

OPTIMASI *BLEACHING* AMPAS TEBU PADA VARIASI KONSENTRASI HIDROGEN PEROKSIDA DAN SUHU

Optimization Of Sugar Bagass Bleaching by Variations of Hydrogen Peroxide Concentration and Temperature

Mega Wulandari, Deivy Andhika Permata*, Fitriani Kasim

Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Andalas

Email: deivyandhikapermata@ae.unand.ac.id

ABSTRAK

Ampas tebu merupakan limbah padat dari agroindustri yang mengandung selulosa tinggi dan berpotensi diolah menjadi pulp dan kertas. Adanya lignin menyebabkan kualitas pulp menjadi tidak baik, untuk itu perlu dilakukan delignifikasi dan *bleaching*. Penelitian ini bertujuan mengkaji konsentrasi H_2O_2 dan suhu *bleaching* yang optimal agar menghasilkan pulp dengan kualitas terbaik. Optimasi dilakukan menggunakan metode *Central Composite Design* (CCD) dalam pendekatan *Response Surface Methodology* (RSM) dengan faktor konsentrasi H_2O_2 (15–40%) dan suhu *bleaching* (80–100°C). Respon yang diamati antara lain kadar air, kadar abu, rendemen, selulosa, holoselulosa, hemiselulosa, lignin, bilangan Kappa, dan derajat putih. Kondisi optimum diperoleh pada konsentrasi H_2O_2 30,13% dan suhu *bleaching* 98,26°C, yang menghasilkan pulp dengan kadar lignin dan bilangan Kappa yang lebih rendah, sedangkan kadar selulosa dan derajat putih yang tinggi. Hasil analisis gugus fungsi menunjukan spektrum FTIR yang lebih sederhana setelah mengalami delignifikasi dan *bleaching*, karena berkurangnya struktur aromatik lignin pada pulp. Penelitian ini menunjukkan bahwa proses *bleaching* dapat menghasilkan pulp berkualitas tinggi dari limbah biomassa ampas tebu.

Kata kunci: Ampas Tebu; *Bleaching*; Hidrogen Peroksid; RSM

ABSTRACT

Sugarcane bagasse is an agro-industrial solid residue rich in cellulose and with high potential for pulp and paper production. However, its lignin content lowers pulp quality, making delignification and bleaching essential. This study aimed to optimize the concentration of hydrogen peroxide (H_2O_2) and bleaching temperature to enhance pulp quality. Optimization was conducted using a Central Composite Design (CCD) within the Response Surface Methodology (RSM) framework, with H_2O_2 concentration (15–40%) and bleaching temperature (80–100°C) as the variables of interest. The evaluated responses included moisture content, ash content, yield, cellulose, holocellulose, hemicellulose, lignin content, Kappa number, and whiteness. The optimum conditions were achieved at a H_2O_2 concentration of 30.13% and a bleaching temperature of 98.26°C, resulting in pulp with a lower lignin content and Kappa number, while maintaining high cellulose content and whiteness. The results of functional group analysis showed a simpler FTIR spectrum after delignification and bleaching, due to the reduction of the aromatic structure of lignin in the pulp. This study shows that the bleaching process can produce high-quality pulp from bagasse biomass waste.

Keywords: Bagasse; Bleaching; Hydrogen Peroxide; RSM

PENDAHULUAN

Pulp merupakan bahan baku terpenting dalam industri kertas dan produk turunannya, pulp diperoleh melalui pemrosesan serat kayu atau sumber serat lainnya. Bahan baku pulp dan kertas di Indonesia pada umumnya menggunakan kayu hutan. Eksploitasi hutan yang terus menerus menimbulkan banyak masalah terutama penggundulan hutan dan isu pemanasan global. Oleh karena itu untuk mengatasi ketersediaan kertas diperlukan bahan baku non-kayu seperti limbah biomassa. Beberapa keunggulan bahan kertas non-kayu, yaitu siklus pertumbuhan yang lebih cepat, mengandung lebih sedikit lignin, harga lebih murah, proses pulping yang lebih cepat, serta ramah lingkungan.

Salah satu limbah biomassa yang dapat digunakan sebagai pengganti bahan baku kertas adalah ampas tebu. Produksi gula tebu di Indonesia pada tahun 2023 mencapai 2,23 juta ton (BPS, 2024), dan

10% dari total produksi merupakan limbah dalam bentuk ampas tebu (Hidayati et al., 2016). Setengah dari limbah ampas tebu tersebut biasa digunakan untuk penghasil energi atau bahan bakar ketel pada proses produksi gula dan juga bahan bakar pabrik etanol. Namun setengah lainnya belum dimanfaatkan dan bahkan dapat mencemari lingkungan.

Pada ampas tebu mengandung 35,01% selulosa (Hidayati et al., 2016). Tingginya kandungan selulosa dan ketersediaan ampas tebu yang memadai menjadikan ampas tebu berpotensi untuk dikembangkan sebagai bahan baku pulp dan kertas. Keberadaan lignin yang berikatan kuat dengan selulosa dan hemiselulosa menjadi faktor penghalang untuk memanfaatkan selulosa lebih lanjut. Oleh karena itu dalam penyediaan selulosa perlu dilakukan proses delignifikasi (Permata et al., 2021; Putri et al., 2025) Delignifikasi secara fisik-kimia menggunakan gelombang mikro dan NaOH merupakan salah satu cara yang dapat digunakan (Permata, 2023). Namun dari proses ini masih menyisakan lignin dalam jumlah yang sedikit. Oleh karena itu dibutuhkan proses pemutihan (*bleaching*) yang bertujuan untuk membantu menguraikan kandungan lignin yang masih tersisa.

Proses *bleaching* merupakan langkah utama dalam industri pulp dan kertas untuk meningkatkan kecerahan, menghilangkan residu lignin, dan meningkatkan sifat optik dan pencetakan produk kertas (Sundaram, 2020). Metode *bleaching* terdiri dari dua pendekatan utama, yaitu metode *elemental chlorine free* (ECF) yang menggunakan senyawa berbasis klorin seperti klorin dioksida, dan metode *totally chlorine free* (TCF), yang menggunakan oksigen, ozon, dan peroksida untuk mengurangi dampak pelepasan organoklorin yang merusak lingkungan (Suess, 2010). Pada penelitian ini dilakukan *bleaching* menggunakan metode TCF dengan senyawa *bleaching agent* berupa hidrogen peroksida (H_2O_2), karena metode ini dianggap lebih ramah lingkungan. Disamping itu proses *bleaching* dengan menggunakan H_2O_2 memiliki beberapa keuntungan, seperti waktu pengerjaan yang lebih singkat, dan karakteristik pulp yang baik (Pereira et al., 2021). Pulp yang diputihkan menggunakan H_2O_2 memiliki ketahanan yang tinggi serta penurunan kekuatan serat yang kecil dibandingkan bahan kimia lain seperti ClO_2 (Fuadi & Sulistya, 2008). Proses *bleaching* dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain *bleaching agent*, waktu reaksi, suhu, dan pH. Semakin tinggi konsentrasi H_2O_2 , maka akan semakin cerah selulosa yang dihasilkan (Lestari & Sari, 2016), namun *bleaching* yang dilakukan dengan konsentrasi *bleaching agent* yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penurunan rendemen (Onggo & Astuti, 2005). Perlakuan *bleaching agent* serat batang sagu dengan konsentrasi H_2O_2 20% menghasilkan rendemen sebesar 19,02% dan derajat putih sebesar $72,68 \pm 0,01\%$ (Sunardi et al., 2021).

