

Optimasi dan Sintesis Selulosa Dialdehid Berbasis Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit

Optimization and Synthesis of Dialdehyde Cellulose from Empty Fruit Bunch

Elvri Melliatty Sitinjak*¹, Indra Masmur², Hardy Shuwanto³, Sari Farah Dina⁴, Poltak Evencus Hutajulu⁵, Gimelliya Saragih², Leo Frengki Sihalo⁶, Immanuel Siahaan², Fadhila Natania Damanik², dan Rahel Argana Doloksaribu²

¹Departemen Teknik Kimia, Politeknik Teknologi Kimia Industri, Jl. Medan Tenggara No. VII, Medan 20228, Indonesia

²Departemen Kimia, Universitas Sumatera Utara, Jl. Bioteknologi No.1, Medan 20155, Indonesia

³Departemen Teknik Industri, Universitas Prima Indonesia, Jl. Sampul No.3, Medan 20118, Indonesia

⁴Departemen Teknik Mekanika, Politeknik Teknologi Kimia Industri, Jl. Medan Tenggara No. VII, Medan 20228, Indonesia

⁵Departemen Agribisnis Kelapa Sawit, Politeknik Teknologi Kimia Industri, Jl. Medan Tenggara No. VII, Medan 20228, Indonesia

⁶PT. Perkebunan Nusantara IV Regional I, Jl. Sei Batanghari No. 2, Medan 20122, Indonesia

*Email: elvrimelliatty@ptki.ac.id

Article history:

Diterima : 30 April 2025
Direvisi : 30 Mei 2025
Disetujui : 3 Juni 2025
Mulai online : 27 September 2025

E-ISSN: 2337-4888

How to cite:

Elvri Melliatty Sitinjak, Indra Masmur, Hardy Shuwanto, Sari Farah Dina, Poltak Evencus Hutajulu, Gimelliya Saragih, Leo Frengki Sihalo, Immanuel Siahaan, Fadhila Natania Damanik, dan Rahel Argana Doloksaribu. (2025). Optimasi dan Sintesis Selulosa Dialdehid Berbasis Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit. Jurnal Teknik Kimia USU, 14(2), 30-37.

ABSTRAK

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan salah satu limbah biomassa yang paling bermasalah di Indonesia. Hal ini karena jumlahnya yang masif, pengelolaan nya yang belum efisien dan optimal dari segi pemanfaatannya, sehingga menimbulkan dampak lingkungan, ekonomi, dan teknis. Studi ini mengkonversi kandungan selulosa pada TKKS menjadi selulosa dialdehid (SDA) yang dapat diaplikasikan sebagai agen kekuatan basah. Optimasi reaksi oksidasi selulosa TKKS menjadi SDA dilakukan dengan oksidator natrium periodat (NaIO_4) dengan variasi waktu reaksi 3, 6, dan 9 jam. SDA yang disintesis kemudian dianalisis secara kualitatif dengan uji Fehling dan kelarutan serta analisis gugus fungsi dengan FTIR dan morfologi dengan SEM. SDA-6 merupakan sampel yang paling optimum dengan derajat oksidasi mencapai 82,1% dan jumlah karbonil sebesar 52.8%. Hasil analisis FTIR menunjukkan bahwa terdapatnya gugus karbonil pada semua sampel SDA yang mana merupakan hasil oksidasi gugus fungsi alkohol pada selulosa. SDA-6 memiliki puncak serapan gugus karbonil (C=O) yang paling besar pada bilangan gelombang 1748 cm^{-1} .

Kata kunci: tandan kosong kelapa sawit; oksidasi; selulosa; aldehid; karbonil

ABSTRACT

Empty Fruit Bunches of Oil Palm (EFB) represent one of the most problematic biomass wastes in Indonesia due to their massive volume, inefficient management, and underutilization of their chemical potential, leading to significant environmental, economic, and technical impacts. The degradation or processing of such large-scale waste generally requires a long period of time. This study focuses on converting the cellulose content in EFB into dialdehyde cellulose (DAC), which can be applied as a wet strength agent. The aim is to reduce EFB waste by isolating cellulose from EFB biomass and subsequently converting it into DAC, which can be utilized as a wet strength additive in paper or tissue products. The oxidation of EFB cellulose into DAC was optimized using sodium periodate (NaIO_4) as the oxidizing agent, with varying reaction times of 3, 6, and 9 hours. The synthesized DAC was qualitatively analyzed using the



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International <https://doi.org/10.32734/jtk.v14i2.20686>

Fehling's test and solubility observations, followed by functional group identification via FTIR and morphological characterization using SEM. Among the samples, DAC-6 exhibited the most optimal characteristics, with a degree of oxidation reaching 82.1% and a carbonyl content of 52.8%. FTIR analysis confirmed the presence of carbonyl functional groups in all DAC samples, indicating successful oxidation of hydroxyl groups in cellulose. DAC-6 showed the most prominent carbonyl absorption peak at a wavenumber of 1748 cm⁻¹.

