

Analisis Tekno-Ekonomi Produksi Gula Reduksi dari Biomassa Ampas Tebu Melalui Hidrolisis Air Subkritis

Maktum Muharja^{1*}, Siska Nuri Fadilah¹, Nur Fadhilah², Rizki Fitria Darmayanti³, Arief Widjaja⁴
Achri Isnain Khamil¹

¹Program Studi Teknik Kimia Universitas Jember

Jl. Kalimantan Tegalboto No 37 Sumbersari Jember 68121 Jawa Timur

²Program Studi Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya

Jl. Raya Kampus ITS Sukolilo Surabaya 60111 Jawa Timur

³Program Studi Teknologi Industri Pertanian Universitas Muhammadiyah Jember

Gemuk Kerang Karangrejo Sumbersari Jember 68124 Jawa Timur

⁴Program Studi Teknik Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya

*maktum@unej.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v16i2.17243>

Abstrak

Hidrolisis air subkritis ampas tebu memerlukan energi dalam mengubah biomassa lignoselulosa menjadi gula yang siap difermentasi. Biomassa ampas tebu berpotensi dijadikan sebagai bahan baku produksi gula reduksi. Penelitian ini mengevaluasi efektivitas proses hidrolisis menggunakan oven dan autoklaf melalui analisa ekonomi dan energi. Variabel yang digunakan yaitu waktu hidrolisis 20 – 60 menit, suhu oven 110 - 170°C, dan suhu autoklaf 120 -130°C. Konsentrasi gula reduksi didapatkan dari analisa menggunakan metode DNS (dinitrosalicyclic acid). Hasil analisa menunjukkan waktu dan suhu berpengaruh signifikan terhadap hasil gula reduksi. Konsentrasi gula reduksi tertinggi dari hidrolisis air subkritis menggunakan oven sebesar 27,4 g/L pada kondisi operasi 170°C selama 60 menit dengan total biaya Rp 351.744 dan kebutuhan energi 480 W.h. Pada hidrolisis menggunakan autoklaf didapatkan sebesar 14,7 g/L pada suhu 125°C selama 40 menit dengan total biaya Rp 923.079 dan kebutuhan energi 1.936,67. Hidrolisis menggunakan oven lebih direkomendasikan daripada autoklaf karena ekonomis dan konsumsi energi lebih rendah.

Kata Kunci : air subkritis, tebu, gula reduksi, energi

Abstract

Subcritical water hydrolysis of bagasse requires energy to convert lignocellulosic biomass into fermentation-ready sugars. Bagasse biomass has the potential to be used as raw material for the production of reducing sugar. This study evaluates the effectiveness of the hydrolysis process using an oven and autoclave through economic and energy analysis. The variables used were hydrolysis time of 20-60 minutes, oven temperature of 110-170°C, and autoclave temperature of 120-130°C. Reduced sugar concentration was obtained from analysis using the DNS (dinitro salicylic acid) method. The results of the analysis show that time and temperature have a significant effect on the yield of reducing sugar. The highest reduced sugar concentration from subcritical water hydrolysis using an oven was 27.4 g/L at 170°C operating conditions for 60 minutes with a total cost of Rp 351,744 and energy requirement of 480 W.h. In hydrolysis using an autoclave, it was obtained at 14.7 g/L at 125°C for 40 minutes with a total cost of IDR 923,079 and energy requirements of 1,936.67. Hydrolysis using an oven is more recommended than autoclaving because it is economical and has lower energy consumption.

