Glikol-Asam Sitrat* mendapatkan hasil optimal pada kondisi suhu 120°C dan lama waktu proses selama 4 jam menunjukkan hasil 57.33% lignin terdegradasi [7]. Penelitian lain terkait proses fermentasi pembentukan etanol dari sari batang *sorgum* manis dilakukan oleh [20], dinamakan penelitian ini mengoptimalkan produksi etanol dari sari batang sorgum manis (SSJ) dengan *Bakteri Saccharomyces cerevisiae* NP01 dalam labu tertutup udara 500 ml pada suhu 30°C, diperoleh hasil yield etanol dari 0,46 hingga 0,49 g/g. Pada suhu 35-37 °C, hal ini memperpanjang viabilitas sel, meningkatkan *maximization of ethanol concentration (PE)* sebesar 5-12 g/L dan %SC (*sugar consumption*) 3-8% tanpa mempengaruhi hasil etanol. Namun, pada suhu 39 °C, tidak terjadi dampak positif pada efisiensi fermentasi etanol.

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mensintesis *Deep Eutectic Solvent (DES)* dari campuran kolin klorida, asam oksalat, dan etilen glikol yang digunakan dalam proses perlakuan awal tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan variasi suhu optimum pada proses pembentukan etanol dan furfural.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1 Tempat dan waktu pelaksanaan

Penelitian dilakukan di Laboratorium Pusat Riset Kimia - Badan Riset dan Inovasi Nasional dengan waktu penelitian dimulai pada 4 September 2023 sampai dengan 28 Februari 2024.

### 2.2 Alat dan Bahan

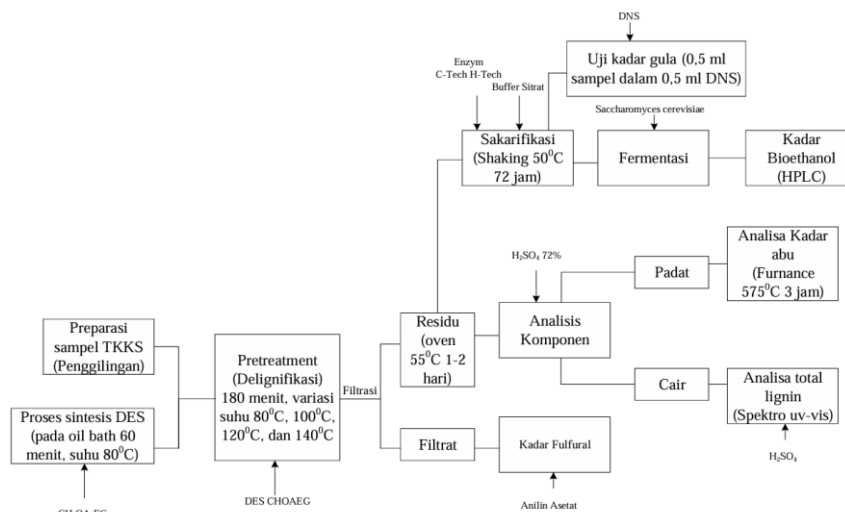
Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah, botol *Schott*, pipet volume (*Eppendroft*), pipet ukur, pipet tetes, *spatula*, *microtube*, *pipet bulb*, peralatan kaca, *shaking incubator*, pompa vakum, botol semprot, pH meter, neraca analitik (*Sartorius BS224S*), *moisture analyzer (Ohaus Mb 45)*, *vortex (Hedolph)*, *oil bath (Dasol Scientific DS-250B2)*, *waterbath, autoclaf (2321 VD)*, *tanur furnace (WiseThem)*, desikator, *centrifuge, oven, thermoreactor (WiseThem)*, *spektrofotometer UV-Vis (Optizen 2120UV)* dan HPLC (*Waters*).