Keyword: empty fruit bunch; oxidation; cellulose; aldehyde; carbonyl

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara penghasil kelapa sawit terbesar di dunia dengan perkebunan kelapa sawit tersebar di seluruh wilayah Indonesia. Sebagai contoh, luas perkebunan kelapa sawit di Sumatera Utara mencapai 490.160 pada tahun 2022[1]. Pada tahun 2020 luas perkebunan kelapa sawit di Sumatera Utara seluas 441.399,52 Ha dengan produksi 7.199.750 ton[2]. Proses pengolahan minyak kelapa sawit akan menghasilkan limbah padat, cair, dan gas[3]. Pengolahan 1 ton tandan buah segar (TBS) kelapa sawit akan menghasilkan limbah berupa TKKS sebanyak 23% atau 230 kg, limbah cangkang (*shell*) sebanyak 6,5% atau 65 kg, lumpur sawit 4% atau 40 kg, serabut (*fiber*) 13% atau 130 kg serta limbah cair sebanyak 50%[4]. Seiring dengan peningkatan produksi minyak kelapa sawit, limbah TKKS juga terus meningkat. Sejauh ini, TKKS umumnya dimanfaatkan menjadi pupuk di area perkebunan kelapa sawit karena mengandung unsur hara (nitrogen, fosfor, dan kalium) yang diperlukan tanaman, tetapi TKKS ini harus terlebih dahulu difermentasi dan memerlukan waktu selama 24 - 40 hari sebelum bisa digunakan sebagai pupuk[5]. Waktu fermentasi TKKS yang cukup lama ini akan menyebabkan penumpukan TKKS baik di pabrik kelapa sawit maupun area perkebunan. Untuk itu, banyak pelaku industri kelapa sawit lebih memilih untuk membakar TKKS tersebut atau pun diletakkan pada lubang-lubang jalanan menuju area perkebunan[6]. TKKS sebagian besar masih belum dimanfaatkan secara optimal, padahal mengandung sekitar 40 - 50% selulosa yang berpotensi sebagai bahan baku kimia ramah lingkungan. Sehingga TKKS yang termasuk limbah lignoselulosa yang kaya akan selulosa sangat berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku terbarukan dalam berbagai aplikasi kimia dan material.

Selulosa merupakan polimer alami yang dapat dimodifikasi secara kimia menjadi berbagai turunan bernilai tambah tinggi. Salah satu jalur modifikasi yang menarik adalah oksidasi selulosa menjadi aldehid, yang kemudian dapat dikondensasi dengan senyawa amina primer untuk membentuk basa *Schiff*. Senyawa basa *Schiff* telah diketahui memiliki berbagai aplikasi fungsional, termasuk sebagai agen *wet strength agent* (WSA) dalam industri kertas[7]. Agen ini penting untuk meningkatkan ketahanan mekanik kertas dalam kondisi basah, yang secara konvensional masih banyak menggunakan senyawa berbasis formaldehid yang bersifat toksik. Selulosa aldehid adalah turunan selulosa yang dihasilkan melalui proses oksidasi selektif melalui konversi gugus hidroksil primer pada unit glukosa menjadi gugus aldehid. Senyawa ini memiliki reaktivitas kimia yang tinggi, terutama dalam membentuk ikatan kovalen dengan senyawa lain seperti amina melalui reaksi pembentukan basa *Schiff*. Selulosa aldehid banyak dimanfaatkan dalam aplikasi industri karena sifatnya tersebut, seperti bahan penguat kekuatan basah pada kertas, serta sebagai bahan dasar dalam pembuatan material komposit dan hidrogel berperforma tinggi.

Beberapa penelitian yang berkaitan dengan pemanfaatan selulosa TKKS masih dilakukan sampai pada saat ini. Rahayu dan tim (2021) melakukan konversi biomassa TKKS menjadi *bio-char* dan *bio-oil* melalui proses pirolisis[8]. Pirolisis dilakukan pada berbagai suhu yaitu 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, dan 550°C. Hasilnya menunjukkan bahwa pirolisis yang dilakukan pada suhu rendah akan menghasilkan *bio-char* dan pada suhu tinggi akan menghasilkan *bio-oil*. Jumlah *bio-char* yang paling optimum diperoleh pada suhu 350°C yaitu sebesar 36,92%, sedangkan jumlah *bio-oil* yang paling optimum diperoleh pada suhu 550°C yaitu sebesar 46,60%. Pada tahun 2019, Yiin *et. al.* membuat kertas berbasis TKKS dengan metode hijau delignifikasi[9]. Delignifikasi dilakukan dengan menggunakan L-asam malat dan asam malat dari kaktus. Hasilnya menunjukkan bahwa TKKS yang di-delignifikasi menggunakan asam malat dari kaktus menghasilkan bilangan kappa yang paling rendah yaitu 69,84 sehingga sangat berpotensi untuk dijadikan kertas. Ulfah *et. al.* pada tahun 2024 melakukan reaksi oksidasi nano-selulosa dari TKKS[10]. Reaksi oksidasi dilakukan menggunakan sistem TEMPO/NaClO/NaBr dengan variasi konsentrasi NaClO dan katalisator NaBr. Tingkat keberhasilan reaksi oksidasi ditentukan berdasarkan jumlah gugus fungsi karboksilat pada permukaan nano-selulosa melalui titrasi konduktometri. Jumlah gugus fungsi karboksilat yang paling optimum ditemukan pada sampel yang menggunakan 20 mmol/g NaClO yaitu sebesar 1.600 mmol/g.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan optimasi waktu reaksi oksidasi selulosa TKKS menjadi SDA. Keterbaruan dan signifikansi dari penelitian ini adalah melakukan modifikasi selulosa TKKS menjadi selulosa dialdehid menggunakan oksidator NaIO_4 yang berpotensi sebagai WSA alami. Analisis dan karakterisasi yang dilakukan pada penelitian ini meliputi penentuan derajat oksidasi, jumlah karbonil, analisis FTIR dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Dengan demikian, konversi selulosa dari TKKS menjadi SDA dapat menawarkan solusi ganda yaitu, pemanfaatan limbah biomassa dan pengembangan bahan aditif ramah lingkungan bagi industri kertas.