Key words : subcritical water, sugarcane, sugar reduction, energy

PENDAHULUAN

Pertumbuhan populasi manusia terjadi sangat cepat, sejalan dengan peningkatan permintaan energi secara signifikan (Isnain Khamil

et al., 2023; Khamil *et al.*, 2023; Muharja, Widjaja, *et al.*, 2023; Nanda & Berruti, 2021a, 2021b). Penggunaan bahan bakar fosil yang ekstensif menghasilkan emisi gas rumah kaca dalam jumlah besar, yang menyebabkan pencemaran lingkungan, pemanasan global dan perubahan iklim (Fawzy *et al.*, 2020). Untuk menjawab permasalahan lingkungan dan kebutuhan energi tersebut, sumber biomassa yang terdiri dari lignin

Article History:

Received: October, 29th 2022; **Accepted:** July, 14th 2023

Cite this as :

Muharja *et.al* 2023. Analisis Tekno-Ekonomi Produksi Gula Reduksi dari Biomassa Ampas Tebu Melalui Hidrolisis Air Subkritis. *Rekayasa*. Vol 16(2). 107-116.

dan selulosa atau disebut biomassa lignoselulosa dianggap sebagai sumber energi terbarukan (Sarker *et al.*, 2021). Biomassa lignoselulosa dipromosikan untuk energi melalui *biorefinery* (Djali *et al.*, 2021; Muharja *et al.*, 2017; Muharja *et al.*, 2019). Biomassa dengan kandungan lignoselulosa yang tinggi salah satunya terdapat pada ampas tebu. Ampas tebu mengandung 57,38% selulosa, 34,52% hemiselulosa, dan 23,05% lignin (Darmayanti *et al.*, 2019; Fadilah *et al.*, 2023). Dalam proses produksi di pabrik gula, ampas tebu (*bagasse*) dihasilkan sebesar 35 - 40% dan belum mendapat perhatian khusus (Bambang Trisakti *et al.*, 2015). Setiap hektar lahan tebu dapat menghasilkan 10 – 15 ton tetes tebu per hektar atau 766 – 1150 *ethanol* grade bahan bakar (Boedoyo, 2014). Oleh karena itu, ampas tebu berpotensi dijadikan sebagai bahan baku pengembangan energi terbarukan untuk meningkatkan nilai ekonomis limbah industri gula yang selama ini belum dimanfaatkan dengan maksimal (Setiati *et al.*, 2016).

Sebelum dijadikan biofuel, lignoselulosa dikonversi menjadi gula reduksi melalui *pretreatment* untuk mendapatkan selulosa dan hemiselulosa serta menghilangkan lignin. *Pretreatment* dilakukan untuk memecah struktur dari lignoselulosa, agar polimer selulosa lebih mudah diakses oleh enzim yang memecah polimer. *Pretreatment* dapat dilakukan secara enzimatik maupun secara katalis kimia baik asam atau basa (Maharani & Rosyidin, 2018). Salah satu metode yang banyak dipilih untuk mendegradasi lignoselulosa adalah hidrolisis. Hidrolisis umum digunakan karena mudah, murah dan beresiko kecil untuk diterapkan. Hidrolisis ada beberapa macam seperti hidrolisis asam, basa, enzimatik, dan kimia dengan besi klorida dan surfaktan (Ko *et al.*, 2016; Rahardjo *et al.*, 2021).

Namun metode tersebut menimbulkan dampak berbahaya bagi lingkungan dan prosesnya tergolong lama. Dari sekian banyak jenis hidrolisis yang dikembangkan, teknologi air subkritis dipertimbangkan sebagai metode alternatif karena kecepatan prosesnya yang tinggi dan ramah lingkungan (Lachos-Perez *et al.*, 2017; Muharja *et al.*, 2019). Melalui sistem subkritis, berbagai bahan kimia dan bioproduk dapat diproduksi dengan menggunakan air sebagai pelarut. Subkritis merupakan keadaan dimana suatu zat berada pada kondisi tekanan dan suhu diatas titik didihnya dan dibawah titik kritis dari zat tersebut. Untuk

senyawa air ($T_c = 374 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $P_c = 221 \text{ bar}$), suhu dan tekanan tinggi akan menurunkan momen dipol, menurunkan pH, meningkatkan nilai K_w , menurunkan viskositas, meningkatkan difusivitas, dan mempengaruhi konstanta dielektrik (ϵ) dan densitas. Sifat fisika air pada sekitar daerah titik kritisnya menjadikan air sebagai reaktan dan juga katalis yang baik (Cocero *et al.*, 2018; Kumar *et al.*, 2018).