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang sudah disediakan BRIN dari Perkebunan Kelapa Sawit Luwuk, Sulawesi Tengah. Bahan kimia yang digunakan yaitu asam oksalat teknis, etilen glikol teknis (*Brataco Chemika*), kolin klorida (Sigma), anilin asetat, asam asetat, asam 3,5-dinitrosalisilat, natrium hidroksida, natrium

kalsium tartrat, buffer sitrat, dan kalsium karbonat (*Merck*), asam sulfat (*Merck*), etanol (*Merck*), akuades, kertas saring whatman 90mm, kertas pH indikator universal (*Merck*), enzim C-Tech (a-selulase), enzim *H-Tech*, *agarase*, buffer sulfat, jamur *saccharomyces cerevisiae*.

### 2. 3 Prosedur Penelitian

Metode dalam penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan seperti sintesis DES, pretreatment, analisa komponen, sakarifikasi, fermentasi, dan pengecekan kadar bioetanol dan furfural. Diagram alir proses dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram Alir Proses

#### 2. 3.1 Preparasi Sampel Tandan Kosong Kelapa Sawit

Sampel TKKS dikeringkan kemudian ukurannya diperkecil menggunakan mesin penggiling hingga ukurannya 1-3 mm. Selanjutnya disebut dengan sampel TKKS sebelum perlakuan awal.

#### 2. 3.2 Preparasi Larutan Deep Eutectic Solvent (DES)

*Deep Eutectic Solvent* (DES) dibuat dengan cara mencampurkan larutan asam oksalat, *ethylene glycole* dan *chlorine chloride*, dengan rasio mol dan massa tertentu seperti pada Tabel 1.

Tabel 1 Komponen Larutan DES

Bahan	Mol	Massa
Asam Oksalat	1	90 g/mol
Chlorine Chloride	1	139,62 g/mol
Ethylene Glicol	2	124 g/mol

Seluruh bahan dimasukkan kedalam botol *shot* 500 ml, lalu dihomogenkan dengan memasukan magnetic stirer kedalam botol *shot*, lalu diletakan pada *oil bath* dengan kecepatan pengadukan sebesar 300 rpm, dan dipanaskan dalam suhu 80°C, selama 1 jam, setelah itu di diamkan pada suhu ruang.

#### 2. 3.3 Perlakuan Awal Sampel Tandan Kosong Kelapa Sawit

Sebanyak 10 gram TKKS dimasukkan ke dalam botol *shot* 500 ml yang ditambah masing-masing pelarut DES sebanyak 50 ml, perbandingan larutan dan sampel ialah 1:5. Kemudian dipanaskan pada variasi suhu 80°C, 100°C, 120°C, dan 140°C selama 180 menit. Setiap botol ditutup untuk mencegah penguapan sampel selama proses perlakuan awal. Proses dilakukan

pada *oil bath* dengan kecepatan pengadukan sebesar 300 rpm, setelah selesai sampel dinginkan hingga mencapai suhu ruang. Setelah perlakuan awal, residu TKKS dan DES dipisahkan melalui filtrasi vakum setelah itu filtrat hasil penyaringan ditaruh pada botol sampel untuk pengecekan kadar furfural sedangkan residu dinetralkan dengan dicuci menggunakan aquades hingga pH 6-7. Residu yang dihasilkan dari proses perlakuan awal selanjutnya dioven selama  $\pm 3$  hari dan di timbang sebagai hasil *recovery* biomasa untuk di analisa komponen dan sakarifikasi.

