

OPTIMASI DEEP EUTECTIC SOLVENT (KOLIN KLORIDA: ASAM LAKTAT) UNTUK ISOLASI SELULOSA DARI TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT (TKKS): TINJAUAN KOMPREHENSIF PENGARUH RASIO MOLAR, SUHU, DAN WAKTU PERLAKUAN BESERTA KARAKTERISASI RESIDU SELULOSA

Andrew Miracle Kaunang¹, Azimatur Rahmi², Minandre Wiratama³
kaunangandrew23@gmail.com¹, azimatur.rahmi@idu.ac.id², minandre.wiratama@idu.ac.id³
Universitas Pertahanan Republik Indonesia

ABSTRAK

Limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) sebagai salah satu sumber biomassa lignoselulosa terbesar memiliki kandungan selulosa yang berkisar antara 35-50%, hemiselulosa 20-30%, lignin 20-30%, serta air dan abu. Beberapa metode konvensional digunakan untuk memisahkan kandungan dalam TKKS. Namun, sebagian besar metode konvensional hanya akan memicu potensi masalah lingkungan karena penggunaan asam kuat dan material korosif lainnya. Tinjauan komprehensif ini mengkaji mengenai penggunaan Deep Eutectic Solvent (DES) berbasis kolin klorida dan asam laktat (ChCl:LA), dengan pendekatan hijau yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis dalam mengisolasi selulosa dari TKKS. Pendekatan ini berfokus pada optimasi tiga parameter kunci, yaitu rasio molar ChCl:LA, suhu perlakuan, dan waktu reaksi untuk memaksimalkan keefektifan proses delignifikasi dan retensi dari residu selulosa. Hasil kajian ini menunjukkan bahwa kondisi optimal pengaplikasian DES berada pada kondisi rasio molar ChCl:LA dengan perbandingan 1:2, pada suhu 120 °C selama 120 menit. Delignifikasi dapat meningkat ke angka 88-93%, serta nilai retensi selulosa pada rentang 88,6-97,86%. Hasil karakterisasi menunjukkan peningkatan indeks kristalinitas, hilangnya puncak lignin, serta morfologi serat yang lebih porous dan halus. Tinjauan ini juga menyajikan protokol laboratorium yang dapat diterapkan ke dalam proses pembuatan dan pengaplikasian DES berbasis ChCl:LA dan memunculkan potensi baru dalam pengembangan teknologi hijau dalam proses isolasi selulosa dan mendukung circular economy industri sawit nasional.

Kata Kunci: Selulosa, Deep Eutectic Solvent, Kolin Klorida-Asam Laktat, TKKS, Optimasi Parameter, Delignifikasi, Karakterisasi, Biorefinery Hijau.

PENDAHULUAN

Indonesia sebagai produsen kelapa sawit terbesar di dunia menghasilkan limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dalam jumlah sangat besar, hingga 47.084,3 ton selama tahun 2023 [1]. Limbah ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber selulosa berkualitas tinggi karena mengandung selulosa yang mencapai 30-50%, hemiselulosa 20-35% dan lignin 20-32%, memberikan potensi pemanfaatan yang sangat menjanjikan untuk *biorefinery*, sekaligus menghilangkan potensi kerusakan lingkungan yang mungkin terjadi [2], [3], [4]. Struktur lignoselulosanya yang kompleks dan bervariasi menimbulkan tantangan bagi para peneliti dalam proses pemisahan kandungan selulosa di dalamnya [5]. Beberapa metode konvensional isolasi selulosa seperti metode kraft dan penggunaan asam kuat atau senyawa alkali yang mengandung senyawa kimia agresif dalam proses isolasi selulosa ini dapat menimbulkan dampak buruk terhadap lingkungan, menyebabkan korosi dan terbentuknya inhibitor, hingga potensi degradasi selulosa [6].

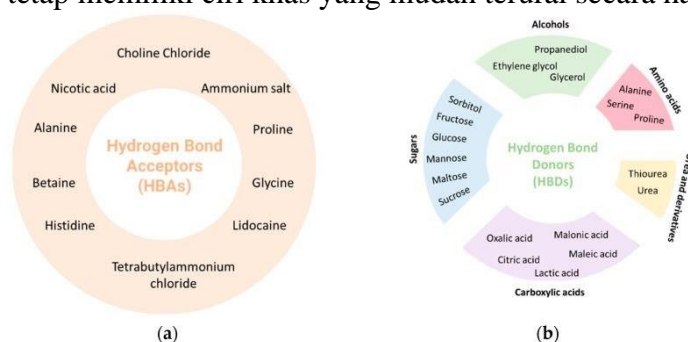
Selulosa adalah polisakarida homopolimer yang tersusun dari unit β -D-glukosa berulang melalui ikatan glikosidik β -(1,4), sehingga membentuk rantai lurus, kaku, dan tidak bercabang [7]. Rantai-rantai ini saling terikat melalui ikatan hidrogen kuat sehingga membentuk mikrofibril selulosa yang semikristalin sebagai komponen struktural utama dinding sel tumbuhan termasuk TKKS [8]. Dalam tumbuhan, selulosa berada dalam

matriks dengan hemiselulosa dan lignin, sehingga isolasi selulosa memerlukan perlakuan yang tepat agar pemisahan tidak merusak selulosa [9]. Sifat hidrofilik dan banyaknya gugus hidroksil (-OH) memungkinkan modifikasi kimia untuk mengubah selulosa menjadi derivat fungsional seperti selulosa asetat, *microcrystalline cellulose* (MCC), *nanofibril cellulose* (CNF), dan *crystal nanocellulose* (CNC) [10].

Dalam beberapa tahun belakangan ini, penemuan dan pengembangan pelarut hijau, membuka peluang baru dalam pengolahan biomassa, salah satunya dengan *Deep Eutectic Solvent* (DES) [11]. DES terbentuk akibat adanya interaksi ikatan hidrogen yang kuat antara komponen *hydrogen bond acceptor* (HBA) dan *hydrogen bond donor* (HBD), menghasilkan cairan eutektik dengan titik leleh yang jauh lebih rendah pada suhu ruang dibandingkan dengan komponen penyusunnya masing-masing, sehingga berpotensi digunakan sebagai pelarut [12].