Penelitian hidrolisis air subkritis telah banyak dikembangkan karena prosesnya yang terbukti dapat menghancurkan lignin secara efisien sekaligus melindungi selulosa (Muharja *et al.*, 2017, 2020, 2021; Muharja *et al.*, 2019). Penelitian sebelumnya berhasil memproduksi gula dari beberapa biomassa lignoselulosa melalui hidrolisis air subkritis dalam reaktor. Beberapa diantaranya yaitu kulit jeruk (Lachos-Perez *et al.*, 2020), sabut kelapa (Muharja *et al.*, 2022; Muharja *et al.*, 2019), ampas tebu (Zhang *et al.*, 2020), minyak pomace (Manzanares *et al.*, 2020), dan sekam padi (Abaide Mortari *et al.*, 2019). Gula yang dihasilkan dapat digunakan sebagai substrat untuk proses fermentasi menghasilkan etanol generasi kedua (Oliveira *et al.*, 2020) atau bahan kimia lainnya (Abaide Ugalde *et al.*, 2019).

Hal ini menjadikan proses hidrolisis air subkritis sebagai teknologi yang menjanjikan untuk diimplementasikan secara industri dalam konsep biorefineri. Meskipun demikian, masih terdapat tantangan yang signifikan dalam implementasi skala industri, utamanya tantangan teknis dan ekonomi. Selain itu energi yang diperlukan dalam proses hidrolisis air subkritis termasuk tinggi, oleh karena itu harus sebanding dengan produk yang dihasilkan (Ampese *et al.*, 2021). Berdasarkan hal tersebut, maka penggunaan metode hidrolisis air subkritis perlu dievaluasi efektivitasnya. Dalam perspektif industri, sudut pandang teknis harus disertai dengan studi ekonomi, yang berkontribusi untuk menjelaskan beberapa hambatan dalam implementasi industri (Sganzerla *et al.*, 2021). Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi secara mendalam proses produksi gula reduksi dari ampas tebu melalui *pretreatment* air subkritis serta membandingkan efektivitas hidrolisis air subkritis menggunakan oven dan autoklaf. Efektivitas proses dilakukan melalui evaluasi ekonomi dan analisa energi yang berguna sebagai gambaran untuk proses pada skala yang lebih besar.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Dasar dan Bioproses Teknik Kimia dan Laboratorium Operasi Teknik Kimia (OTK), Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Jember. Kegiatan penelitian dimulai pada bulan November 2020 hingga Maret 2021.

Alat dan Bahan

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini yaitu ampas tebu, *aquadest* (kemurnian 99,9%), Natrium Hidroksida (NaOH) untuk membuat larutan *buffer* dan reagen, glukosa (C₆H₁₂O₆) untuk membuat kurva standar, *sodium potassium tartrate pro analys* (Merck, Germany), *sodium metabisulfite pro analys* (Merck, Germany), dan *Dinitrosalicylic Acid* (DNS) *pro analys* (HiMedia Laboratories, India) untuk membuat reagen. Alat-alat yang digunakan meliputi ayakan 120 mesh untuk distribusi ukuran partikel, neraca analitik (Sartorius MSA225S-100-21 DU, Germany), termometer, autoklaf, oven (Sharp EO-18L(W), China), *micropipette* 200 µL dan 1000 µL (DraginLab, China), *microtube* 2 mL, *centrifuge* (Oregon LC-04S, China) untuk memisahkan residu dan hidrolisat, dan spektrofotometri UV-Vis (Vernier Go Direct GDX-SVISPL, China) untuk mengukur absorbansi.