2. Metode

2.1 Bahan dan Peralatan

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah serbuk TKKS ukuran 100 mesh dari PT. Perkebunan Nusantara III, asam nitrat (HNO_3 68%, Merck), natrium hidroksida (NaOH pellet, Merck), natrium sulfit (Na_2SO_3 serbuk, Merck), natrium hipoklorit (NaOCl 12%, Merck), hidrogen peroksida (H_2O_2 35%, Merck), natrium periodat (NaIO_4 serbuk, Merck), dan asam klorida (HCl 37%, Merck) serta larutan Fehling A dan Fehling B. Peralatan yang digunakan adalah saringan stainless ukuran 100 mesh dan peralatan *glassware* laboratorium.

2.2 Isolasi Selulosa dari TKKS

Pada 100 g serbuk TKKS ditambahkan 2,5 L HNO_3 3,5% dan diaduk. Campuran tersebut dipanaskan pada suhu 90 °C selama 2 jam sambil diaduk. Residu disaring dan dicuci hingga pH netral. Residu ditambahkan 1,3 L campuran larutan NaOH 2% dan Na_2SO_3 2% dan dipanaskan pada suhu 50 °C selama 1 jam sambil diaduk. Selanjutnya disaring dan dicuci sampai pH filtrat netral. Residu ditambahkan 600 mL larutan NaOCl 1,75% dan dipanaskan pada suhu 70 °C selama 30 menit, selanjutnya disaring dan dicuci sampai pH filtrat netral dan dilakukan *bleaching* dengan 600 mL H_2O_2 10% pada suhu 60 °C selama 15 menit. Hasil *bleaching* disaring dan dicuci dengan *aquadest* sampai pH netral. Selulosa yang diisolasi dikeringkan dalam oven pada suhu 60 °C kemudian disimpan dalam desikator, selanjutnya dikarakterisasi dengan analisis FT-IR, dan SEM.

2.3 Oksidasi Selulosa menjadi Selulosa Dialdehid (SDA)

Natrium periodat (NaIO_4) dilarutkan dalam *aquadest* dengan perbandingan berat 1:25 b/b pada suhu kamar, lalu ditambah selulosa (perbandingan berat NaIO_4 : Selulosa = 2,1:1 b/b), campuran kemudian distirrer selama 3, 6 dan 9 jam untuk tujuan optimasi kondisi reaksi oksidasi selulosa berbasis TKKS menjadi selulosa dialdehid yang kemudian dinamakan sebagai SDA-3, SDA-6, dan SDA-9. Hasil reaksi diendapkan dengan etanol, kemudian dikeringkan dalam desikator, selanjutnya diuji dengan pereaksi fehling A dan fehling B yang dilanjutkan dengan analisis FT-IR. Uji Fehling digunakan untuk mendeteksi keberadaan gula pereduksi, seperti glukosa, dalam suatu larutan. Prosedurnya dimulai dengan mencampurkan volume yang sama dari larutan Fehling A (larutan tembaga (II) sulfat) dan Fehling B (larutan kalium natrium tartrat dalam basa NaOH) untuk membentuk larutan uji biru cerah. Larutan sampel ditambahkan dan campuran dipanaskan dalam penangas air mendidih selama beberapa menit. Jika terdapat gula pereduksi, akan terbentuk endapan merah bata dari tembaga(I) oksida (Cu_2O), menandakan hasil positif.

2.4 Karakterisasi Kualitatif terhadap Selulosa Dialdehid (SDA)

2.4.1 Penentuan derajat oksidasi

Sebanyak 0,1 gr SDA dimasukkan ke dalam erlenmeyer 50 mL dan dilarutkan dengan 10 mL *aquadest*, kemudian ditambahkan dengan 10 mL NaOH 0,1 N, larutan dipanaskan hingga SDA terlarut sempurna yang ditandai dengan tidak ada nya serbuk SDA dalam erlenmeyer. Selanjutnya larutan yang telah mencapai suhu ruang ditambah 10 mL larutan HCl 0,15 N hingga pH larutan < 7. Larutan dipanaskan kembali selama 1 menit, lalu ditambahkan indikator PP 2 tetes. Dititrasi dengan larutan NaOH 0,1 N dan diamati perubahan warnanya. Derajat oksidasi dari sampel dapat ditentukan berdasarkan persamaan 1.

$$\%DO = \frac{(C_{\text{NaOH}} \times V_{\text{NaOH}}) - (C_{\text{HCl}} \times V_{\text{HCl}})}{\left(\frac{m}{162}\right)} \times 100\% \quad (1)$$