Klasifikasi DES disesuaikan dengan komponen penyusun HBA dan HBD [13]. Tipe I terbentuk dari garam kuartener (HBA) dan garam logam anhidrat sebagai (HBD) [14], tipe II dengan garam kuartener (HBA) dan garam logam hidrat (HBD) [15], tipe III yang terbentuk dari garam kuartener (HBA) dengan HBD berupa molekul organik seperti asam karboksilat, poliol ataupun amida [16]. Tipe IV yang merupakan perpaduan garam logam sebagai HBA dengan molekul organik yang bukan tergolong garam kuartener sebagai HBD [17]. Gambar 1 menunjukkan variasi konstituen yang dapat digunakan sebagai HBA dan HBD pada DES tipe III, sehingga mampu bekerja dengan tingkat efisiensi yang maksimal [18].

Campuran DES berbasis kolin klorida dan asam laktat (ChCl:LA) termasuk dalam tipe III dan sering disebut sebagai *natural deep eutectic solvent* (NADES) karena kedua komponennya berasal dari sumber alami yang juga menarik perhatian karena memiliki kekuatan delignifikasi yang sangat baik [19], [20]. ChCl:LA akan dengan mudah bercampur dan memperlihatkan adanya penurunan titik suhu leleh hingga mencapai titik suhu minimum atau biasa disebut dengan titik suhu eutektik, akibat adanya ikatan hidrogen antara kedua senyawa, sehingga membentuk larutan tidak berwarna atau homogen, dengan tetap memiliki ciri khas yang mudah terurai secara hayati [17], [21].



Gambar 1. Contoh tipikal (a) akseptor ikatan hidrogen (HBA) dan (b) donor ikatan hidrogen (HBD) yang digunakan dalam pembuatan DES [21].

Karakterisasi residu selulosa merupakan langkah esensial untuk memvalidasi keberhasilan proses isolasi menggunakan DES ChCl:LA. Analisis spektroskopi (FTIR dan XRD), morfologi (SEM), serta sifat termal (TGA) memberikan bukti langsung mengenai tingkat delignifikasi, peningkatan indeks kristalinitas, dan perubahan struktur serat [23], [24]. Hal ini menunjukkan bahwa residu selulosa dari TKKS setelah praperlakuan ChCl:LA memiliki kemurnian tinggi, dengan kandungan selulosa yang meningkat secara signifikan, serta memiliki permukaan serat yang lebih halus dan porus [25], [26], [27].

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian hanya lebih fokus pada penggunaan biomassa di luar TKKS. Tinjauan ini bertujuan untuk mempelajari dan menganalisis temuan yang berkaitan dari seluruh studi literatur mulai tahun 2018 hingga 2025, dengan fokus pada data eksperimen langsung dari jurnal hasil penelitian yang berkaitan. Hipotesis utama yang diuji adalah bahwa kondisi optimal pada biomassa serupa dapat diterapkan secara linier pada TKKS, sehingga menghasilkan selulosa residu berkualitas tinggi untuk aplikasi lanjutan.

METODE PENELITIAN

Tinjauan literatur ini dilakukan dengan pendekatan naratif komprehensif yang berfokus pada studi-studi empiris yang relevan dengan penggunaan DES ChCl:LA untuk isolasi selulosa dari TKKS dan biomassa lignoselulosa serupa. Pemilihan studi dilakukan berdasarkan kriteria yang ketat. Artikel peer-reviewed yang diterbitkan antara tahun 2018 hingga 2025, menyajikan data eksperimen tentang rasio molar, suhu, waktu perlakuan, delignifikasi, yield selulosa residu, serta karakterisasi (Chesson-Datta, FTIR, XRD, SEM). Sebanyak 61 artikel terbaik dipilih untuk analisis mendalam, dengan prioritas pada penelitian yang secara langsung menggunakan TKKS sebagai bahan baku. Data dari setiap studi dikompilasi secara sistematis ke dalam tabel dan grafik untuk memungkinkan perbandingan yang jelas antara kondisi optimasi.

Karakterisasi residu selulosa dilakukan dengan kombinasi teknik analitik standar untuk mengevaluasi kemurnian, struktur kimia, kristalinitas dan morfologi. Komposisi kimia (selulosa, hemiselulosa, lignin) dianalisis menggunakan metode Chesson-datta. Spektroskopi FTIR digunakan untuk mengidentifikasi perubahan gugus fungsi (hilangnya peak lignin pada $1500-1600\text{ cm}^{-1}$ dan peningkatan peak selulosa pada 1030 cm^{-1}) serta perhitungan Total Crystallinity Index (TCI) [23], [24]. Difraksi sinar-X (XRD) dilakukan untuk mengukur indeks kristalinitas (CrI) menggunakan metode Segal [25]. Morfologi permukaan diamati dengan Scanning Electron Microscopy (SEM) pada tegangan 10-15 kV dengan perbesaran $500-1000\times$ [26], [27]. Semua data karakterisasi dikompilasi untuk membandingkan kualitas residu selulosa antarkondisi optimasi dan biomassa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Preparasi dan Variasi Perlakuan ChCl:LA

Dalam rangkaian isolasi selulosa ini, tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dipastikan halus dan melewati penyaringan 60 hingga 100 mesh, yang akan meningkatkan luas permukaan spesifik dari serbuk TKKS dan memecah ikatan antar serat secara fisik, sehingga reaksi antara DES dan serbuk TKKS dapat berlangsung lebih baik dan lebih efektif [8]. Setelah penghalusan, kadar air didalam TKKS dipastikan berada pada angka dibawah 10% agar proses perlakuan sebelum maupun sesudah pengaplikasian DES lebih sesuai dan meningkatnya akurasi pengukuran selama proses [29], [30]. Di samping itu, potensi kerusakan residu kering akibat pertumbuhan mikroba pada kondisi lembap yang terjadi saat kadar air berada di atas angka 20% dapat dihindari [31].