Desain Penelitian

Desain penelitian dan analisis diadaptasi dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya oleh (Muharja *et al.*, 2018). Variabel dependen dalam penelitian ini yaitu konsentrasi gula reduksi hasil hidrolisis. Hidrolisis dilakukan menggunakan 2 alat yaitu oven dan autoklaf sehingga menghasilkan perbandingan efektivitas dari keduanya. Variabel independen yang digunakan berupa waktu reaksi (20, 40, dan 60 menit), suhu oven (110, 130, 150, dan 170°C) dan suhu autoklaf (120, 125, dan 130°C). Konsentrasi glukosa hasil hidrolisis diukur menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 540 nm.

Analysis of Variance (ANOVA) digunakan untuk mengetahui pengaruh variabel yang diteliti dengan tingkat signifikansi 95% (Muharja, Darmayanti *et al.*, 2023; Muharja, Fadilah *et al.*, 2023). Analisa ekonomi dilakukan berdasarkan biaya bahan, alat, dan biaya operasional sesuai dengan jumlah gula reduksi yang diperoleh (Sondhi *et al.*, 2020). Analisa energi dievaluasi

menggunakan faktor keparahan (*severity factor*) pada setiap variabel proses (Batista *et al.*, 2019).

Prosedur Eksperimen

Sebanyak 0,1 gram sampel kering ampas tebu ukuran 120 mesh dicampur dengan 1 mL aquades kemudian dipanaskan dalam oven dan autoklaf. Setelah didapatkan hidrolisat, konsentrasi gula reduksi diukur dengan metode *Dinitrosalicylic* (DNS) yang diadaptasi dari penelitian sebelumnya oleh (Muharja *et al.*, 2018). Untuk melakukan uji DNS, langkah pertama yaitu pembuatan larutan reagen DNS dari padatan DNS, larutan NaOH, *potassium sodium tartrate* dan *sodium metabisulfite*.

Langkah kedua adalah pembuatan kurva standar glukosa dengan cara membuat larutan dari padatan glukosa dan *buffer* sitrat pH 5,5 pada berbagai macam konsentrasi (0:5; 1:4; 2:3; 3:2; 4:1; 5:0). Kemudian diinkubasi pada suhu 35°C selama 10 menit dan ditambahkan 3 mL DNS lalu dihomogenkan, dipanaskan selama 10 menit dan didinginkan selama 10 menit. Selanjutnya diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 540 nm. Konsentrasi glukosa dihitung berdasarkan Persamaan 1.

$$\text{Konsentrasi Glukosa} = \frac{m}{V} \dots \dots \dots (1)$$

dimana : m adalah massa glukosa dan V adalah volume *buffer*. Kurva kalibrasi larutan standar glukosa dibuat dengan plotting konsentrasi glukosa terhadap absorbansi.

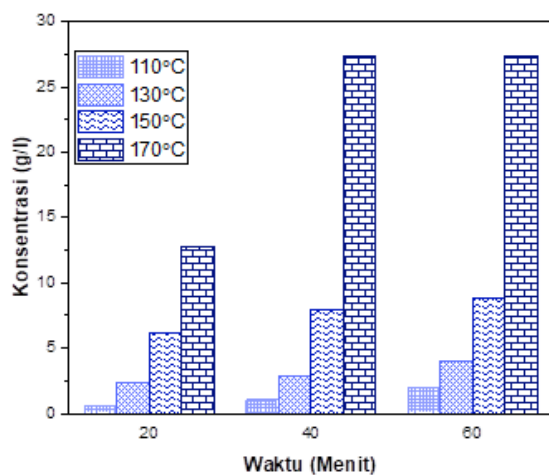
Langkah ketiga yaitu mengukur konsentrasi glukosa dari hasil hidrolisis yang diawali dengan pembuatan larutan blanko dari *buffer* sitrat pH 5,5 dan larutan DNS. Untuk mengukur konsentrasi gula, hidrolisat ditambah aquades dan larutan DNS kemudian dihomogenkan. Selanjutnya dipanaskan selama 10 menit, didinginkan hingga temperatur larutan normal ($\pm 25^\circ\text{C}$), kemudian diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 540 nm. Larutan standar menggunakan larutan blanko.