### 2. 3.4 Analisis Komponen

Analisis komponen TKKS dilakukan menggunakan metode NREL (*National Renewable Energy Laboratory*). Sebanyak 0,3 gram TKKS hasil perlakuan awal dihidrolisis dengan menambahkan 3 mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 72% ke dalam tabung reaksi. Campuran tersebut kemudian diinkubasi pada suhu 30°C selama 2 jam menggunakan *water bath*, sambil divortex setiap 10 menit hingga campuran berubah menjadi berwarna hitam. Setelah itu, isi tabung reaksi dituangkan ke dalam botol *Schott* yang telah berisi 42 mL akuades. Tabung dibilas dengan 42 mL akuades tambahan hingga total volume mencapai 87 mL dalam botol *Schott*. Selanjutnya, botol *Schott* berisi 87 mL sampel dimasukkan ke dalam autoklaf pada suhu 121°C selama 1 jam. Setelah proses autoklaf selesai, sampel didinginkan hingga suhu ruang, lalu disaring menggunakan filtrasi vakum. Endapan yang diperoleh digunakan untuk analisis kadar abu dan kadar lignin tidak larut (AIL), sedangkan filtrat digunakan untuk analisis kadar lignin terlarut (ASL).

### 2. 3.5 Sakarifikasi

Proses sakarifikasi substrat TKKS dilakukan dengan sebanyak 1,5 g TKKS hasil proses delignifikasi dimasukkan ke dalam 10 mL larutan *buffer* asam sitrat 0,05 M (pH 4,8). Kemudian, dua jenis enzim yaitu H-Tech dan C-Tech ditambahkan dengan konsentrasi masing-masing sebesar 30 FPU per gram substrat berat kering. Proses sakarifikasi dilakukan di dalam *shaking incubator* pada suhu 50°C dengan kecepatan guncangan 150 rpm selama 72 jam. Setelah proses selesai, sampel dianalisis untuk mengukur kadar glukosa, kemudian dilanjutkan dengan proses fermentasi dan pengujian kadar etanol menggunakan HPLC.

### 2. 3.6 Pengujian Kadar Gula (DNS)

Pengujian kadar gula dengan metode Dinitrosalisilat dilakukan dengan cara membuat larutan standar terlebih dahulu dengan melarutkan 0,01 gram gula standar dalam aquades yang kemudian diencerkan pada standar dari 100 ppm – 800 ppm, kemudian 0,5 sampel dan 0,5 mL DNS divortex (total 1 mL larutan dalam tabung reaksi), lalu dipanaskan 5 menit pada *hotplate* dan didinginkan pada suhu ruang, ditambahkan 1,5 mL *aquades* sebagai katalis *enzyme*, setelah itu di cek pada spektrofotometri pada panjang gelombang 540 nm, semakin pekat warna larutan maka semakin tinggi kadar glukosanya.

### 2. 3.7 Fermentasi

Fermentasi dilakukan dengan cara sampel yang telah dilakukan proses sakarifikasi sebelumnya, dimasukan kedalam botol *centrifuge* beserta penambahan media jamur *Saccharomyces cerevisiae* dengan menimbang fermipan sebanyak 0,1 gram, sampel fermentasi kemudian dimasukan kedalam *shaking incubator* dengan kecepatan guncangan 150 rpm pada suhu 50°C selama 72 jam, setelah itu sampel bisa langsung di cek kadar etanol menggunakan HPLC.

### 2. 3.8 Analisa Kadar Etanol

Sampel hasil sakarifikasi dipipet sebanyak 3 ml. Kemudian disaring dan diuji kadar etanol dengan menggunakan HPLC. Kolom yang digunakan pada proses ini yaitu *Aminex HPX 87H* column, 300 x 7,8 mm pada run time 20 menit dan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,008 N sebagai eluennya.