Persiapan DES ChCl:LA dilakukan dengan sintesis melalui metode pemanasan sederhana. Rasio yang paling umum dan optimal dalam studi TKKS (1:2 dan 1:5) [32], [33], mampu membentuk cairan homogen bening yang stabil, sehingga menandakan pembuatan DES berhasil dilakukan yang selanjutnya dapat diaplikasikan pada serbuk TKKS yang di uji [34]. DES ChCl:LA memiliki densitas $1,16-1,19\text{ g cm}^{-3}$, viskositas rendah $0,04-0,06\text{ Pa}\cdot\text{s}$ pada 25°C , pH sangat rendah (0-1,0), dan stabil hingga 150°C [35].

Pengaplikasian Deep Eutectic Solvent (DES)

Hasil pengaplikasian DES ChCl:LA dengan TKKS berlangsung sesuai mekanisme reaksi dengan dua jalur sinergis yang bekerja secara simultan, yaitu reaksi asidolisis oleh proton H^+ dari asam laktat yang menyerang dan memutus ikatan eter β -O-4 dan α -O-4 pada lignin, serta pemutusan ikatan hidrogen oleh anion klorida (Cl^-) dan gugus hidroksil (-OH) dari kolin serta asam laktat membuat ikatan hidrogen antara lignin dan karbohidrat terganggu dan larut dalam DES dengan tetap mempertahankan residu selulosa [36].

Efektivitas perlakuan berbasis deep eutectic solvent (DES) sangat dipengaruhi oleh jenis biomassa, rasio molar komponen DES, suhu, dan waktu proses, yang pada akhirnya menentukan tingkat delignifikasi, kadar selulosa residu, serta yield glukosa setelah hidrolisis enzimatis [37]. Pada TKKS, kombinasi ChCl dengan donor ikatan hidrogen pada rasio 1:2 hingga 1:5 pada suhu 120-150°C selama 90-180 menit mampu menghasilkan delignifikasi sekitar 53,6-88% dan selulosa residu 50-88,6%, yang menandakan bahwa lignin dan hemiselulosa dapat mengalami penurunan signifikan sesuai dengan kondisi perlakuan [38]. Hasil ini mencerminkan kemampuan DES untuk memutus interaksi antarkomponen lignoselulosa, terutama ikatan hidrogen pada matriks karbohidrat serta sebagian ikatan ester dan eter yang menghubungkan lignin dengan hemiselulosa, sehingga mengakibatkan fraksi selulosa menjadi lebih terekspos secara enzimatis [11].

Perlakuan pada perbandingan rasio molar 1:2 umumnya lebih menguntungkan daripada 1:5 untuk memperoleh konversi yang tinggi, karena sistem yang lebih kaya donor ikatan hidrogen cenderung memiliki kemampuan pelarutan lignin yang lebih efektif [39]. Delignifikasi 55,81% dan yield glukosa 90,79%, menunjukkan bahwa kondisi perlakuan dengan DES menghasilkan padatan yang lebih mudah dihidrolisis [39]. Namun, nilai yield glukosa yang tinggi juga dapat terganggu dengan adanya faktor derajat kerusakan selulosa yang melibatkan pembengkakan serat dan dekomposisi komponen terlarut pada permukaan residu [40], seperti pada perbandingan studi literatur yang dipresentasikan ke dalam Tabel 1.

Tabel 1. Kompilasi data karakterisasi residu selulosa dari berbagai studi

| No | Biomassa | Rasio Molar | Suhu ($^{\circ}C$) | Waktu (menit) | Delignifikasi (%) | Selulosa Residu (%) | Glukosa Yield (%) | Referensi |
|----|-------------|-------------|----------------------|---------------|-------------------|---------------------|-------------------|-----------|
| 1 | TKKS/OP EFB | 1:5 | 120 | 180 | 88 | 50 | | [32] |
| 2 | TKKS/OP EFB | 1:2 | 120 | 180 | 82 | 68 | | [41] |
| 3 | TKKS/OP EFB | 1:2 | 150 | 90 | 55,81 | | 90,79 | [19] |
| 4 | TKKS/OP EFB | 1:5 | 126,4 | 162 | 53,6 | 88,6 | | [42] |
| 5 | TKKS/OP EFB | 1:2 | 50 (ultra sound) | 30 | 40,2 | | 36,7 | [43] |
| 6 | TKKS/OP EFB | 1:2 | 170 | 60 | | | 76,93 (furfural) | [33] |
| 7 | Bagasse | 1:2 | 120 | 120 | 96,5 | 97,86 | | [22] |
| 8 | Bambu | 1:5 | 130 | 180 | 85 | 92 | | [23] |
| 9 | Hemp | 1:2 | 100 | 240 | 78 | 89 | | [24] |
| 10 | Cotton pods | 1:5 | 120 | 180 | 82 | 91 | | [25] |
| 11 | Vine shoot | 1:2 | 120 | 120 | 80 | 88 | | [26] |
| 12 | Corn stover | 1:2 | 130 | 150 | 79 | 90 | | [27] |

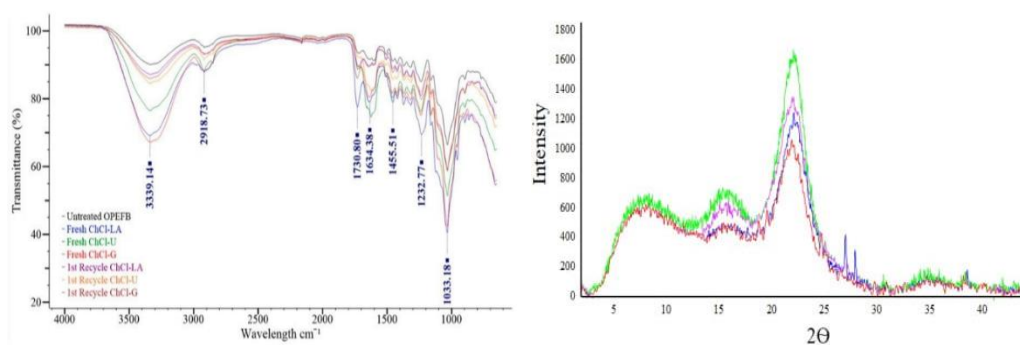
Keasaman asam laktat memungkinkan pemutusan ikatan eter lignin dan ekstraksi lignin lebih lanjut [26]. Namun, esterifikasi tambahan juga dapat terjadi baik dengan gugus hidroksil lignin asli maupun yang terbentuk setelah pemutusan ikatan asam. Selain itu, oligomerisasi asam laktat dapat menjadi kerugian dalam pemulihan dan penggunaan kembali pelarut [44]. Kehadiran oksigen karbonil dalam senyawa pembentuk DES memungkinkan mereka berpartisipasi dalam pembentukan dua ikatan hidrogen, sementara oksigen hidroksil dapat berkontribusi pada satu ikatan hidrogen. Oleh karena itu, molekul LA berpotensi membentuk empat ikatan hidrogen [45]. Selain itu, ChCl dapat menerima tiga ion H^+ karena gugus aminonya dan gugus hidroksil dalam strukturnya dapat memfasilitasi terbentuknya ikatan hidrogen tambahan, sehingga gugus hidroksil LA dapat membentuk dua ikatan hidrogen dengan gugus amino ChCl [26].