Suhu yang tinggi akan mempercepat laju reaksi dan proses *bleaching* (Fitriana et al., 2020). Selulosa eceng gondok yang diputihkan pada suhu 60 °C memiliki derajat putih sebesar 62,45% (Lestari & Sari, 2016) dan mahkota nanas yang di *bleaching* pada suhu 80 °C memiliki derajat putih sebesar 82,40% (Riama et al., 2012). Kenaikan suhu selama proses pemutihan diikuti dengan peningkatan derajat putih sampel. Oleh karena itu pada penelitian ini dilakukan optimasi konsentrasi hidrogen peroksida dan suhu proses *bleaching* agar didapatkan pulp dengan kadar selulosa yang tinggi dengan karakteristik sesuai standar. Diharapkan penelitian ini bermanfaat bagi dunia industri terutama dalam menetapkan proses *bleaching* yang lebih efisiensi dengan kadar selulosa tinggi. Penelitian ini bertujuan mengkaji konsentrasi H_2O_2 dan suhu *bleaching* yang optimal agar menghasilkan pulp dengan kualitas terbaik. Penelitian ini salah satu bentuk *biorefinery* yang memanfaatkan limbah sebagai bahan baku bagi industri dan juga mendukung kebijakan sirkular ekonomi.

METODOLOGI PENELITIAN

A. Alat dan Bahan

Alat yang dipakai pada penelitian ini diantaranya alat gelas, *hotplate*, neraca analitik, oven, *microwave* (Merek SHARP, 220 v ~ 50 Hz), pH meter, dan *HunterLab Color Flex EZ*. Bahan yang digunakan pada penelitian ini diantaranya ampas tebu, natrium hidroksida, hidrogen peroksida, natrium hipoklorit, asam asetat, asam nitrat, Na_2SO_3 , H_2SO_4 , KI, $KMnO_4$, dan akuades.

B. Rancangan Penelitian

Penelitian menggunakan *Central Composite Design* (CCD) dalam *Response Surface Methodology*, melalui tahapan perancangan, analisis model respon (ANOVA), optimasi dan verifikasi. Faktor yang digunakan pada penelitian, yaitu konsentrasi H_2O_2 (X_1), dan suhu *bleaching* (X_2). Masing-

masing faktor memiliki 3 level yaitu -1, 0, +1 (Tabel 1). Kombinasi faktor yang digunakan terlihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Penentuan Variabel Bebas dan Taraf yang Digunakan untuk Rancangan Percobaan CCD pada Pembuatan Pulp dari Ampas Tebu

Variable bebas	Unit	Taraf			
		- α	-1	0	+1
Konsentrasi H ₂ O ₂ (%)	X ₁	15,859	20	30	40
Suhu bleaching (°C)	X ₂	75,859	80	90	100

Tabel 2. Kombinasi Perlakuan yang Dilakukan Menggunakan Rancangan Percobaan CCD pada Pembuatan Pulp dari Ampas Tebu

Run	Faktor 1: Konsentrasi H ₂ O ₂	Faktor 2: Suhu Bleaching
1	30	104,142
2	20	100
3	30	90
4	40	80
5	15,8579	90
6	30	90
7	44,1421	90
8	30	90
9	30	75,8579
10	40	100
11	20	80

C. Prosedur Penelitian

Delignifikasi (Permata, 2023)

Ampas tebu yang sudah dikeringkan dikecilkan ukuran 0,5- 2 cm. Kemudian dicampurkan dengan 20 g ampas tebu dengan 200 mL larutan NaOH 0,5 M, lalu dimasukkan campuran tersebut ke dalam erlenmeyer. Erlenmeyer ditutup rapat dengan kapas dan aluminium foil untuk mencegah terjadinya penguapan. Setelah itu dimasukkan sampel ke dalam *microwave* pada kondisi *medium-high* selama 25 menit, dilakukan pendinginan selama 30 menit. Terhadap serat dilakukan pembilasan menggunakan air bersih yang mengalir hingga mencapai pH netral, kemudian disaring.

Bleaching (Robbani, 2022)

Bleaching serat hasil delignifikasi dengan 200 mL larutan H₂O₂ menggunakan variasi konsentrasi dan suhu sesuai perlakuan selama 90 menit. Kemudian pulp yang terbentuk disaring dan dicuci menggunakan akuades hingga pH netral. Pulp yang dihasilkan kemudian dianalisis kadar air, kadar abu, rendemen, selulosa, holoselulosa, hemiselulosa, lignin, bilangan Kappa, dan derajat putih, serta analisis gugus fungsi pada kondisi optimum.

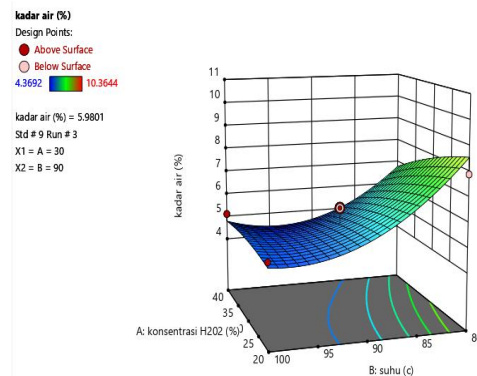
HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kadar air

Kadar air pulp ampas tebu berkisar antara 4,37% hingga 10,36%. Model *quadratic* dipilih karena memiliki nilai PRESS paling rendah yaitu 14,86, dengan model signifikan ($p = 0,0260$) dan R^2 sebesar 0,9096. Ini menunjukkan bahwa 90,96% kadar air dipengaruhi oleh konsentrasi H₂O₂ dan suhu selama proses *bleaching*, sementara 9,04% dipengaruhi oleh faktor-faktor lain di luar perlakuan yang diamati dalam penelitian ini. Nilai *Lack of Fit* dengan $p = 0,4753$, sehingga $p > 0,05$ ketepatan model tidak signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa model eksperimen *quadratic* signifikan secara statistik, dengan standar deviasi sebesar 0,7410 menunjukkan akurasi model yang baik. Persamaan matematis untuk respon kadar air pulp ampas tebu, yaitu:

$Y = 122.68132 - (0.328019 X_1) - (2.34249 X_2) + (0.004231 X_1 X_2) - (0.001654 X_1^2) + (0.011520 X_2^2)$.
Dimana, Y= Respon kadar air, X_1 = Konsentrasi H_2O_2 , X_2 = Suhu *bleaching*.