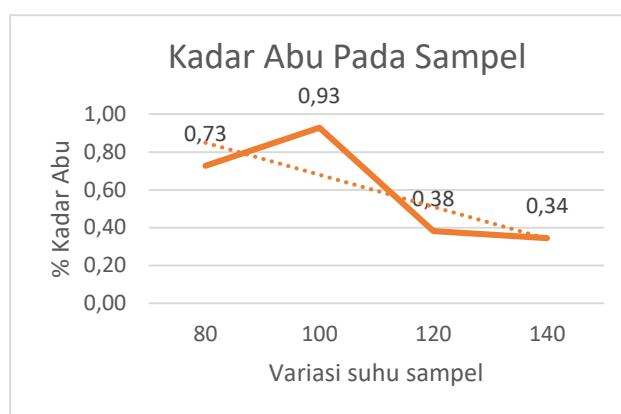
### 2. 3.9 Analisa Kadar Furfural

Filtrat sampel hasil delignifikasi dicek kadar furfuralnya dengan cara membuat larutan stock dengan cara mencampurkan 0,1 mL furfural standar dan 9,9 mL aquades, lalu larutan stock diencerkan untuk dijadikan deret standar, setelah membuat deret standar, analisis sampel dilakukan dengan mencampurkan 0,1 mL sampel dan 5 mL anlinin asetat ke dalam tabung reaksi

lalu divortex, setelah itu di diamkan selama 5 menit agar larutan dapat bereaksi, setelah itu di cek menggunakan spektrofotometri uv-visible dengan panjang gelombang 515 nm.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada hasil analisis kadar abu dan lignin setelah proses delignifikasi, terjadi penurunan massa TKKS akibat berkurangnya kandungan *lignin*, *hemiselulosa*, serta senyawa kimia lainnya. Proses perlakuan awal menyebabkan kehilangan massa yang signifikan, di mana TKKS dapat kehilangan hampir setengah dari massa awalnya. Suhu perlakuan awal berperan penting terhadap perolehan massa TKKS; semakin tinggi suhu yang digunakan, maka massa TKKS yang diperoleh akan semakin sedikit. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya pelarutan lignin dan hemiselulosa selama proses berlangsung.



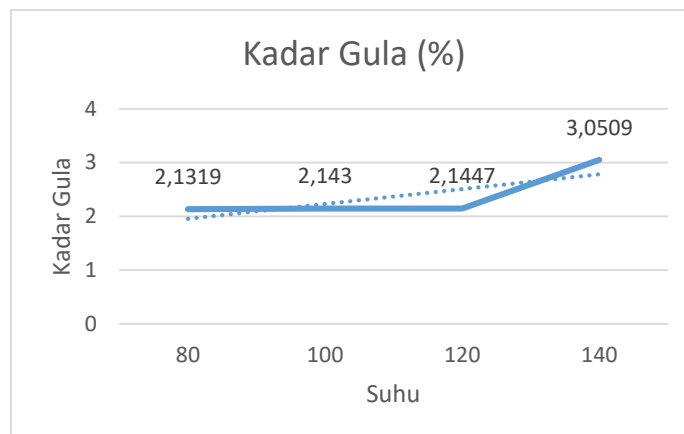
Gambar 2 Grafik Hasil Proses Kadar Abu

Tabel 2 Hasil kadar lignin

Nama	Variasi Suhu (°C)	Total lignin
TKKS	80	34.14
	100	31.58
	120	21.12
	140	17.79

Proses sakarifikasi merupakan tahap konversi polisakarida, terutama selulosa dan hemiselulosa, menjadi gula sederhana seperti glukosa dengan bantuan enzim. Dalam penelitian ini digunakan enzim C-tech ( $\alpha$ -selulase dan  $\beta$ -selulase) serta H-tech ( $\beta$ -glukosidase) selama proses inkubasi selama 72 jam. Enzim-enzim tersebut, khususnya selulase dan  $\beta$ -glukosidase, berperan penting dalam pemecahan struktur kompleks lignoselulosa. Pada biomassa tandan kosong kelapa sawit (TKKS), tahap sakarifikasi bertujuan untuk menghasilkan gula pereduksi yang selanjutnya dapat difermentasi menjadi bioethanol seperti tersaji pada Gambar 2 dan Tabel 2.