Karakterisasi Residu Selulosa

Metode Chesson-Datta merupakan pendekatan mass balance yang sangat umum digunakan untuk mengukur komposisi lignoselulosa dan menilai selektivitas perlakuan [28]. Metode ini telah disesuaikan dengan standar laboratorium untuk membagi biomassa menjadi empat fraksi utama melalui proses ekstraksi bertahap, mulai dari ekstraksi menggunakan air dan etanol, analisis hemiselulosa menggunakan asam encer, selulosa menggunakan asam pekat, dan lignin yang merupakan residu tak larut [46].

Yield selulosa residu dari perlakuan dengan DES ChCl:LA pada TKKS/OPEFB mencapai 68–88,6 % dengan kemurnian yang sangat tinggi [32], [42]. Retensi selulosa 68 % pada rasio 1:2 [41]. Sementara [42] berhasil mencapai 88,6 % pada kondisi optimasi RSM (126,4 °C, 162 menit). Disisi lain, penggunaan rasio molar DES ChCl:LA (1:2) menghasilkan gula pereduksi tertinggi sebesar 20,7% [41]. Sehingga dapat dinyatakan bahwa ChCl:LA terbukti dapat menjadi alternatif isolasi selulosa berbasis DES.

Kinerja praperlakuan ChCl-LA dipengaruhi oleh rasio molarnya yang menunjukkan bahwa semakin tinggi rasio molar, semakin rendah hasil gula pereduksi yang diperoleh dari residu kering yang telah diberi perlakuan awal [38]. Tren ini dapat dijelaskan berdasarkan pengurangan luas permukaan efektif residu kering setelah perlakuan awal DES. Secara teoritis, semakin besar luas permukaan yang terpapar enzim, semakin baik daya cerna selulosa dan menghasilkan peningkatan hasil gula pereduksi [47]. Residu kasar yang telah diberi perlakuan awal ditemukan menggumpal ketika diberi perlakuan awal dengan DES ChCl:LA karena pengaruh kekuatan keasaman yang tinggi sesuai yang dilaporkan oleh [48]. Dengan demikian, ChCl:LA dengan rasio molar 1:2 dengan kekuatan keasaman terlemah diusulkan sebagai rasio molar terbaik karena mengekspos fraksi selulosa tertinggi terhadap hidrolisis enzimatik [22].

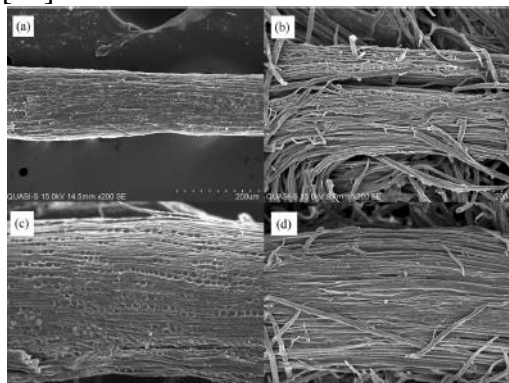


Gambar 2. (a) Overlay spektra FTIR residu selulosa sebelum dan sesudah perlakuan ChCl:LA [43], (b) Difraktogram XRD dari residu asli (merah) ChCl:LA (biru tua) [49].

Analisis dengan FTIR dilakukan dalam pengidentifikasian gugus fungsional dari selulosa ataupun komponen lainnya dengan adanya pergeseran puncak sebelum dan setelah perlakuan dengan DES [50]. Penurunan ataupun peningkatan intensitas puncak dalam spektrum FTIR menunjukkan adanya perubahan yang terjadi selama perlakuan [51], seperti pada Gambar 2 (a). Berbagai literatur mengenai analisis FTIR pada selulosa dari lignoselulosa melaporkan beberapa pita serapan utama yang umumnya muncul pada analisis FTIR seperti (3330-3340) cm^{-1} yang merupakan regangan O-H selulosa (ikatan H intra/intermolekul), 2900-2800 cm^{-1} yang menunjukkan vibrasi peregangan gugus metilen CH dan mencerminkan bahwa lignoselulosa ada pada semua sampel TKKS. (2890-2900) cm^{-1} regangan C-H dari kerangka glukopiranos, (1424 cm^{-1}) “crystallinity band” CH_2 dari getaran selulosa kristalin, (1370-1360 cm^{-1}) deformasi C-H selulosa [51]. (1260 cm^{-1}), regangan C-O atau C-O-C dalam struktur selulosa dapat menjadi lebih tajam karena berkurangnya lignin ataupun hemiselulosa, membuat gugus selulosa lebih terekspos [52]. Adapun getaran pada spektrum (1160-1100 cm^{-1}) menandakan regangan asimetris C-O-C (jembatan glikosidik), (1050-1030 cm^{-1}) regangan C-O alkohol sekunder dan C-O-C sebagai cincin anhidroglukosa, kemudian ada pita serapan (896 cm^{-1}) getaran C-O-C β -glikosidik sebagai pita serapan selulosa amorf [53].