Peningkatan konsentrasi H_2O_2 dan suhu *bleaching* cenderung menurunkan kadar air. Interaksi antara konsentrasi H_2O_2 dan suhu menunjukkan penurunan kadar air yang lebih signifikan pada suhu $100^\circ C$ dengan konsentrasi H_2O_2 yang lebih tinggi. Grafik *3D-Surface* Respon kadar air pada variasi Konsentrasi H_2O_2 dan Suhu *Bleaching* dapat dilihat pada Gambar 1. Grafik *3D-Surface* menunjukkan bahwa kadar air terendah dicapai pada konsentrasi H_2O_2 tinggi dan suhu tinggi. Peningkatan suhu dan H_2O_2 efektif dalam menurunkan kadar air pulp (Luo et al., 2023).



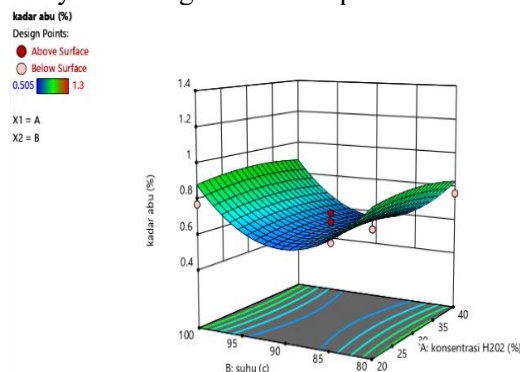
Gambar 1. Grafik *3D-Surface* Respon Kadar Air pada Variasi Konsentrasi H_2O_2 dan Suhu *Bleaching*

B. Kadar abu

Kadar abu berkisar antara 0,51% hingga 1,30%. Model *quadratic* dipilih karena memiliki nilai PRESS paling rendah yaitu 0,5368, dengan model yang signifikan ($p = 0,0067$) dan R^2 sebesar 0,8654, menunjukkan 86,54% kadar abu dipengaruhi oleh konsentrasi H_2O_2 dan suhu selama proses *bleaching*, sementara 13,46% dipengaruhi oleh faktor-faktor lain di luar perlakuan yang diamati dalam penelitian ini. Nilai *Lack of Fit* dengan $p = 0,2728$ sehingga $p > 0,05$ ketepatan model tidak signifikan. Model eksperimen *quadratic* signifikan secara statistik, dengan standar deviasi sebesar 0,1318. Persamaan matematis untuk respon kadar abu pulp ampas tebu sebagai berikut:

$Y = 23.76612 + (0.011503 X_1) - (0.520396 X_2) + (0.000075 X_1 X_2) - (0.000310 X_1^2) + (0.002890 X_2^2)$.
Dimana Y= Respon kadar abu, X_1 = Konsentrasi H_2O_2 , X_2 = Suhu *bleaching*.

Peningkatan konsentrasi H_2O_2 dan suhu *bleaching* cenderung menurunkan kadar abu. Interaksi menunjukkan kadar abu relatif stabil dengan sedikit peningkatan pada konsentrasi H_2O_2 yang lebih tinggi, namun tetap dalam rentang yang sempit. Grafik *3D-Surface* respon kadar abu pada Variasi konsentrasi H_2O_2 dan Suhu *Bleaching* dapat dilihat pada Gambar 2. Grafik *3D-Surface* menunjukkan bahwa kadar abu terendah diperoleh pada konsentrasi H_2O_2 tinggi dan suhu tinggi. Penurunan kadar abu ini disebabkan oleh pelarutan senyawa anorganik selama proses *bleaching* (Luo et al., 2023).



Gambar 2. Grafik *3D-Surface* Respon Kadar Abu pada Variasi Konsentrasi H_2O_2 dan Suhu *Bleaching*

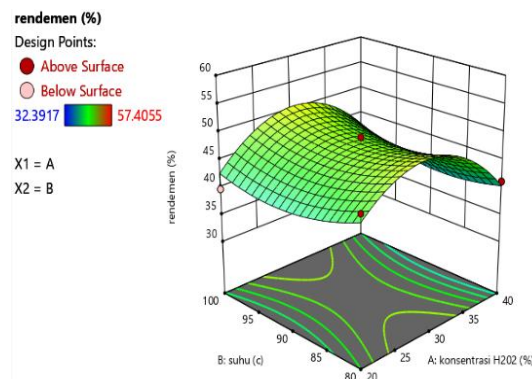
C. Rendemen

Berdasarkan hasil analisis, model terbaik yang disarankan oleh program untuk respon rendemen pulp ampas tebu adalah model *quadratic*. Model ini dipilih karena memiliki nilai PRESS (*Prediction Error Sum of Squares*) terendah yaitu 348,49 menunjukkan bahwa model tersebut memiliki kesalahan prediksi paling kecil dibandingkan model lain. Nilai probabilitas (p-value) untuk model ini adalah 0,0027 ($p < 0,05$) yang berarti model signifikan secara statistik berdasarkan uji ANOVA. Persamaan matematis untuk respon rendemen pulp ampas tebu, yaitu:

$$Y = 222.00672 + (3.55790 X_1) - (5.03206 X_2) + (0.011555 X_1 X_2) - (0.078306 X_1^2) + (0.026087 X_2^2).$$

Dimana Y= Respon rendemen, X_1 = Konsentrasi H_2O_2 , X_2 = Suhu *bleaching*.

Sementara itu, nilai *Lack of Fit* sebesar 0,0846 ($p > 0,05$) menunjukkan bahwa ketidaksesuaian model tidak signifikan, sehingga model cocok digunakan untuk memprediksi rendemen. Koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9089 menunjukkan bahwa 90,89% variasi rendemen dipengaruhi oleh variasi suhu dan konsentrasi H_2O_2 dalam proses *bleaching*, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain. Nilai standar deviasi sebesar 3,19 juga menunjukkan bahwa penyebaran data dari nilai tengah cukup kecil, mengindikasikan tingkat ketepatan dan akurasi model yang baik. Grafik *3D-Surface* respon rendemen pada variasi konsentrasi H_2O_2 dan suhu *bleaching* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik *3D-Surface* Respon Rendemen pada Variasi Konsentrasi H_2O_2 dan Suhu *Bleaching*

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Mamaye et al. (2022), yang menyatakan bahwa konsentrasi H_2O_2 dan suhu sangat mempengaruhi rendemen pulp dari ampas tebu. Peningkatan konsentrasi H_2O_2 hingga titik optimum dapat meningkatkan rendemen, tetapi jika konsentrasi terlalu tinggi, akan terjadi penurunan akibat terlarutnya komponen penting seperti hemiselulosa dan sebagian selulosa karena sifat oksidatif H_2O_2 .