2.4.2 Penentuan Jumlah Karbonil

Sebanyak 1 g sampel ditambahkan 40 mL *aquadest* dalam *beaker glass* 250 mL. Kemudian dipanaskan diatas *waterbath* selama 20 menit, larutan didinginkan hingga suhu 40 °C. Lalu diatur pH larutan hingga pH 3 dengan menggunakan HCl 0,1 M. Setelah itu ditambahkan 25 mL larutan hidroksilamin, selanjutnya

dipanaskan kembali diatas *waterbath* pada suhu 40 °C selama 4 jam sambil distirrer. Kemudian dititrasi dengan HCl 0,1 M hingga pH 3. Persentase jumlah karbonil pada sampel SDA dapat ditentukan melalui persamaan 2.

$$\%CHO = \frac{0,028 \times M \times (V_b - V_s)}{\text{berat sampel (g)}} \times 100\% \quad (2)$$

Pengujian *uncertainty analysis* untuk penentuan derajat oksidasi dan jumlah karbonil dilakukan sebanyak tiga kali untuk setiap spesimen dan hasilnya dinyatakan sebagai rata-rata $\pm$ standar deviasi (SD).

2.5 Analisis FTIR

Analisis FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi dalam suatu sampel berdasarkan serapan terhadap spektrum inframerah. Prosedur analisis FTIR dengan metode KBr dimulai dengan menggerus sampel dengan KBr dan dicetak dalam bentuk lapisan tipis. KBr digunakan sebagai *background* pada analisis FTIR. Parameter yang digunakan pada analisis FTIR (Shimadzu, 8300) adalah resolusi 4 cm⁻¹, jumlah *scan* 64 dan bilangan gelombang dari 4000-800 cm⁻¹. Instrumen FTIR kemudian dijalankan untuk memancarkan sinar inframerah ke sampel; detektor akan merekam spektrum hasil interaksi antara sinar dan molekul sampel. Data spektrum yang diperoleh dianalisis untuk mengidentifikasi puncak-puncak serapan yang sesuai dengan vibrasi gugus fungsi spesifik dalam molekul sampel.

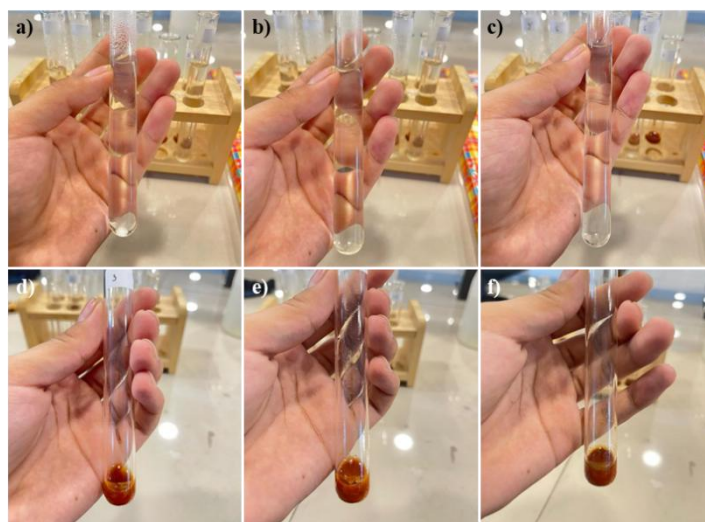
2.6 Analisis SEM

Analisis SEM digunakan untuk mengamati morfologi permukaan dan struktur mikro sampel dengan resolusi tinggi. Prosedurnya dimulai dengan preparasi sampel yang telah dipastikan kering. Sampel diletakkan pada *holder* SEM dan dilapisi dengan logam Pt melalui metode *sputtering* untuk meningkatkan konduktivitas sampel. Parameter analisis SEM (JEOL, F-6500) yang digunakan adalah percepatan tegangan 3 kV, dan *working distance* 3 mm. Sampel kemudian ditempatkan di ruang vakum mikroskop SEM. Setelah sistem mencapai kondisi vakum yang sesuai, elektron ditembakkan ke permukaan sampel, dan sinyal pantulan berupa elektron sekunder ditangkap oleh detektor untuk menghasilkan morfologi permukaan sampel.