Dalam mengidentifikasi fase kristalin dari selulosa, metode analisis X-Ray Diffraction ini diterapkan dalam menganalisis kandungan selulosa murni sebelum dan sesudah perlakuan dengan DES [54]. Mikrograf yang menggunakan ChCl-LA menunjukkan tampilan permukaan yang halus dan konsisten, sebagian besar menunjukkan adanya selulosa kristalin. Peningkatan nilai XRD, yang menunjukkan tingkat kristalinitas yang lebih tinggi dan struktur selulosa yang lebih teratur daripada sampel asli dan menunjukkan penghilangan senyawa amorf seperti lignin dan hemiselulosa setelah perlakuan awal ChCl-LA [55].

Perlakuan awal DES asam ringan meningkatkan reaktivitas selulosa melalui proses dekonstruksi/pembengkakan selulosa, dengan menghilangkan lignin dan hemiselulosa terutama xilan, untuk mengekspos komponen selulosa terdalam biomassa agar enzim dapat mengaksesnya [56]. Difraktogram hasil analisis XRD terhadap residu kasar sebelum dan sesudah perlakuan awal DES menunjukkan adanya puncak intensitas pada sudut 2θ sekitar 16° , yang berkaitan dengan daerah amorf dalam residu hasil perlakuan DES [55]. Selain itu, peningkatan area lembah hingga sekitar 18° juga diamati, yang mengindikasikan keberadaan komponen amorf seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin dengan struktur yang tidak teratur [49]. Indeks kristalinitas (CrI) menunjukkan bahwa nilai CrI mengalami peningkatan setelah perlakuan awal DES, khususnya pada sistem ChCl:LA (53,52%) dibandingkan sebelum perlakuan (41,01%), berkaitan dengan modifikasi struktur selulosa selama proses perlakuan awal, serta penghilangan komponen amorf dari residu kering [57].



Gambar 3. SEM morfologi permukaan TKKS, (a) residu sebelum perlakuan ChCl:LA, (b) residu dengan fokus pemulihan lignin setelah perlakuan maksimum, (c) residu setelah perlakuan ringan untuk fokus pemulihan selulosa maksimum dan (d) residu setelah perlakuan menengah untuk fokus pemulihan lignin dan selulosa bersamaan [42].

Analisis menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) menunjukkan adanya perbedaan bentuk morfologi dari sampel TKKS atau OPEFB (Oil Palm Empty Fruit Bunch), sebelum dan sesudah perlakuan dalam analisis menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) [58]. Gambar 3 merepresentasikan hasil analisis morfologi yang memperlihatkan permukaan TKKS yang relatif halus dan tidak berpori sebelum perlakuan DES seperti pada Gambar 3(a) menunjukkan bahwa komponen utama seperti lignin, selulosa, dan hemiselulosa masih saling berikatan [33], [42]. Sebaliknya, residu kasar yang telah mengalami perlakuan awal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 (b)-(d) memperlihatkan adanya perubahan morfologi pada struktur menjadi lebih berpori dan menyerupai spons [58].

Pada kondisi perlakuan maksimum, hasil analisa morfologi serat menunjukkan struktur yang tidak teratur serta munculnya retakan pada permukaan serat, sebagaimana terlihat pada Gambar 3(b) [42]. Kerusakan serat tersebut disebabkan oleh kondisi praperlakuan yang relatif keras, yaitu kombinasi suhu tinggi dan waktu perlakuan yang lama. Pada kondisi ini, ikatan lignin dan karbohidrat menjadi terganggu dan diikuti oleh terlarutnya sebagian selulosa [55]. Pada Gambar 3(c), permukaan residu kering menunjukkan adanya pori-pori, namun relatif terorganisir dan tidak ditemukannya kerusakan signifikan pada komponen penyusun struktur serat (lignin dan hemiselulosa) [13]. Pada Gambar 3(d), terlihat adanya gangguan pada struktur serat karena efek paparan. Ini menunjukkan bahwa pada kondisi ini sebagian besar lignin dan hemiselulosa telah berhasil dihilangkan, sementara struktur selulosa masih relatif terjaga [10].

Aplikasi Potensial, Tantangan, dan Prospek Masa Depan

Selulosa residu yang dihasilkan dari isolasi menggunakan DES ChCl:LA memiliki kemurnian tinggi dan sifat fisikokimia yang unggul, sehingga membuka peluang aplikasi yang sangat luas. Di bidang material, selulosa ini dapat dimanfaatkan sebagai penguat pada nanokomposit untuk pembuatan film kemasan biodegradable, aerogel, dan hidrogel yang ramah lingkungan [23], [59]. Selulosa juga berpotensi sebagai bioadsorben untuk penyerapan logam berat dan pewarna pada limbah industri, berkat luas permukaan yang meningkat setelah perlakuan. Dalam sektor energi, residu selulosa dapat menjadi bahan baku utama untuk produksi bioetanol melalui hidrolisis enzimatis, sehingga mendukung target renewable energy di Indonesia [26], [27].

Namun, masih terdapat beberapa tantangan yang perlu diatasi. Pemulihan DES ChCl:LA meskipun dapat dilakukan hingga beberapa siklus, masih memerlukan teknik pemisahan yang lebih efisien untuk menghindari akumulasi impurities [33], [43]. Skalabilitas proses dari skala laboratorium ke industri juga menjadi isu utama, karena konsumsi energi dan biaya anti-solvent perlu dioptimalkan lebih lanjut. Di Indonesia, prospek pengembangan sangat cerah jika dikaitkan dengan kebijakan biorefinery nasional dan circular economy. Kolaborasi antara industri sawit, perguruan tinggi, dan pemerintah dapat mempercepat adopsi teknologi DES ini, terutama melalui integrasi dengan proses ultrasonik atau microwave untuk mengurangi waktu dan penggunaan energi [20].