D. Kadar Selulosa

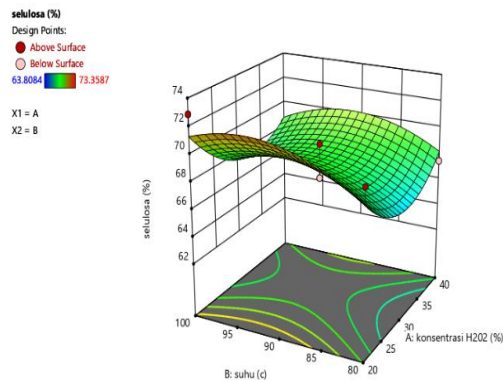
Kadar selulosa pulp ampas tebu berkisar antara 63,81% hingga 73,36%. Model *quadratic* dipilih untuk memprediksi respons ini, dengan nilai R^2 0,8706 yang menunjukkan bahwa 87,06% kadar selulosa dipengaruhi oleh konsentrasi H_2O_2 dan suhu selama proses *bleaching*. Sementara 12,94% dipengaruhi oleh faktor-faktor lain di luar perlakuan yang diamati. Uji ANOVA menunjukkan model ini signifikan ($p < 0,05$) dan nilai *Lack of Fit* dengan $p = 0,3591$, sehingga $p > 0,05$ ketepatan model tidak signifikan. Hal ini berarti bahwa model eksperimen *quadratic* signifikan secara statistik. Persamaan matematis untuk respon selulosa pulp ampas tebu dapat dilihat pada persamaan di bawah ini. Standar deviasi sebesar 1,59 menunjukkan akurasi model yang tinggi.

$$Y = 64.12022 - (1.21477 X_1) + (3.30479 X_2) - (0.004322 X_1 X_2) + (0.025352 X_1^2) - (0.017226 X_2^2).$$

Dimana Y= Respon kadar selulosa, X_1 = Konsentrasi H_2O_2 , X_2 = Suhu *bleaching*.

Peningkatan konsentrasi H_2O_2 dan suhu *bleaching* secara umum meningkatkan kadar selulosa, karena proses ini secara selektif menghilangkan lignin dan hemiselulosa, meninggalkan selulosa yang lebih murni. Namun, interaksi antara konsentrasi H_2O_2 dan suhu menunjukkan pola non-linear, di mana

kadar selulosa sedikit menurun pada konsentrasi H_2O_2 sedang sebelum meningkat kembali pada konsentrasi yang lebih tinggi (terutama pada suhu tinggi). Grafik *3D-Surface* respon kadar selulosa pada variasi konsentrasi H_2O_2 dan suhu *bleaching* dapat dilihat pada Gambar 4. Grafik *3D-Surface* menunjukkan bahwa kadar selulosa tertinggi dicapai pada konsentrasi H_2O_2 44,1421% dan suhu 90°C. Secara selektif *bleaching* dapat menghilangkan lignin lebih cepat daripada selulosa, sehingga meningkatkan persentase kadar selulosa dalam pulp (Kopra et al., 2021; Wu et al., 2019).



Gambar 4. Grafik *3D-Surface* Respon Kadar Selulosa pada Variasi Konsentrasi H_2O_2 dan Suhu *Bleaching*

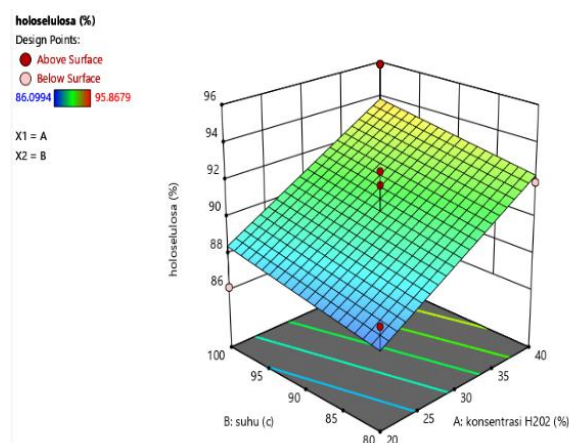
E. Kadar Holoselulosa

Berdasarkan hasil penelitian, kandungan holoselulosa pada pulp ampas tebu menunjukkan rentang nilai 86,0994% hingga 95,8679%. Model terbaik yang digunakan untuk meramalkan respon ini adalah model *linear*, dengan nilai R^2 sebesar 0,7119 yang menunjukkan bahwa 71,19% variasi holoselulosa dipengaruhi oleh konsentrasi H_2O_2 dan suhu *bleaching*. Sedangkan 28,81% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar perlakuan. Uji ANOVA memberikan nilai signifikansi $p = 0,0069$ ($p < 0,05$), sehingga model ini signifikan. Uji *Lack of Fit* menunjukkan nilai $p = 0,8286$ yang berarti model sesuai dengan data aktual. Selain itu, nilai standar deviasi sebesar 1,80 menunjukkan bahwa data cukup akurat dan model memiliki keakuratan yang baik. Persamaan matematis untuk respon kadar holoselulosa pulp ampas tebu, sebagai berikut:

$$Y = 75.11966 + (0.272219 X_1) + (0.078449 X_2).$$

Dimana Y = Respon kadar holoselulosa, X_1 = Konsentrasi H_2O_2 , X_2 = Suhu *bleaching*.

Grafik *3D-Surface* respon kadar holoselulosa pada variasi konsentrasi H_2O_2 dan suhu *Bleaching* dapat dilihat pada Gambar 5. Hasil grafik *3D surface* menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi H_2O_2 dan suhu *bleaching* secara bersamaan menyebabkan peningkatan kandungan holoselulosa.



Gambar 5. Grafik *3D-Surface* Respon Kadar Holoselulosa pada Variasi Konsentrasi H_2O_2 dan Suhu *Bleaching*

Kombinasi suhu tinggi (100°C) dan konsentrasi H₂O₂ tinggi mempercepat degradasi lignin dan senyawa pengotor lainnya, sehingga menghasilkan fraksi holoselulosa yang lebih murni. Hal ini diperkuat dengan garis merah pada grafik yang lebih curam dibanding suhu 80°C, menandakan bahwa suhu tinggi memberikan pengaruh lebih besar terhadap peningkatan holoselulosa.