3. Hasil

3.1 Uji Kelarutan dan Fehling

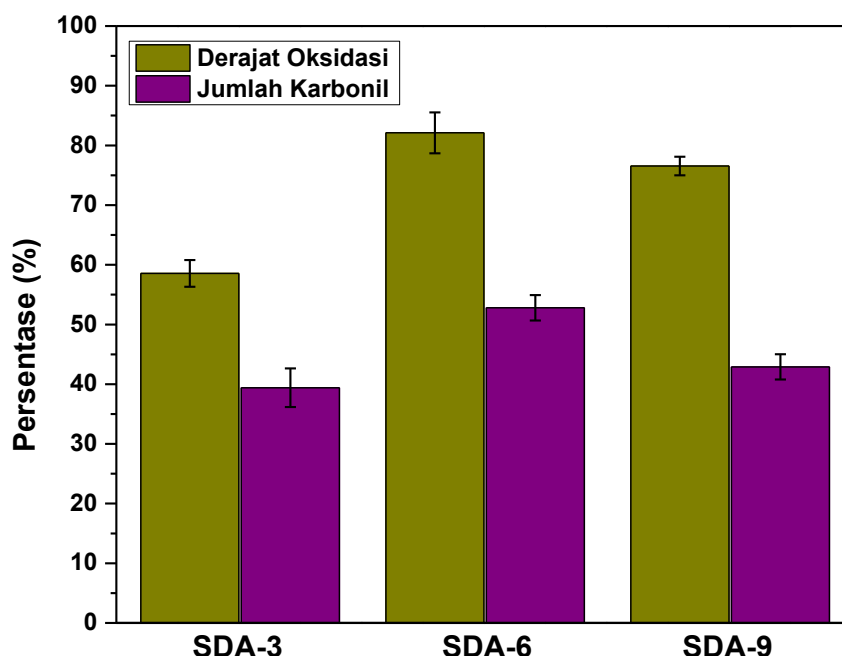
Pada penelitian ini, uji kelarutan dilakukan untuk mengetahui jumlah sampel SDA yang disintesis dengan berbagai variasi waktu untuk dapat terlarut dalam air, sedangkan uji Fehling dilakukan dengan tujuan mendeteksi senyawa dengan gugus fungsi aldehid. Gambar 1a-c menunjukkan bahwa sampel SDA-3 hanya dapat terlarut secara parsial yang ditandai dengan adanya endapan putih pada bagian bawah tabung reaksi (gambar 1a). Sedangkan, sampel SDA-6 dan SDA-9 dapat terlarut secara sempurna yang ditunjukkan dengan tidak adanya lagi endapan putih pada tabung (gambar 1b dan c). Selanjutnya, pada uji Fehling, semua sampel (SDA-3, SDA-6, dan SDA-9) mengalami perubahan warna menjadi warna merah bata yang disebabkan oleh reaksi reduksi Cu²⁺ menjadi Cu⁺ oksida pada larutan Fehling, menandakan bahwa semua sampel SDA memiliki gugus fungsi senyawa aldehid (-CHO)[11].



Gambar 1. (a-c) Uji kelarutan dan (d-f) uji Fehling terhadap sampel SDA yang disintesis pada berbagai variasi waktu (t= 3, 6, dan 9 jam)

3.2. Penentuan Derajat Oksidasi dan Jumlah Karbonil

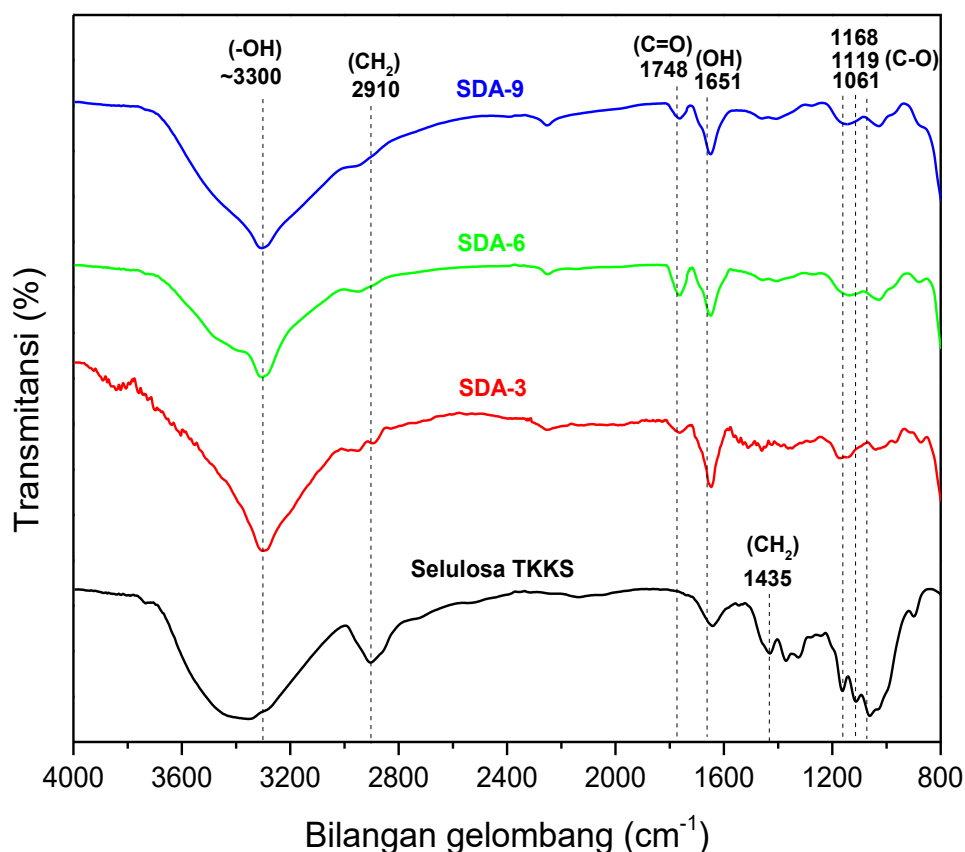
Penentuan derajat oksidasi dan jumlah karbonil dari sampel SDA dilakukan menentukan keberhasilan dan kondisi optimum untuk reaksi oksidasi selulosa menjadi SDA secara kualitatif (Gambar 2)[12]. Berdasarkan penentuan derajat oksidasi, ditemukan bahwa derajat oksidasi dari SDA-3, SDA-6, dan SDA-9 adalah 58,6%, 82,1%, dan 76,3%. Peningkatan derajat oksidasi dari SDA-3 ke SDA-6 menunjukkan bahwa semakin banyak gugus alkohol (-OH) yang teroksidasi menjadi aldehid (-CHO)[13], sedangkan penurunan derajat oksidasi dari SDA-6 ke SDA-9 menegaskan bahwa produk selulosa aldehid kurang stabil dan cenderung mengalami reversibel[14]. Hal ini berbanding lurus dengan hasil penentuan jumlah karbonil dimana jumlah karbonil pada SDA-6 bertambah dibandingkan dengan SDA-3 dan berkurang untuk SDA-9 dibandingkan dengan SDA-6[15]. Dari penentuan kualitatif ini, dapat disimpulkan bahwa waktu reaksi oksidasi dari selulosa menjadi SDA yang paling optimum adalah 6 jam (SDA-6).