KESIMPULAN

Tinjauan komprehensif ini menyimpulkan bahwa DES ChCl:LA merupakan pelarut hijau yang sangat efektif untuk isolasi selulosa dari TKKS/OPEFB. Kondisi optimal rasio molar 1:2, suhu 120 °C, dan waktu 120 menit memberikan delignifikasi tinggi serta retensi selulosa yang unggul, dengan karakterisasi yang membuktikan kualitas residu yang baik. Analisis Chesson-Datta menegaskan selektivitas delignifikasi yang tinggi, sementara aplikasi potensial selulosa ini sangat luas mulai dari nanokomposit hingga bioetanol.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan optimasi proses menggunakan pendekatan Response Surface Methodology (RSM) secara langsung pada TKKS dalam skala pilot guna memperoleh kondisi operasi yang lebih representatif. Selain itu, integrasi teknik hibrida seperti ultrasonik atau microwave perlu dieksplorasi untuk meningkatkan efisiensi proses. Evaluasi menyeluruh terhadap aspek keberlanjutan melalui life-cycle assessment (LCA) serta analisis ekonomi proses juga penting dilakukan untuk menilai kelayakan implementasi secara industri. Di sisi lain, pengembangan metode pemulihan deep eutectic solvent (DES) yang lebih sederhana dan efisien menjadi krusial untuk mendukung keberlanjutan proses. Terakhir, potensi aplikasi komersial selulosa residu perlu dikaji lebih lanjut, khususnya untuk pemanfaatan di sektor industri kemasan dan biomaterial di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Guellout, M. Guellout, and A. Bravo, "Use of Deep Eutectic Solvents for Plastic Waste Management," *Int. J. Res. Innov. Soc. Sci.*, 2025, doi: 10.47772/ijriss.2025.910000630.
- A. Putri, Z. Zulnazri, R. Dewi, S. Sulhatun, and S. Bahri, "KARAKTERISASI GLUKOSA DARI PROSES HIDROLISIS α -SELULOSA DARI LIMBAH KULIT KOPI ARABIKA," *J. Teknol. Kim. Unimal*, vol. 11, p. 102, May 2022, doi: 10.29103/jtku.v11i1.7254.
- A. Satlewal, R. Agrawal, S. Bhagia, J. Sanggoro, and A. J. Ragauskas, "Natural deep eutectic solvents for lignocellulosic biomass pretreatment," *Biotechnol. Biofuels*, 2018, doi: 10.1016/j.biotechadv.2018.08.009.
- A. Syauqi, M. Ramadhan, A. Anggraeni, H. Yuana, and F., "Rapid test of bioethanol raw material: The Weende-Chesson-Datta method modification to fiber cellulose," in *THE 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE OF LIGNOCELLULOSE*, 2024. doi: 10.1063/5.0184621.
- A. Toleugazykyzy et al., "Comprehensive Review of Recent Trends in the Use of Deep Eutectic Solvents for the Valorization of Secondary Lignocellulosic Biomass," *Sustainability*, vol. 17, no. 21, p. 9492, 2025, doi: 10.3390/su17219492.
- A. W. Putranto, A. S. M. Chua, S. Suhartini, and G. C. Ngoh, "Augmentation of cellulose extraction from oil palm empty fruit bunch via rapid and energy-saving deep eutectic solvent-pulsed electric field pretreatment," *Biomass Convers. Biorefinery*, 2025, doi: 10.1007/s13399-024-06321-7.
- B. B. Hansen et al., "Deep Eutectic Solvents: A Review of Fundamentals and Applications," *Chem. Rev.*, vol. 121, no. 3, pp. 1232–1285, Feb. 2021, doi: 10.1021/acs.chemrev.0c00385.
- Badan Pusat Statistik Indonesia, *Statistik Tanaman Perkebunan Tahunan Indonesia 2024 (Kelapa Sawit, Kopi, Kakao, Karet, Teh, dan Komoditas Perkebunan Unggulan)*. 2025. [Online]. Available: <https://www.bps.go.id>
- C. Cannavacciuolo, S. Pagliari, J. Frigerio, C. M. Giustra, M. Labra, and L. Campone, "Natural Deep Eutectic Solvents (NADESs) Combined with Sustainable Extraction Techniques: A Review of the Green Chemistry Approach in Food Analysis," *Foods*, vol. 12, no. 1, p. 56, 2023, doi: 10.3390/foods12010056.
- C. Ferreira and M. Sarraguça, "A Comprehensive Review on Deep Eutectic Solvents and Its Use to Extract Bioactive Compounds of Pharmaceutical Interest," 2024. doi:

- 10.3390/ph17010124.
- C. Li et al., “Effect of Choline-Based Deep Eutectic Solvent Pretreatment on the Structure of Cellulose and Lignin in Bagasse,” *Processes*, 2021, doi: 10.3390/pr9020384.
- D. Mesa et al., “Preliminary Physical and Chemical Characterization of By-Products from Cuban Coffee Production,” *Foods*, vol. 13, 2024, doi: 10.3390/foods13213348.
- D. Smink, A. Juan, B. Schuur, and S. R. A. Kersten, “Understanding the Role of Choline Chloride in Deep Eutectic Solvents Used for Biomass Delignification,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 58, no. 36, pp. 16348–16357, Sep. 2019, doi: 10.1021/acs.iecr.9b03588.
- E. Benitez-Correa, J. M. Bastias-Montes, S. Acuna-Nelson, and O. Munoz-Farina, “Effect of choline chloride-based deep eutectic solvents on polyphenols extraction from cocoa bean shells and antioxidant activity of extracts,” *Curr. Res. Food Sci.*, vol. 7, p. 100614, 2023, doi: 10.1016/j.crfs.2023.100614.
- E. Scelsi, A. Angelini, and C. Pastore, “Deep Eutectic Solvents for the Valorisation of Lignocellulosic Biomasses towards Fine Chemicals,” *Biomass*, 2021, doi: 10.3390/biomass1010003.
- F. Baraka et al., “Enhancing lignocellulosic biomass pretreatment with choline chloride-based deep eutectic solvents,” *J. Environ. Chem. Eng.*, 2025, doi: 10.1016/j.jece.2025.117087.
- F. Bolat, J. Ghitman, M. I. Necolau, E. Vasile, and H. Iovu, “A Comparative Study of the Impact of the Bleaching Method on the Production and Characterization of Cotton-Origin Nanocrystalline Cellulose by Acid and Enzymatic Hydrolysis,” 2023. doi: 10.3390/polym15163446.
- F. Godoy, M. Martínez-Cinco, J. Rutiaga-Quinones, O. Buenrostro-Delgado, and J. Mendoza, “The significance of biowaste drying analysis as a key pre-treatment for transforming it into a sustainable biomass feedstock,” *PeerJ*, vol. 12, 2024, doi: 10.7717/peerj.18248.
- G. Kwon et al., “Treatment effects of choline chloride-based deep eutectic solvent on the chemical composition of red pine (*Pinus densiflora*),” *BioResources*, vol. 15, no. 3, pp. 6457–6470, 2020, doi: 10.15376/biores.15.3.6457-6470.
- H. Soleimanzadeh, D. Salari, and A. Olad, “Optimization of delignification and cellulose isolation process from Natural cotton pods and preparation of its nanofibers with choline chloride–lactic acid eutectic solvents,” *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 15, pp. 2063–2079, 2025, doi: 10.1007/s13399-023-04141-9.
- H. Wang et al., “Extraction of cellulose nanocrystals using a recyclable deep eutectic solvent,” *Cellulose*, 2020, doi: 10.1007/s10570-019-02867-2.
- J. D. Quek, K. M. Lee, S. Lim, W. Y. Tey, H. S. Kang, and K. K. Quen, “Delignification of oil palm empty fruit bunch via ultrasound-assisted deep eutectic solvents,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/463/1/012007.
- J. L. K. Mamilla, U. Novak, M. Grilc, and B. Likozar, “Natural deep eutectic solvents (DES) for fractionation of lignocellulosic biomass,” *Biomass Bioenergy*, 2019, doi: 10.1016/j.biombioe.2018.12.002.
- J. Oguche, A. Ameh, T. Bello, and N. Maina, “Prospects of Deep Eutectic Solvents in Lactic Acid Production Process: A Review,” pp. 96–128, 2023, doi: 10.22034/JCR.2023.349358.1203.
- J. Sonyeam, R. Chaipanya, S. Suksomboon, and M. J. Khan, “Process design for acidic and alcohol based deep eutectic solvents pretreatment of oil palm empty fruit bunch toward nanocellulose production,” *Sci. Rep.*, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-57631-9.
- K. M. Lee, S. M. Chia, G. C. Ngoh, and A. S. M. Chua, “Biomass valorization by integrating ultrasonication and deep eutectic solvents: Delignification, cellulose digestibility and solvent reuse,” *Biochem. Eng. J.*, 2022, doi: 10.1016/j.bej.2022.108587.
- M. K. Gill, G. S. Kocher, A. S. Panesar, and M. S. Taggar, “Deep eutectic solvent-mediated delignification of corn stover for improved fermentable sugar yield and bioethanol production,” *Fuel*, 2025, doi: 10.1016/j.fuel.2025.135457.
- M. Madhushree, P. Vairavel, G. T. Mahesha, and K. S. Bhat, “A Comprehensive Review of Cellulose and Cellulose-Based Materials: Extraction, Modification, and Sustainable Applications,” *J. Nat. Fibers*, vol. 21, no. 1, p. 2418357, Dec. 2024, doi:

- 10.1080/15440478.2024.2418357.
- M. Muryanto, Y. Sudiyani, M. A. Darmawan, E. M. Handayani, and M. Gozan, "Simultaneous Delignification and Furfural Production of Palm Empty Fruit Bunch by Novel Ternary Deep Eutectic Solvent," *Arab. J. Sci. Eng.*, 2023, doi: 10.1007/s13369-023-08211-y.
- M. Shaibuna, K. Hiba, A. M. Shebitha, M. J. Kariyottu Kuniyil, P. B. Sherly mole, and K. Sreekumar, "Sustainable and selective synthesis of benzimidazole scaffolds using deep eutectic solvents," *Curr. Res. Green Sustain. Chem.*, vol. 5, p. 100285, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2022.100285>.
- N. Delgado-Mellado et al., "Thermal stability of choline chloride deep eutectic solvents by TGA/FTIR-ATR analysis," *J. Mol. Liq.*, vol. 260, pp. 37–43, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.03.076>.
- N. Sayakulu and S. Soloi, "The Effect of Sodium Hydroxide (NaOH) Concentration on Oil Palm Empty Fruit Bunch (OPEFB) Cellulose Yield," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2314, p. 12017, Aug. 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2314/1/012017.
- N. Suriyachai et al., "Optimization of Cellulose Recovery Using Deep Eutectic Solvent Fractionation: A Response Surface Method Approach," *Energies*, vol. 17, no. 17, p. 4257, 2024, doi: 10.3390/en17174257.
- N. Ungureanu, V. Vlăduț, G. Voicu, M. Dinca, and B. Zabava, "Influence of biomass moisture content on pellet properties - review," 2018, doi: 10.22616/erdev2018.17.n449.
- P. Kalhor and K. Ghandi, "Deep Eutectic Solvents for Pretreatment, Extraction, and Catalysis of Biomass and Food Waste," *Molecules*, 2019, doi: 10.3390/molecules24224012.
- Q. Ji, X. Yu, A. E.-G. A. Yagoub, L. Chen, and C. Zhou, "Efficient removal of lignin from vegetable wastes by ultrasonic and microwave-assisted treatment with ternary deep eutectic solvent," *Ind. Crops Prod.*, vol. 149, p. 112357, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112357>.
- Q. Wei et al., "Metal chloride mediated choline chloride-lactic acid deep eutectic solvent pretreatment of bamboo," *Int. J. Biol. Macromol.*, 2025, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.141107.
- R. Cañadas, A. Duque, A. Bahillo, R. Iglesias, and P. Manzanares, "Pretreatment of Vine Shoot Biomass by Choline Chloride-Based Deep Eutectic Solvents to Promote Biomass Fractionation and Enhance Sugar Production," *Bioengineering*, 2024, doi: 10.3390/bioengineering11090935.
- R. Karima, E. Yuanita, B. Amalia, A. Arianita, T. Mailisa, and B. Nugroho, "Sintesis Micro-Fibrillated Cellulose dari Serat Tandan Kosong Sawit dengan Hidrolisis Asam Oksalat," vol. 10, pp. 1–8, 2020, doi: 10.25269/jsel.v10i01.281.
- R. Mohanty and S. Sahoo, "Dissociative Experiences and Stressful Life Events in Dissociative Disorders - A Cross Sectional Study," *Univers. J. Public Heal.*, 2021, doi: 10.13189/ujph.2021.090616.
- R. S. Abolore, S. Jaiswal, and A. K. Jaiswal, "Green and sustainable pretreatment methods for cellulose extraction from lignocellulosic biomass and its applications: A review," *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.*, vol. 7, p. 100396, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100396>.
- S. Affat, "A review of deep eutectic solvents (DESs), Preparation, Classification, Physicochemical properties, Advantages and disadvantages," *Univ. Thi-Qar J. Sci.*, vol. 11, pp. 166–174, Jun. 2024, doi: 10.32792/utq/utjsoci/v11i1.1208.
- S. Hong, X.-J. Shen, Z. Xue, Z. Sun, and T.-Q. Yuan, "Structure–function relationships of deep eutectic solvents for lignin extraction and chemical transformation," *Green Chem.*, vol. 22, no. 21, pp. 7219–7232, 2020, doi: 10.1039/D0GC02439B.
- S. Ijardar, V. Singh, and R. Gardas, "Revisiting the Physicochemical Properties and Applications of Deep Eutectic Solvents," *Molecules*, vol. 27, 2022, doi: 10.3390/molecules27041368.
- S. M. Chia et al., "Process optimization on co-production of lignin and cellulose in deep eutectic solvent pretreatment of oil palm empty fruit bunch," *Arab. J. Sci. Eng.*, 2019, doi: 10.1016/j.bej.2022.108587.