HASIL PEMBAHASAN

Hidrolisis Air Subkritis Menggunakan Oven

Hidrolisis dilakukan menggunakan reaktor kaca tertutup agar air panas terkompresi dapat digunakan untuk menghidrolisis poliester tanpa menambahkan produk lebih lanjut, karena produk ioniknya dapat tiga kali lipat lebih panas dari pada di kondisi sekitar, sehingga air dapat berperan

sebagai asam atau katalis basa (Cho *et al.*, 2019). Setelah hidrolisis menggunakan oven, terdapat sejumlah selulosa dan hemiselulosa yang terkonversi menjadi gula reduksi. Gambar 1 merupakan grafik pengaruh suhu dan waktu terhadap konsentrasi gula yang dihasilkan. Grafik menunjukkan bahwa waktu dan suhu berbanding lurus dengan konsentrasi gula reduksi. Gula reduksi meningkat pada suhu yang lebih tinggi dan waktu hidrolisis yang lebih lama. Kondisi optimum didapatkan saat temperatur 170°C dan waktu 40 menit, sedangkan konsentrasi paling rendah berada dalam kondisi temperatur 110 °C dan waktu 20 menit.



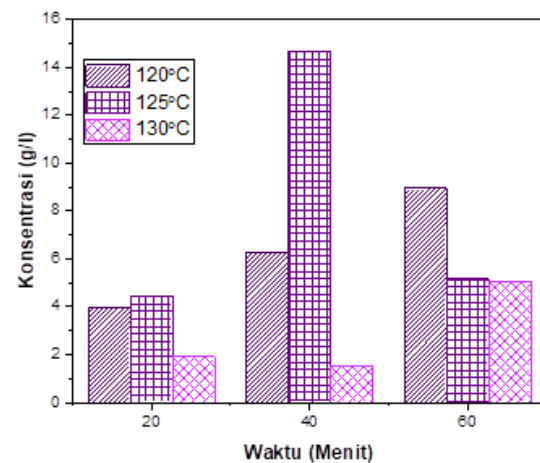
Gambar 1. Konsentrasi gula reduksi pada variasi suhu dan waktu hasil hidrolisis menggunakan oven

Berdasarkan hasil ANOVA, didapatkan *P-value* untuk waktu dan suhu sebesar $0,00 < 0,05$ sehingga dapat disimpulkan bahwa waktu dan suhu dapat secara signifikan mempengaruhi konsentrasi gula reduksi. Fenomena ini terjadi karena air pada tekanan dan temperatur yang tinggi dapat berperan sebagai pelarut dan dapat menguraikan substrat biomassa menjadi komponen penyusunnya, yaitu xilosa, glukosa, galaktosa, manosa, rhamnosa, dan *uronic acid* (Muharja *et al.*, 2020). Pada kondisi ini, hemiselulosa pertamanya memutus ikatan dari masing-masing monomernya (xilosa, arabinosa, fruktosa) melalui reaksi pelarutan dan hidrolisis menjadi gula yang larut dalam air. Hal ini disebabkan oleh struktur rantai polimer yang amorf dan pendek dari hemiselulosa sehingga sangat mudah dipecah pada suhu tinggi (Muharja *et al.*, 2018). Kecenderungan yang sama dengan penelitian yang dilakukan oleh (Muharja *et al.*, 2019), produksi gula dari sabut kelapa menggunakan hidrolisis air

subkritis meningkat seiring dengan peningkatan suhu diakibatkan oleh efek autokatalitik air. Dari grafik juga dapat dilihat bahwa peningkatan konsentrasi gula paling besar terjadi pada menit ke 40, dan cenderung konstan pada menit ke 60. Hal ini dapat disebabkan oleh degradasi monomer gula pada menit ke 40 telah mencapai titik optimum, sehingga tidak mengalami kenaikan pada menit berikutnya (konstan), bahkan mengalami penurunan.