Gambar 2. Derajat oksidasi dan jumlah karbonil pada sampel SDA-3, SDA-6, dan SDA-9.

3.3 Analisis Gugus Fungsi dengan Spektroskopi FTIR

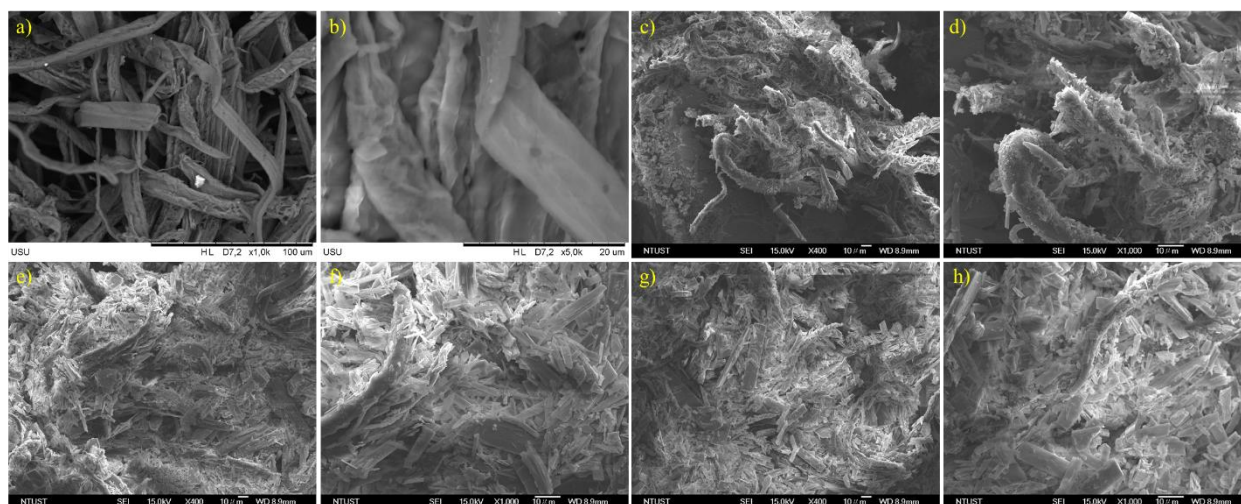
Gugus fungsi senyawa organik yang terdapat pada sampel ditentukan menggunakan spektroskopi FTIR. Gugus fungsi pada selulosa TKKS, SDA-3, SDA-6, dan SDA-9 ditentukan menggunakan spektroskopi FTIR seperti yang ditampilkan pada gambar 3. Puncak serapan gelombang IR yang terletak berkisar pada bilangan gelombang $\sim 3300\text{ cm}^{-1}$ merupakan gugus fungsi OH *stretching* yang dapat ditemukan pada semua sampel[16]. Hal ini sesuai dengan penelitian Simon *et. al.*, yang menyatakan bahwa puncak serapan tersebut merujuk pada vibrasi *stretching* hidroksil (-OH)[16]. Selanjutnya, puncak serapan pada bilangan gelombang 2910 cm^{-1} merujuk pada CH_2 *stretching* yang dapat ditemukan pada semua sampel. Hal ini sesuai dengan studi yang dilakukan oleh kelompok peneliti Tu[17]. Puncak serapan pada bilangan gelombang 1748 cm^{-1} merupakan gugus fungsi karbonil (C=O) yang terdapat pada sampel SDA-3, SDA-6, dan SDA-9. Hal ini menandakan keberhasilan oksidasi selulosa menjadi SDA yang juga didukung oleh penelitian terdahulu yang dilaporkan Chaiwarit *et. al.*[18]. Intensitas puncak serapan C=O semakin bertambah dari SDA-3 ke SDA-6 dan berkurang untuk SDA-9. Hal ini menandakan waktu reaksi 6 jam adalah waktu reaksi yang paling optimum untuk reaksi oksidasi selulosa menjadi SDA yang mana hal ini sejalan dengan hasil dari derajat oksidasi dan penentuan jumlah karbonil (gambar 2). Intensitas puncak serapan SDA-9 yang berkurang menunjukkan bahwa sampel SDA yang disintesis dengan waktu reaksi yang lebih lama dapat menyebabkan ketidakstabilan sehingga produk kembali tereduksi seiring dengan bertambahnya waktu reaksi[14]. Puncak serapan pada bilangan gelombang 1651 cm^{-1} dan 1435 cm^{-1} berturut-turut adalah gugus fungsi OH *bending* dan CH_2 *bending*. Hal ini sejalan dengan penelitian oleh Madivoli, *et. al.*[18]. Selain itu, gugus fungsi C-O juga dapat ditemukan pada bilangan gelombang 1168, 1119, dan 1061 cm^{-1} seperti yang dilaporkan pada studi Lucia *et. al.*[19].