Berdasarkan Gambar 3 dengan analisa kadar etanol diperoleh pada Tabel 3, kadar gula tertinggi diperoleh sebesar 3,0509% pada variasi suhu tertinggi, yaitu 140°C. Enzim berperan sebagai katalisator yang mempercepat reaksi tanpa ikut bereaksi secara permanen. Semakin tinggi konsentrasi enzim dan semakin lama waktu inkubasi, maka semakin banyak molekul holoselulosa TKKS yang berinteraksi dengan enzim untuk dihidrolisis menjadi gula pereduksi. Oleh karena itu, peningkatan konsentrasi enzim dan durasi inkubasi akan menghasilkan jumlah gula pereduksi yang lebih tinggi.



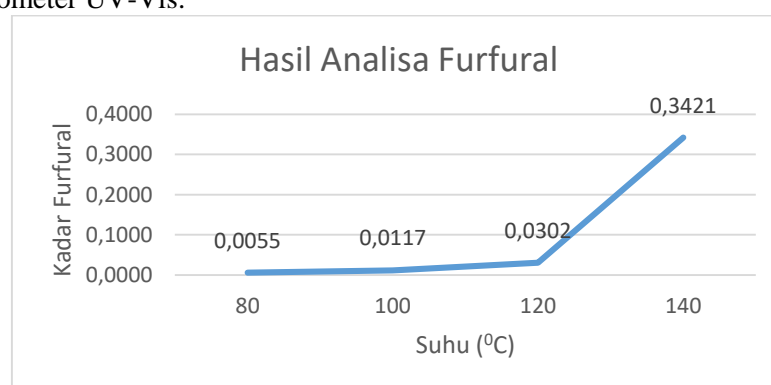
Gambar 3 Grafik hasil kadar gula

Tabel 3 Hasil Kadar Etanol pada Variasi Suhu

Variasi Suhu (°C)	Bentuk	Hasil (ppm)	Hasil (%)
80	Cair	11362	1,14
100	Cair	14902	1,49
120	Cair	20297	2,03
140	Cair	21896	2,19

Mengacu pada Gambar 4 dan Tabel 4, hasil penelitian menunjukkan bahwa pada proses fermentasi menggunakan ragi *Saccharomyces cerevisiae*, kadar lignin yang paling rendah menghasilkan konsentrasi etanol tertinggi, yaitu pada suhu 140°C dengan nilai 21.896 ppm atau 2,19%. Hal ini disebabkan oleh rendahnya kandungan lignin yang berhasil terdegradasi pada suhu tinggi. Suhu yang tinggi menyediakan energi yang cukup untuk memecah ikatan glikosidik pada selulosa, sehingga struktur selulosa menjadi lebih terbuka dan mudah diakses oleh mikroba selama proses fermentasi. Dengan demikian, proses pemanasan berperan penting dalam meningkatkan efisiensi pembentukan etanol [21].

Kadar furfural pada sampel kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi secara kualitatif yaitu uji warna dengan anilin asetat, lalu penentuan panjang gelombang maksimum dengan spektrofotometer UV-Vis.



Gambar 4 Grafik hasil kadar etanol

Tabel 4 Hasil analisa furfural pada TKKS

Variasi Suhu °C	Sampel duplo	Absorbansi (y)	Standar Furfural	Konsentrasi Furfural (x)	Rata-Rata (%)
80	A	0.037	c = 8.6683 m = 157.8	0.055	0.0055

	B	0.011		0.055	
100	A	0.511		0.1163	0.0117
	B	0.566		0.1170	
120	A	0.77		0.2991	0.0302
	B	0.942		0.3045	
140	A	0.889	c = 0.1701 m = 1.3074	4.0504	0.3421
	B	0.56		2.7922	

#### 4. KESIMPULAN

Hasil sintesis DES ChCl:OA:EG pada TKKS dengan perlakuan awal selama 180 menit pada empat variasi suhu (80, 100, 120, dan 140°C) menunjukkan bahwa suhu 140°C memberikan kondisi optimum. Pada suhu ini, degradasi lignin mencapai 17,79%, kadar gula hasil sakarifikasi enzimatik sebesar 3,05%, serta produksi etanol melalui fermentasi dengan *Saccharomyces cerevisiae* sebesar 21.896 ppm (2,19%). Selain itu, pengujian furfural menggunakan anilin asetat dan spektrofotometri UV-Vis menunjukkan kadar tertinggi 0,34% pada kondisi yang sama.