Hidrolisis Air Subkritis Menggunakan Autoklaf

Hidrolisis menggunakan autoklaf telah digunakan untuk beberapa biomassa lignoselulosa. Proses ini melibatkan pemanasan bahan lignoselulosa pada suhu dan tekanan tinggi diikuti oleh proses mekanis, baik dengan ledakan uap atau dengan pencampuran ringan setelah mengeluarkan tekanan uap ke tekanan atmosfer. *Pretreatment* uap tekanan tinggi yang dilakukan dalam autoklaf dianggap sebagai metode yang efektif dan ramah lingkungan untuk menghancurkan kompleks selulosa hemiselulosa-lignin, menghasilkan bahan yang lebih mudah diakses untuk serangan enzimatik atau bahan kaya selulosa yang dapat digunakan setelah pemurnian lebih lanjut (Huang *et al.*, 2017).



Gambar 2. Konsentrasi gula reduksi pada variasi suhu dan waktu hasil hidrolisis menggunakan autoklaf

Gambar 2 menunjukkan pengaruh suhu dan waktu terhadap konsentrasi gula reduksi hidrolisis air subkritis menggunakan autoklaf. Konsentrasi optimum didapatkan pada suhu 125°C dan waktu 40 menit. Sedangkan konsentrasi terkecil didapatkan pada suhu 130°C dan waktu 40 menit.

Berdasarkan hasil output ANOVA, didapatkan *P-value* untuk waktu sebesar $0,002 < 0,05$ dan suhu sebesar $0,017 < 0,05$ sehingga dapat disimpulkan bahwa waktu dan suhu dapat secara signifikan mempengaruhi konsentrasi gula reduksi. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin lama reaksi dan semakin tinggi temperatur maka konsentrasi gula reduksinya meningkat, kemudian menurun setelah titik optimumnya. Penurunan konsentrasi gula pada suhu tinggi mengindikasikan bahwa monomer-monomer hemiselulosa tidak stabil pada kondisi reaksi ekstrim. Pada suhu tinggi, gula mengalami degradasi secara simultan sehingga terbentuk senyawa turunan dari glukosa yang dapat menjadi inhibitor fermentasi (Gautama & Karima, 2017).

Gambar 2 juga menunjukkan gula reduksi pada suhu 120°C terjadi kenaikan selama proses hidrolisis berlangsung, sedangkan pada suhu 125°C terjadi kenaikan dari waktu 20 sampai 40 menit. Hal ini disebabkan karena semakin lama waktu reaksi maka hasil reaksi akan semakin besar hingga titik optimum. Semakin lama waktu hidrolisis, maka polimer (pentosan) yang terurai akan semakin banyak sehingga monomer yang dihasilkan juga bertambah. Akan tetapi, kenaikan hasil gula reduksi tidak selalu terjadi seiring bertambahnya waktu dan suhu. Setelah mencapai titik optimum, gula reduksi akan semakin menurun (Amborowati *et al.*, 2016). Hal ini dibuktikan dengan terjadinya penurunan gula reduksi pada menit ke-60. Menurut (Debiagi *et al.*, 2020) dibandingkan dengan ultrasonikasi, uap bertekanan tinggi dalam autoklaf lebih efisien dalam pelepasan gula untuk kedua residu. Selama proses, tekanan dan suhu tinggi mendorong pembengkakan dan keruntuhan sel, menyebabkan kerusakan struktur serat yang efisien. Selain itu, metode uap bertekanan tinggi memiliki keunggulan yaitu dapat digunakan terhadap beberapa bahan baku dan berbagai target produk (Feng *et al.*, 2021).