Gambar 3. Spektra FTIR dari sampel SDA-3, SDA-6, dan SDA-9.

3.4 Analisis Morfologi dengan SEM

Untuk mempelajari lebih lengkap mengenai morfologi permukaan dari sampel yang diisolasi dan disintesis, analisis SEM dilakukan pada berbagai perbesaran. Pengukuran diameter sampel pada gambar mikroskopik SEM ditentukan dengan menggunakan *software ImageJ*. Pengukuran dengan *ImageJ* dilakukan dengan menentukan skala pada gambar SEM yang dilanjutkan dengan menarik garis lurus (*straight line*) pada area yang diukur. Gambar 4a dan 4b menunjukkan morfologi serat selulosa TKKS dengan diameter serat berkisar $\sim 9.4 \mu\text{m}$. Hal ini sejalan dengan yang dilaporkan oleh Zhao *et. al.* yang menyatakan selulosa memiliki bentuk seperti serat dengan diameter berkisar $\sim 10 \mu\text{m}$ [19]. Selanjutnya, selulosa yang dioksidasi dengan waktu reaksi 3 jam menunjukkan bahwa permukaan serat selulosa TKKS mengalami perubahan menjadi lebih kasar dan terdapat struktur seperti jarum seperti yang dapat dilihat pada gambar 4c dan d seperti penelitian terdahulu oleh Lin *et. al.*[20]. Dengan waktu reaksi oksidasi yang diperpanjang menjadi 6 jam, permukaan serat menjadi lebih kasar dibandingkan dengan SDA-3 dan terdapat struktur seperti batang pada permukaan serat tersebut (gambar 4e dan 4f). Pada sampel SDA-9, serat selulosa hampir sepenuhnya terlapisi oleh struktur batang tersebut seperti yang ditampilkan pada gambar 4g dan 4h. Hal ini membuktikan bahwa oksidator kuat NaIO_4 menyebabkan permukaan serat selulosa TKKS yang awalnya mulus menjadi semakin kasar dengan munculnya struktur jarum pada permukaan serat tersebut. Oksidasi dengan NaIO_4 menyebabkan pelemahan ikatan hidrogen baik secara inter- dan intra-molekuler, sehingga serat mengalami *swelling* dan delaminasi yang diikuti dengan fragmentasi menjadi bentuk yang lebih kecil yang dapat ditemukan sebagai struktur jarum dan batang pada sampel SDA-3, SDA-6, dan SDA-9.



Gambar 4 Morfologi dari sampel (a,b) selulosa TKKS, (c,d) SDA-3, (e,f) SDA-6, dan (g,h) SDA-9.

4. Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa kandungan selulosa yang terdapat dalam TKKS dapat dimanfaatkan melalui reaksi oksidasi menjadi SDA. Waktu reaksi oksidasi selulosa menjadi SDA menjadi salah satu faktor yang paling berpengaruh, sehingga dilakukan optimasi waktu reaksi oksidasi pada penelitian ini. Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa SDA-6 merupakan sampel SDA berbasis TKKS yang paling optimum. SDA-6 memiliki nilai derajat oksidasi yang paling tinggi yaitu 82,1% dan jumlah gugus fungsi karbonil yang paling tinggi sebesar 52,8%. Hasil analisa FTIR juga menegaskan bahwa SDA-6 memiliki puncak serapan karbonil (C=O) dengan transmitansi yang paling tinggi pada bilangan gelombang 1748 cm^{-1} , membuktikan oksidasi yang lebih baik dibandingkan dengan SDA-3 dan SDA-9. Keterbatasan pada penelitian ini adalah semua sampel SDA sangat mudah teroksidasi atau tidak stabil jika disimpan dengan cara tidak tepat. Hal ini sangat mempengaruhi hasil karakterisasi dari semua sampel SDA yang disintesis. Saran untuk pengembangan penelitian ini adalah menggunakan *jacketed-reactor* dengan pengontrol suhu yang stabil sehingga dihasilkan produk yang konsisten. Penyimpanan sampel ditempatkan pada tempat yang tidak lembab dan terhindar dari cahaya, sehingga sampel stabil pada saat karakterisasi. Aplikasi dari penelitian ini diharapkan dapat diterapkan sebagai WSA alami yang mana dapat menggantikan WSA sintetik yang kurang ramah lingkungan dan bergantung pada pasar impor.

5. Ucapan Terima Kasih

Tim peneliti mengucapkan terima kasih kepada Hibah Grant Riset Sawit 2024 dari BPDPKS atas pendanaan riset ini dengan nomor kontrak PRJ-04.1/DPKS/DIT.IV/2025. Ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada Politeknik Teknologi Kimia Industri (PTKI) Medan, Universitas Sumatera Utara (USU) dan Universitas Prima Indonesia atas fasilitas dan dukungan untuk kelancaran penelitian ini.

6. Konflik Kepentingan

Semua penulis tidak memiliki konflik kepentingan (*conflict of interest*) pada publikasi artikel ini.