Penelitian ini sejalan dengan penelitian Mamaye et al. (2022), yang melaporkan bahwa peningkatan suhu dan konsentrasi H₂O₂ dalam proses *bleaching* efektif dalam menurunkan kandungan lignin dan meningkatkan fraksi selulosa dan holoselulosa, menjadikan pulp lebih murni dan berkualitas tinggi.

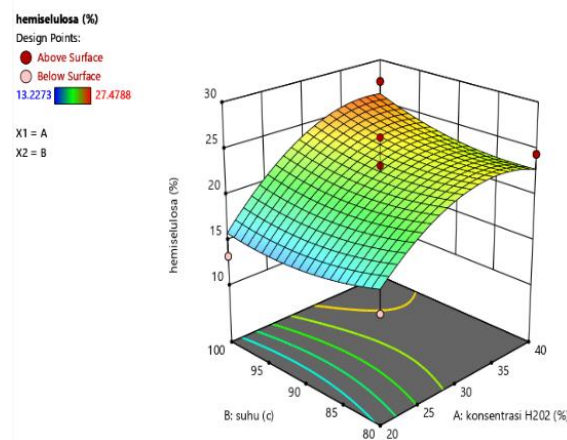
F. Hemiselulosa

Kadar hemiselulosa berkisar antara 13,23% hingga 27,48%. Model *quadratic* dipilih karena memiliki nilai PRESS paling rendah yaitu 326,11. Nilai R² sebesar 0,7564 yang menunjukkan 75,64% kadar hemiselulosa dipengaruhi oleh konsentrasi H₂O₂ dan suhu selama proses *bleaching*. Nilai *Lack of Fit* dengan p = 0,6260 sehingga ketepatan model tidak signifikan atau dengan kata lain model eksperimen *quadratic* signifikan secara statistik dengan standar deviasi sebesar 3,70. Persamaan matematis untuk respon hemiselulosa pulp ampas tebu, yaitu:

$$Y = 98.80580 + (1.25038 X_1) - (2.28262 X_2) + (0.011601 X_1 X_2) - (0.031701 X_1^2) + (0.010978 X_2^2).$$

Dimana Y= Respon kadar hemiselulosa, X₁= Konsentrasi H₂O₂, X₂ = Suhu *bleaching*.

Interaksi antara konsentrasi H₂O₂ dan suhu menunjukkan peningkatan kadar hemiselulosa seiring bertambahnya konsentrasi H₂O₂, terutama pada suhu tinggi (100°C). Grafik *3D-Surface* respon kadar hemiselulosa pada variasi konsentrasi H₂O₂ dan Suhu *Bleaching* dapat dilihat pada Gambar 6. Grafik *3D-Surface* menunjukkan bahwa kadar hemiselulosa cenderung meningkat dengan konsentrasi H₂O₂ dan suhu yang lebih tinggi.



Gambar 6. Grafik *3D-Surface* Respon Kadar Hemiselulosa pada Variasi Konsentrasi H₂O₂ dan Suhu *Bleaching*

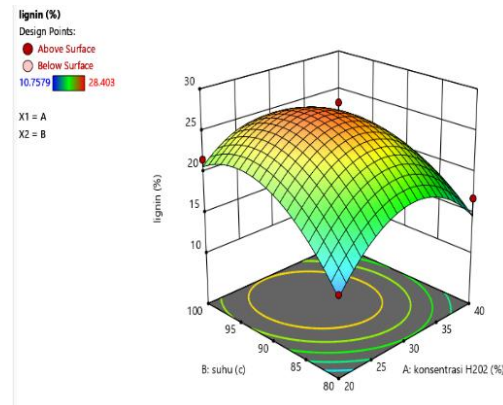
G. Kadar Lignin

Kadar lignin berkisar antara 10,76% hingga 28,40%. Model *quadratic* dipilih karena memiliki nilai PRESS paling rendah yaitu 196,85. Model ini signifikan secara statistik dengan p = 0,0042 dan R² sebesar 0,9064, yang berarti 90,64% kadar lignin dipengaruhi oleh konsentrasi H₂O₂ dan suhu selama proses *bleaching*. Sementara 9,36% dipengaruhi oleh faktor-faktor lain di luar perlakuan yang diamati. Nilai *Lack of Fit* dengan p = 0,2923 sehingga p > 0,05 ketepatan model tidak signifikan/model eksperimen *quadratic* signifikan secara statistik. Standar deviasi sebesar 2,54 mengindikasikan akurasi model yang baik. Persamaan matematis untuk respon lignin pulp ampas tebu, sebagai berikut:

$$Y = 474.26309 + (5.06681 X_1) + (9.24255 X_2) - (0.017546 X_1 X_2) + (0.059453 X_1^2) - (0.047173 X_2^2).$$

Dimana Y= Respon kadar lignin, X₁= Konsentrasi H₂O₂, X₂ = Suhu *bleaching*.

Peningkatan konsentrasi H_2O_2 dan suhu *bleaching* secara signifikan menurunkan kadar lignin. Interaksi antara kedua faktor ini menunjukkan bahwa penurunan lignin lebih tajam pada suhu tinggi ($100^\circ C$) dan konsentrasi H_2O_2 yang lebih tinggi (35-40%). Grafik *3D-Surface* respon kadar lignin pada variasi konsentrasi H_2O_2 dan suhu *bleaching* dapat dilihat pada Gambar 7. Gambar 7 menunjukkan bahwa kadar lignin terendah diperoleh pada konsentrasi H_2O_2 sebesar 44,1421% dan suhu $90^\circ C$. Hal ini konsisten dengan tujuan optimasi yaitu untuk meminimalkan lignin. Penelitian Suárez-Forero et al. (2019) juga menemukan bahwa interaksi suhu dan konsentrasi H_2O_2 sangat memengaruhi efektivitas *bleaching* dalam menurunkan lignin.