#### 5. SARAN

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan rentang nilai suhu optimum proses perlakuan awal TKKS menggunakan DES untuk mendapatkan perolehan selulosa dan gula yang tinggi untuk proses lanjutan untuk ethanol, selain itu perlu juga dilakukan percobaan variasi komponen DES sehingga mendapatkan perbandingan DES yang sesuai.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Direktorat Jendral Perkebunan (Ditjenbun), 2024. Statistik Komoditi Kelapa Sawit. [online] tersedia di : <https://ditjenbun.pertanian.go.id/?publikasi=buku-publikasi-statistik-2018-2024>
- [2] Hambali, E., S. Mujdalipah, A.H. Tambunan, A.W Pattiwiri, dan R. Hendroko. 2017. Teknologi Bioenergi. Agromedia pustaka, Jakarta.
- [3] John Arnold (2018). Pengaruh Penggunaan Tepung Singkong dan Tepung Ulat Limbah Kelapa Sawit. Universitas Papua (UNIPA)
- [4] S. Duangwang dan C. Sangwichien. *Optimizing Alkali Pretreatment of Oil Palm Empty Fruit Bunch for Ethanol Production by Application of Response Surface Methodology*. Advanced Material Research vol 622-623. (2013).
- [5] Shishov, A., Bulatov, A., Locatelli, M., Carradori, S., & Andruch, V. (2017). *Application of deep eutectic solvents in analytical chemistry. A review*. *Microchemical Journal*, 135, 33-38.
- [6] Kumar, A. K., Parikh, B. S., & Pravakar, M. (2016). *Natural deep eutectic solvent mediated pretreatment of rice straw: bioanalytical characterization of lignin extract and enzymatic hydrolysis of pretreated biomass residue*. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(10), 9265-9275.
- [7] Okur, M., & Eslek K. D. D. (2020). *Investigation of pretreatment parameters in the delignification of paddy husks with deep eutectic solvents*. *Biomass and Bioenergy*, 142, 1-7.
- [8] Ditjen PPHP. 2006. Pedoman Pengelolaan Limbah Industri Kelapa Sawit. Subdit Pengelolaan Lingkungan Direktorat Pengelohan Hasil Pertanian. Jakarta: Departemen Pertanian.
- [9] Erwinsyah, Afriani, A., & Kardiansyah, T. (2015). Potensi dan Peluang Tandan Kosong Sawit Sebagai Bahan Baku Pulp dan Kertas: Studi Kasus di Indonesia. *Jurnal Selulosa*, 79-88