- S. M. Chia, K. M. Lee, G. C. Ngoh, and A. S. M. Chua, "Process optimization on co-production of lignin and cellulose in deep eutectic solvent pretreatment of oil palm empty fruit bunch," *Biomass Convers. Biorefinery*, 2024, doi: 10.1007/s13399-023-05025-8.
- S. M. F. Bahazin et al., "DES-like mixtures based on choline chloride and lactic acid for fractionation of hemp fibers," *Fuel*, 2024, doi: 10.3390/bioengineering11090935.
- S. S. Teh, S. K. Loh, and S. H. Mah, "Development of choline-based deep eutectic solvents for efficient concentrating of hemicelluloses in oil palm empty fruit bunches," *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 36, pp. 1619–1625, 2019, doi: 10.1007/s11814-019-0348-1.
- S. Thi and K. M. Lee, "Comparison of deep eutectic solvents (DES) on pretreatment of oil palm empty fruit bunch (OPEFB)," *Bioresour. Technol.*, 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2019.03.065.
- S. Yuliatun, Z. Attaya, and K. Febrianto, "Optimasi Proses Bleaching Selulosa Ampas Tebu dengan Menggunakan Metode Respon Permukaan," *Indones. Sugar Res. J.*, vol. 4, pp. 43–55, Jul. 2024, doi: 10.54256/isrj.v4i1.125.
- T. Suopajarvi, P. Ricci, V. Karvonen, G. Ottolina, and H. Liimatainen, "Acidic and alkaline deep eutectic solvents in delignification and nanofibrillation of corn stalk, wheat straw, and rapeseed stem residues," *Ind. Crops Prod.*, vol. 145, p. 111956, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111956>.
- V. Jančíková and M. Jablonsky, "Exploiting Deep Eutectic Solvent-like Mixtures for Fractionation Biomass, and the Mechanism Removal of Lignin: A Review," *Sustainability*, vol. 16, p. 504, Jan. 2024, doi: 10.3390/su16020504.
- W. Li et al., "Fractionation and characterization of lignin streams from unique high-lignin content endocarp feedstocks," *Biotechnol. Biofuels*, 2018, doi: 10.1186/s13068-018-1305-7.
- W. Smith, L. Wendt, I. Bonner, and J. Murphy, "Effects of Storage Moisture Content on Corn Stover Biomass Stability, Composition, and Conversion Efficacy," *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 8, 2020, doi: 10.3389/fbioe.2020.00716.
- Y. Chen and T. Mu, "Revisiting greenness of ionic liquids and deep eutectic solvents," *Green Chem. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 174–186, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gce.2021.01.004>.
- Y. Liu, L. Gao, L. Chen, W. Zhou, C. Wang, and L. Ma, "Exploring carbohydrate extraction from biomass using deep eutectic solvents: Factors and mechanisms," *iScience*, 2023, doi: 10.1016/j.isci.2023.107671.
- Y. Ma, Z. Liu, L. Lei, S. Hu, and Y. Hou, "Mechanism insights for the roles of hydrogen bonds on ChCl:LA DES," *Ind. Crops Prod.*, 2024, doi: 10.1016/j.indcrop.2024.119911.
- Y. Prasetyaningsih, K. Yuni, A. Teguh, and H. Muslikhin, "Optimization of cellulose yield from oil palm trunks with deep eutectic solvents using response surface methodology," *Green Process. Synth.*, 2025, doi: 10.1515/gps-2024-0252.
- Y. T. Tan, G. C. Ngoh, and A. S. M. Chua, "Evaluation of fractionation and delignification efficiencies of deep eutectic solvents on oil palm empty fruit bunch," *Ind. Crops Prod.*, 2018, doi: 10.1016/j.indcrop.2018.06.091.
- Z. Guo, Q. Zhang, T. You, X. Zhang, F. Xu, and Y. Wu, "Short-time deep eutectic solvent pretreatment for enhanced enzymatic saccharification and lignin valorization," *Green Chem.*, vol. 21, no. 11, pp. 3099–3108, 2019, doi: 10.1039/C9GC00704K.
- Z. Zhao, X. Chen, M. F. Ali, A. A. Abdeltawab, S. M. Yakout, and G. Yu, "Pretreatment of wheat straw using basic ethanalamine-based deep eutectic solvents for improving enzymatic hydrolysis," *Bioresour. Technol.*, vol. 263, pp. 325–333, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.016>.