Gambar 7. Grafik *3D-Surface* Respon Kadar Lignin pada Variasi Konsentrasi H_2O_2 dan Suhu *Bleaching*

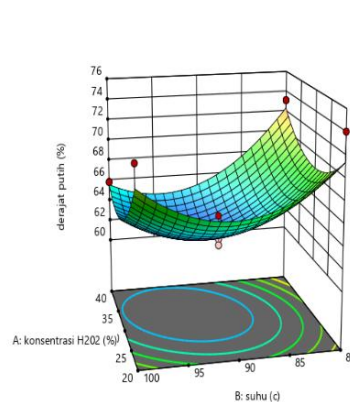
H. Derajat putih

Derajat putih pulp berkisar antara 61,82% - 74,06%. Model *quadratic* Model *quadratic* dipilih karena memiliki nilai PRESS paling rendah yaitu 181,32. Model ini signifikan dengan $p = 0,0198$ dan $R^2 = 0,8442$. Nilai R^2 ini menunjukkan bahwa 84,42% derajat putih dipengaruhi oleh konsentrasi H_2O_2 dan suhu selama proses *bleaching*, sementara 15,58% dipengaruhi oleh faktor-faktor lain. Nilai *Lack of Fit* diperoleh dengan $p = 0,2198$, sehingga ketepatan model tidak signifikan. Ini mengindikasikan bahwa model eksperimen *quadratic* signifikan secara statistik. Standar deviasi sebesar 2,39 menunjukkan akurasi model yang baik. Persamaan matematis untuk respon derajat putih pulp ampas tebu, yaitu:

$$Y = 386.92388 - (0.686697 X_1) (6.74199 X_2) - (0.014038 X_1 X_2) + (0.030913 X_1^2) + (0.038702 X_2^2).$$

Dimana Y= Respon derajat putih, X_1 = Konsentrasi H_2O_2 , X_2 = Suhu *bleaching*.

Interaksi antara konsentrasi H_2O_2 dan suhu menunjukkan bahwa derajat putih tertinggi dicapai pada suhu $80^\circ C$ dan konsentrasi H_2O_2 sekitar 40%, bukan pada suhu tertinggi. Grafik *3D-Surface* respon derajat putih pada variasi konsentrasi H_2O_2 dan suhu *bleaching* dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik *3D-Surface* Respon Derajat Putih pada Variasi Konsentrasi H_2O_2 dan Suhu *Bleaching*

Grafik *3D-Surface* menunjukkan bahwa *bleaching* pada konsentrasi dan suhu yang terlalu tinggi dapat merusak selulosa dan menurunkan kecerahan. Kondisi optimal *bleaching* tidak selalu pada konsentrasi dan suhu tertinggi (Seo et al., 2015).

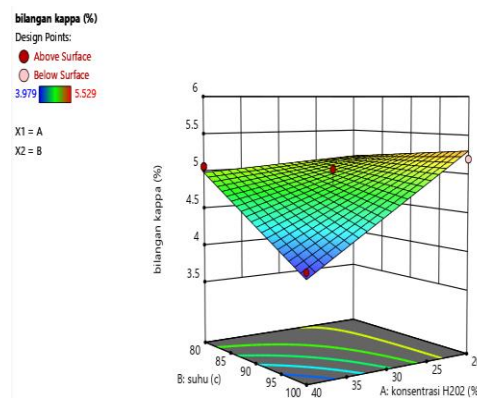
I. Bilangan Kappa

Bilangan Kappa pulp berkisar antara 3,98% hingga 5,53%. Model *2FI* dipilih karena memiliki nilai PRESS paling rendah yaitu 0,9631 dengan model yang signifikan ($p = 0,0552$) dan $R^2 = 0,7916$. Sebesar 79,16% bilangan Kappa dipengaruhi oleh konsentrasi H_2O_2 dan suhu selama proses *bleaching*, sementara 20,84% dipengaruhi oleh faktor-faktor lain di luar perlakuan yang diamati. Nilai *Lack of Fit* dengan $p = 0,8533$ ($p > 0,05$) sehingga ketepatan model tidak signifikan. Hal ini berarti bahwa model eksperimen *2FI* signifikan secara statistik. Standar deviasi sebesar 0,2747 menunjukkan akurasi model yang baik. Persamaan matematis untuk respon bilangan kappa pulp ampas tebu, sebagai berikut:

$$Y = 0.498949 + (0.245233 X_1) + (0.072069 X_2) - (0.003155 X_1 X_2).$$

Dimana Y= Respon bilangan Kappa, X_1 = Konsentrasi H_2O_2 , X_2 = Suhu *bleaching*.

Peningkatan konsentrasi H_2O_2 dan suhu *bleaching* secara signifikan menurunkan bilangan Kappa. Interaksi menunjukkan penurunan paling signifikan pada suhu 100°C dan konsentrasi H_2O_2 tinggi (40%). Grafik *3D-Surface* respon bilangan Kappa pada variasi konsentrasi H_2O_2 dan suhu *bleaching* dapat dilihat pada Gambar 9. Grafik *3D-Surface* menunjukkan bahwa bilangan Kappa terendah diperoleh pada konsentrasi H_2O_2 40% dan suhu 100°C, yang merupakan kondisi optimal untuk menghilangkan lignin. Mamaye et al. (2022) melaporkan bahwa peningkatan konsentrasi H_2O_2 dan suhu proses dapat menurunkan bilangan Kappa yang menandakan terjadi efisiensi *bleaching*.



Gambar 9. Grafik *3D-Surface* Respon Bilangan Kappa pada Variasi Konsentrasi H_2O_2 dan Suhu *Bleaching*

J. Optimasi respon permukaan

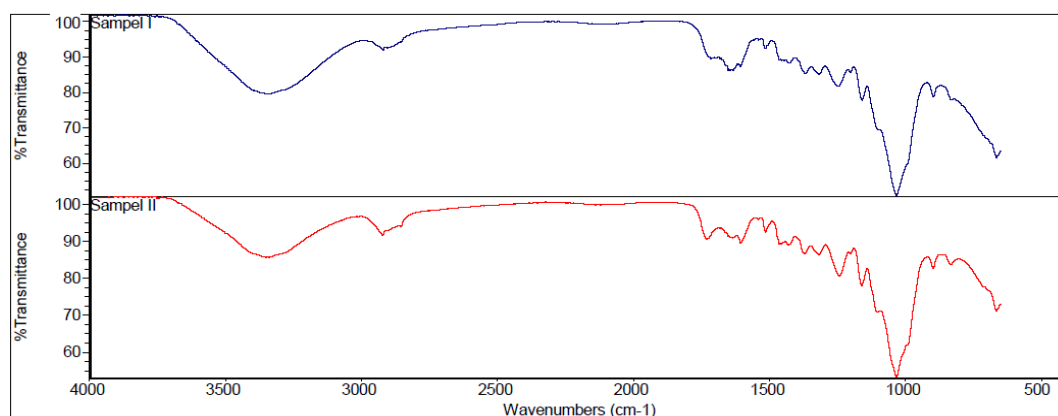
Optimasi bertujuan untuk memaksimalkan respon kualitas pulp yang meliputi rendemen, holoselulosa, selulosa, dan derajat putih. Pada waktu yang sama dilakukan juga upaya untuk meminimalkan kadar lignin, bilangan Kappa, dan kadar air, yang merupakan indikator efisiensi *bleaching* dan karakteristik fisik pulp. Selain itu, kadar hemiselulosa dan kadar abu ditetapkan sebagai respons *in range* untuk menjaga integritas struktural dan komposisi anorganik pulp dalam batas yang dapat diterima.