- 
- [10] Fatriasari, W., Masruchin, N., & Hermiati, E. (2019). *Selulosa Karakteristik dan Pemanfaatannya*. LIPI Press.
- [11] Gustinenda, B. Y., & Margo, K. C. (2017). *Sintesis Superabsorben Aerogel Selulosa Berbasis Sabut Kelapa*. Institut Teknologi Sepuluh November.
- [12] Hermiati, E., Mangunwidjaja, D., Sunarti, T. C., & Suparno, O. (2017). Pemanfaatan biomassa lignoselulosa ampas tebu untuk produksi bioetanol. *Jurnal Penelitian Dan Pengembangan Pertanian*, 29(4), 121-130.
- [13] Lisong, Hu., Xuezhi, Fang., Menghao, Du., Fan, Luo., and Shaohai, Guo. (2020). *Hemicellulose-Based Polymers Processing and Application*. *American Journal of Plant Sciences*, 2020, 11, 2066-2079
- [14] Liu, Y., Chen, W., Xia, Q., Guo, B., Wang, Q., Liu, S., Liu, Y., Li, J., & Yu, H. (2017). *Efficient Cleavage of Lignin-Carbohydrate Complexes and Ultrafast Extraction of Lignin Oligomers from Wood Biomass by Microwave-Assisted Treatment with Deep Eutectic Solvent*. *ChemSusChem*, 10(8), 1692-1700.
- [15] Lukas, A., Ngudiwaluyo, S., Mulyono, H., Rosyadi, I., & Noor, I. M. (2018). Aspek Teknis dan Finansial Insinerasi Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Menjadi Biokar Sebagai Pupuk Karbon. *Jurnal Industri Hasil Perkebunan*, 13(1), 32-42.
- [16] Muryanto, M., Sudiyani, Y., & Abimanyu, H. (2016). Optimasi Proses Perlakuan Awal NaOH Tandan Kosong Kelapa Sawit untuk menjadi Bioetanol. *Jurnal Kimia Terapan Indonesia*, 18(01), 27-35.
- [17] Pan, M., Zhao, G., Ding, C., Wu, B., Lian, Z., & Lian, H. (2017). *Physicochemical transformation of rice straw after pretreatment with a deep eutectic solvent of choline chloride/urea*. *Carbohydrate Polymers*, 176, 307- 314
- [18] Peng, R., Pang, Y., Qiu, X., Qian, Y., Bahasa Indonesia: Dan Zhou, M. 2020. Sintesis tidak ada-Fotolisis Lignin-Berbasis Dispersant dan Aplikasinya di dalam Konsentrat Suspensi Pestisida. *RSC Maju* 10(23): 13830-13837.
- [19] Qin, W. 2010. *High Concistency Enzymatic Hydrolysis of Lignocellulose*. Thesis. The University of British Columbia.
- [20] Shen, X. J., Wen, J. L., Mei, Q. Q., Chen, X., Sun, D., Yuan, T. Q., & Sun, R. C. (2019). *Facile fractionation of lignocelluloses by biomass-derived deep eutectic solvent (DES) pretreatment for cellulose enzymatic hydrolysis and lignin valorization*. *Green Chemistry*, 21(2), 275-283
- [21] Sudiyani, Y., Triwahyuni, E., Burhani, D., Muryanto, M., Aiman; S., Amriani, F., Simanungkalit, S. P., Abimanyu, H., Dahnum, D., Laksmono, J. A., Waluyo, J., Irawan, Y., Sari, A. A., & Puteri, A. M. H. (2019). *Perkembangan Bioetanol G2: Teknologi dan Perspektif* (1st ed.). LIPI Press.
- [22] Suopajarvi, T., Ricci, P., Karvonen, V., Ottolina, G., & Liimatainen, H. (2020). *Acidic and alkaline deep eutectic solvents in delignification and nanofibrillation of corn stalk, wheat straw, and rapeseed stem residues*. *Industrial Crops and Products*, 145, 1-10.
- [23] Thi, S., & Lee, K. M. (2019). *Comparison of deep eutectic solvents (DES) on pretreatment of oil palm empty fruit bunch (OPEFB): Cellulose digestibility, structural and morphology changes*. *Bioresource Technology*, 282, 525-529.
- [24] Widiastuti dan Panji, T. 2007. Pemanfaatan Tandan Kosong Kelapa Sawit Sisa Jamur Merang (*Volvaria volvacea*) (TKSJ) sebagai Pupuk Orgnaik pada Pembibitan Kelapa Sawit. *Menara Perkebunan*, 75 (2) 70-79. Balai Penelitian Bioteknologi Perkebunan Indonesia, Bogor.
- [25] Zhang, Q., De Oliveira Vigier, K., Royer, S., & Jérôme, F. (2012). *Deep eutectic solvents: Syntheses, properties and applications*. *Chemical Society Reviews*, 41(21), 7108-7146.