Daftar Pustaka

- [1] N. Aswan *et al.*, “Analisis regresi linier dalam estimasi produktivitas kelapa sawit,” *Journal of Social Science Research*, vol. 4, pp. 10264–10276, 2024.
- [2] T. Ningsih, M. Wahyuni, “Analisa usaha tani kelapa sawit perkebunan rakyat di Desa Laut Tador Kecamatan Laut Tador Kabupaten Batubara,” *JASc (Journal of Agribusiness Sciences)*, vol. 6, no. 1, Oct. 2022, doi: 10.30596/jasc.v6i1.11710
- [3] A. N. Fitria, V. S. Gunawan, and M. Mardiah, “Study of the utilization of palm oil industry liquid waste,” *Konversi*, vol. 10, no. 1, Apr. 2021, doi: 10.20527/k.v10i1.10146.
- [4] A. M. Fuadi and H. Pranoto, “Pemanfaatan limbah tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan baku pembuatan glukosa,” vol. 3, no. 1, pp. 1–5, 2016.

- [5] F. E. Gunawan, H. Homma, S. S. Brodjonegoro, A. B. B. Hudin, And A. B. Zainuddin, “Mechanical properties of oil palm empty fruit bunch fiber,” *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, vol. 3, no. 7, pp. 943–951, 2009, doi: 10.1299/jmmp.3.943.
- [6] E. Derman, R. Abdulla, H. Marbawi, M. K. Sabullah, J. A. Gansau, and P. Ravindra, “Simultaneous saccharification and fermentation of empty fruit bunches of palm for bioethanol production using a microbial consortium of *S. cerevisiae* and *T. harzianum*,” *Fermentation*, vol. 8, no. 7, Jul. 2022, doi: 10.3390/fermentation8070295.
- [7] I. Francolini, L. Galantini, F. Rea, C. Di Cosimo, and P. Di Cosimo, “Polymeric wet-strength agents in the paper industry: an overview of mechanisms and current challenges,” Jun. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/ijms24119268.
- [8] D. E. Rahayu, N. Karnaningroem, A. Altway, and A. Slamet, “Utilization of oil palm empty fruit bunches biomass through slow pyrolysis process,” Dec. 02, 2021, *IOP Publishing Ltd*. doi: 10.1088/1755-1315/913/1/012018.
- [9] C. L. Yiin *et al.*, “Recovery of cellulose fibers from oil palm empty fruit bunch for pulp and paper using green delignification approach,” *Bioresour Technol*, vol. 290, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2019.121797.
- [10] A. A. Ulfah, M. Hidayat, R. B. Cahyono, and T. Ariyanto, “The oxidation of nanocellulose from oil palm empty fruit bunch (OPEFB) by TEMPO/NaClO/NaBr,” *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, vol. 24, no. 3, pp. 328–341, Dec. 2024, doi: 10.22146/ajche.14058.
- [11] F. M. Scales, “The determination of reducing sugars: a volumetric method for determining cuprous oxide without removal from Fehling’s Solution,” *Journal of Biological Chemistry*, vol. 23, no. 1, pp. 81–87, 1915, doi: [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)87603-7](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)87603-7).
- [12] T. Chiba, M. Takazawa, and K. Fujimoto, “A simple method for estimating carbonyl content in peroxide-containing oils,” *J Am Oil Chem Soc*, vol. 66, no. 11, pp. 1588–1592, 1989, doi: 10.1007/BF02636182.
- [13] Z. Tang *et al.*, “TEMPO-Oxidized Cellulose with High Degree of Oxidation,” *Polymers (Basel)*, vol. 9, no. 9, Sep. 2017, doi: 10.3390/polym9090421.
- [14] P. R. Sharma and A. J. Varma, “Thermal stability of cellulose and their nanoparticles: effect of incremental increases in carboxyl and aldehyde groups,” *Carbohydr Polym*, vol. 114, pp. 339–343, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.032>.
- [15] F. Coppola and A. Modelli, “Oxidative degradation of non-recycled and recycled paper,” *Cellulose*, vol. 27, no. 15, pp. 8977–8987, 2020, doi: 10.1007/s10570-020-03395-0.
- [16] J. Simon *et al.*, “A fast method to measure the degree of oxidation of dialdehyde celluloses using multivariate calibration and infrared spectroscopy,” *Carbohydr Polym*, vol. 278, p. 118887, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118887>.
- [17] Q. Tu *et al.*, “Characteristics of dialdehyde cellulose nanofibrils derived from cotton linter fibers and wood fibers,” *Molecules*, vol. 29, no. 7, Apr. 2024, doi: 10.3390/molecules29071664.
- [18] T. Chaiwarit *et al.*, “Synthesis of carboxylate-dialdehyde cellulose to use as a component in composite thin films for an antibacterial material in wound dressing,” *ACS Omega*, vol. 9, no. 44, pp. 44825–44836, Nov. 2024, doi: 10.1021/acsomega.4c08298.
- [19] A. Lucia, H. W. G. van Herwijnen, J. T. Oberlerchner, T. Rosenau, and M. Beaumont, “Resource-saving production of dialdehyde cellulose: optimization of the process at high pulp consistency,” *ChemSusChem*, vol. 12, no. 20, pp. 4679–4684, Oct. 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/cssc.201901885>.
- [20] C. Lin *et al.*, “Preparation of highly hazy transparent cellulose film from dissolving pulp,” *Cellulose*, vol. 26, no. 6, pp. 4061–4069, 2019, doi: 10.1007/s10570-019-02367-3.