Pendekatan optimasi multirespon, yang dikenal sebagai metode *desirability*, diterapkan untuk mengintegrasikan seluruh kriteria respons. Hasil optimasi menunjukkan nilai *desirability* sebesar 0,614, mengindikasikan tingkat kesesuaian yang tinggi antara kondisi prediktif dan tujuan yang ditetapkan. Guna memvalidasi akurasi model optimasi, serangkaian eksperimen verifikasi laboratorium telah dilakukan. Data verifikasi mengkonfirmasi bahwa kondisi optimal yang diidentifikasi secara komputasi mampu menghasilkan karakteristik pulp yang konsisten dengan target kualitas yang diinginkan. Hal ini menegaskan efektivitas proses *bleaching* yang dioptimasi dalam menghasilkan pulp berkualitas tinggi dari biomassa ampas tebu.

Kondisi optimum diperoleh pada konsentrasi H_2O_2 30,13% dan suhu *bleaching* 98,26°C, yang menghasilkan pulp dengan rendemen 51,4055%, kadar air 5,1123%, kadar abu 0,7%, kadar holoselulosa 92,21%, selulosa 65,36%, kadar hemiselulosa 24,85%, kadar lignin 21,97%, bilangan Kappa 4,8303%, dan derajat putih 64,8199%. Nilai keseluruhan respon (rendemen, kadar holoselulosa, kadar selulosa, kadar lignin, kadar hemiselulosa, kadar air, kadar abu, nilai derajat putih dan bilangan Kappa) telah memenuhi 95% *confidence interval* (CI) dan 95% *prediction interval* (PI) yang telah diprediksi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model memberikan prediksi yang baik untuk keseluruhan respon yang diteliti pada desain RSM.

H. Gugus Fungsi

Analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) merupakan salah satu metode penting untuk memahami perubahan struktur kimia pada material lignoselulosa, termasuk ampas tebu. Pengujian FTIR memungkinkan identifikasi gugus fungsi utama, perubahan intensitas pita serapan, serta penentuan tingkat kemurnian selulosa setelah perlakuan *pretreatment* seperti delignifikasi dan *bleaching*. Adapun sampel yang dianalisis yaitu sampel 1 (ampas tebu/bahan baku) dan Sampel 2 (ampas tebu hasil *bleaching* pada kondisi optimum) yang dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Gambar Spektrum Sampel 1 (ampas tebu/bahan baku), Sampel 2 (Ampas Tebu Hasil *Bleaching*)

Pada Gambar 10, Spektrum FTIR sampel I yang mewakili ampas tebu menunjukkan karakter khas biomassa lignoselulosa. Pita lebar pada rentang $3300\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$ mengindikasikan vibrasi regangan O–H dari gugus hidroksil selulosa dan hemiselulosa, sesuai dengan temuan Fauziyah et al. (2022) yang menyatakan bahwa ampas tebu mentah memiliki dominasi selulosa dengan intensitas kuat pada pita O–H. Selain itu, puncak pada sekitar 2900 cm^{-1} menunjukkan regangan C–H alifatik dari gugus metil dan metilen pada polisakarida, sedangkan pita $1630\text{--}1650\text{ cm}^{-1}$ mengindikasikan vibrasi C=O atau bending O–H dari air terikat, yang umum ditemukan pada lignoselulosa tanpa *pretreatment*. Pita karakteristik lignin muncul pada daerah $1500\text{--}1520\text{ cm}^{-1}$, memperlihatkan keberadaan struktur aromatik C=C yang menandakan bahwa lignin masih mendominasi struktur kimia sampel ampas tebu. Pita $1240\text{--}1260\text{ cm}^{-1}$ dan $1030\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ semakin menegaskan keberadaan gugus C–O–C dan C–O khas selulosa dan hemiselulosa, sejalan dengan laporan analisis FTIR bagasse oleh (Fauziyah et al., 2022).

Pada Sampel 2, yakni ampas tebu hasil perlakuan *bleaching* pada kondisi optimum, terlihat perubahan signifikan pada spektrum FTIR yang menunjukkan keberhasilan proses delignifikasi dan *bleaching*. Hilang atau melemahnya pita aromatik pada $1500\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$ mengindikasikan penurunan lignin secara substansial. Hasil ini konsisten dengan penelitian Yusuf et al. (2024), yang menunjukkan bahwa delignifikasi pada ampas tebu menghasilkan spektrum FTIR yang lebih sederhana karena hilangnya struktur aromatik lignin. Selain itu, berkurangnya intensitas pita $1240\text{--}1260\text{ cm}^{-1}$ dan $1050\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ pada Sampel 2 mengindikasikan penurunan hemiselulosa akibat *bleaching*. Hasil ini mendukung penelitian Kustiyah et al. (2023), yang menyatakan bahwa proses pemurnian serat lignoselulosa termasuk *bleaching* akan menghilangkan lignin dan hemiselulosa sehingga hanya menyisakan struktur selulosa yang lebih murni.

Secara keseluruhan, struktur kimia Sampel 2 menunjukkan dominasi pita O–H dan C–H yang lebih bersih tanpa gangguan pita lignin dan hemiselulosa, mengindikasikan bahwa proses *bleaching* berhasil meningkatkan kemurnian selulosa. Hal ini memperkuat bukti bahwa perlakuan kimia seperti *bleaching* dapat berperan efektif dalam memodifikasi lignoselulosa. Perbandingan FTIR antara kedua sampel jelas memperlihatkan bahwa *bleaching* menyebabkan berkurangnya komponen aromatik dan amorf, menghasilkan material selulosa dengan tingkat kemurnian lebih tinggi.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diperoleh kondisi optimum diperoleh pada konsentrasi H₂O₂ 30,13% dan suhu *bleaching* 98,26°C, yang menghasilkan pulp dengan rendemen 51,4055%, kadar air 5,1123%, kadar abu 0,7%, kadar holoselulosa 92,21%, selulosa 65,36%, kadar hemiselulosa 24,85%, kadar lignin 21,97%, bilangan Kappa 4,8303%, dan derajat putih 64,8199%. Hasil analisis gugus fungsi menunjukkan spektrum FTIR yang lebih sederhana setelah mengalami deligifikasi dan *bleaching*, karena berkurangnya struktur aromatik lignin pada pulp. Penelitian ini menunjukkan bahwa proses *bleaching* dapat menghasilkan pulp berkualitas tinggi dari limbah biomassa ampas tebu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Universitas Andalas yang telah mendanai penelitian ini sesuai dengan kontrak penelitian skripsi sarjana (PSS) Batch I Nomor 206/UN16.19/PT.01.03/PSS/2025 tahun anggaran 2025.

DAFTAR PUSTAKA

- BPS. (2024). *Statistik Tebu Indonesia 2023*.
- Fauziyah, B., Yuwono, M., Isnaeni, Nahdhia, N., & Sholihah, F. (2022). Isolation and Characterization of Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) Bagasse Cellulose Hydrolyzed with Acid Variation. *Tropical Journal of Natural Product Research*, 6(6), 856–862. <https://doi.org/10.26538/tjnpr/v6i6.4>
- Fitriana, N. E., Suwanto, A., Jatmiko, T. H., Mursiti, S., & Prasetyo, D. J. (2020). Cellulose extraction from sugar palm (*Arenga pinnata*) fibre by alkaline and peroxide treatments. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 462(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/462/1/012053>
- Fuadi, A. M., & Sulistya, H. (2008). Pemutihan Pulp dengan Hidrogen Peroksida. *Reaktor*, 12(2), 123–128.
- Hidayati, A. S. D. S. N., Kurniawan, S., Restu, N. W., & Ismuyanto, B. (2016). Potential of Sugar Cane As an Alternative Raw Material for Making Activated Carbons. *Natural B Journal of Health and Environmental Sciences*, 3(4), 311–317. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21776/ub.natural-b.2016.003.04.8>
- Kopra, R., Vanhatalo, K., Päärnä, S., Pappinen, A., & Dahl, O. (2021). Bleaching microcrystalline cellulose using hydrogen peroxide, peracetic acid, and ozone. *BioResources*, 16(4), 7991–8005. <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.7991-8005>
- Kustiyah, E., Novitasari, D., Wardani, L. A., & Hasaya, H. (2023). *Jurnal Teknologi Lingkungan Pemanfaatan Limbah Ampas Tebu untuk Pembuatan Plastik Biodegradable dengan Metode Melt Intercalation Utilization of Sugarcane Bagasses for Making Biodegradable Plastics with the Melt Intercalation Method*. 24(2), 300–306.
- Lestari, R. S. D., & Sari, D. K. (2016). Pengaruh Konsentrasi H₂O₂ terhadap Tingkat Kecerahan Pulp dengan Bahan Baku Eceng Gondok Melalui Proses Organosolv. *Jurnal Integrasi Proses*, 6(1), 45–49. <http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jip>
- Luo, M., Wang, C., Wang, C., Xie, C., Hang, F., Li, K., & Shi, C. (2023). Effect of alkaline hydrogen peroxide assisted with two modification methods on the physicochemical, structural and functional properties of bagasse insoluble dietary fiber. *Frontiers in Nutrition*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1110706>

- Mamaye, M., Kiflie, Z., Feleke, S., & Yimam, A. (2022). Evaluation and Optimization of Kraft Delignification and Single Stage Hydrogen Peroxide Bleaching for Ethiopian Sugarcane Bagasse. *Journal of Natural Fibers*, 19(4), 1226–1238. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1764447>
- Onggo, H., & Astuti, J. T. (2005). The Effect of Sodium Hydroxide and Hydrogen Peroxide on the Yield and Color of Pulp from Pineapple Leaf Fiber. *J. Ilmu & TeknRORJL .D\X 7URSLV*, 3(1), 37–43.
- Pereira, P. H. F., Ornaghi, H. L., Arantes, V., & Cioffi, M. O. H. (2021). Effect of chemical treatment of pineapple crown fiber in the production, chemical composition, crystalline structure, thermal stability and thermal degradation kinetic properties of cellulosic materials. *Carbohydrate Research*, 499, 108227. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2020.108227>
- Permata, D. A. (2023). *Physical-Chemical Preparation Process of Palm Oil Empty Fruit Bunches Cellulose Using Microwaves* (S00202312387).
- Permata, D. A., Kasim, A., Asben, A., & Yusniwati. (2021). Delignification of lignocellulosic biomass. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 12(02), 462–469. <https://wjarr.com/sites/default/files/WJARR-2021-0618.pdf>
- Putri, A., Permata, D. A., & Fiana, R. M. (2025). Optimization of Bioethanol Production from Oil Palm Empty Fruit Bunches (OPEFB) Cellulose with Variations in Yeast Amount and Fermentation Duration. *Jurnal Teknologi Pertanian Andalas*, 29(1).
- Riama, G., Veranika, A., & Prasetyowati. (2012). Pengaruh H₂O₂, Konsentrasi NaOH dan Waktu terhadap Derajat Putih Pulp dari Mahkota Nanas. *Jurnal Teknik Kimia*, 18(3), 25–34.
- Robbani, S. (2022). *Rekayasa Proses Produksi Antimicrobial Pads Berbasis Selulosa dan Nanoselulosa*. Institut Pertanian Bogor.
- Seo, J.-H., Kim, H.-J., & Ahn, C.-D. (2015). Effect of Two-step Thermal Treatments on Peroxide Bleachability of Thermomechanical Pulp. *BioResources*, 10(4). <https://doi.org/10.15376/biores.10.4.7752-7762>
- Suárez-Forero, S. J., Candela-Soto, A. M., Henao-Martínez, J. A., & Bayona-Ayala, O. L. (2019). Evaluation of the performance of the pre-treatment with the hydrogen peroxide on sugar cane bagasse for removing lignin. *ITECKNE*, 16(1), 21–28. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v16i1.2158>
- Suess, H. U. (2010). *Pulp Bleaching Today*. DE GRUYTER. <https://doi.org/10.1515/9783110218244>
- Sunardi, Noviyanti, N., Istikowati, W. T., Nisa, K., & Anwar, M. (2021). Analisis komponen serat pelepah sagu (Metroxylon Sago) dan kajian morfologi selulosanya setelah oksidasi menggunakan amonium persulfat. *Jurnal Sains Dan Terapan Kimia*, 15(1), 48–63.
- Sundaram, P. S. R. (2020). Advances in pulp bleaching: Processes and environmental impact. *Journal of Pulp and Paper Science*, 46(2), 95–107.
- Wu, Y., Wu, J., Yang, F., Tang, C., & Huang, Q. (2019). Effect of H₂O₂ Bleaching Treatment on the Properties of Finished Transparent Wood. *Polymers*, 11(5), 776. <https://doi.org/10.3390/polym11050776>
- Yusuf, A. A. I. S., Abadi, S. I., & Sariwahyuni. (2024). Delignification of Lignocellulosic Content of Sugarcane Bagasse (*Saccharum officinarum*) with Variations in Size and Pretreatment Time. *Journal of Chemical Process Engineering*, 9(2), 90–98. <https://doi.org/10.33096/jcpe.v9i2.976>