Analisis Ekonomi

Ampas tebu merupakan limbah pabrik yang sangat berlimpah. Karena kurangnya pendekatan perawatan dan daur ulang yang hemat biaya, sebagian besar ampas tebu dibakar atau dibuang di lapangan. Akibatnya terjadi pencemaran lingkungan, terutama bahan partikulat tingkat tinggi (Lin *et al.*, 2015). Teknologi yang digunakan

untuk hidrolisis bahan baku menjadi bahan yang dapat difermentasi biasanya bergantung pada asam, basa atau katalis enzimatis (Jiang *et al.*, 2015). Disosiasi selulosa dan hemiselulosa menjadi gula dan produk sekunder dapat dilakukan oleh asam, hidrolisis enzimatis atau hidrolisis sub/supercritis (Luft *et al.*, 2018).

Dalam penelitian ini, penulis melaporkan metode sederhana hidrolisis air subkritis biomassa dengan oven dan autoklaf. Analisa ekonomi proses untuk produksi gula reduksi dihitung dengan mempertimbangkan biaya bahan kimia, biaya peralatan dan biaya operasi (Sondhi *et al.*, 2020), seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Biaya bahan baku diabaikan karena merupakan limbah dari pabrik yang sangat melimpah. Biaya reaktor untuk oven lebih mahal karena dalam sehari dapat menghasilkan sebanyak 9 hidrolisat, sedangkan autoklaf menghasilkan 5 hidrolisat. Biaya operasional autoklaf lebih tinggi karena dalam memanaskan sampel membutuhkan waktu lebih lama dibandingkan dengan oven sehingga energi yang dibutuhkan juga besar. Total semua biaya yang dikeluarkan dibagi dengan gula reduksi tertinggi, maka didapatkan biaya gula reduksi yaitu menggunakan oven dengan total sebesar Rp 351.744 sedangkan menggunakan autoklaf yaitu Rp 923.079. Maka dapat disimpulkan bahwa berdasarkan analisa ekonomi, metode hidrolisis air subkritis menggunakan oven lebih baik daripada autoklaf.

Tabel 1. Analisis Ekonomi Proses Hidrolisis Air Subkritis

Faktor	Biaya	
	Oven	Autoklaf
Total gula reduksi	180 Kg/L	53 Kg/L
Biaya bahan baku	-	-
Biaya alat	Rp 78	Rp 1.126
Biaya reaktor kaca	Rp 52.560.000	Rp 29.200.000
Biaya operasional	Rp 10.753.837	Rp 19.722.045
Biaya (gula reduksi)	Rp 351.744	Rp 923.079

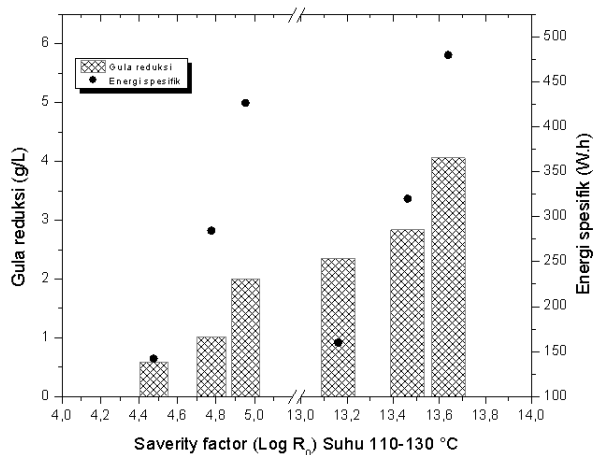
Analisis Energi

Proses hidrolisis air subkritis membutuhkan pengaturan suhu dan tekanan tertentu. Maka dari itu, prosesnya membutuhkan energi, seperti energi listrik dan energi panas. Faktor-faktor seperti konsumsi energi dapat dianalisis melalui langkah *pretreatment*. Dalam proses *pretreatment* hidrotermal (termasuk dalam hal ini hidrolisis air

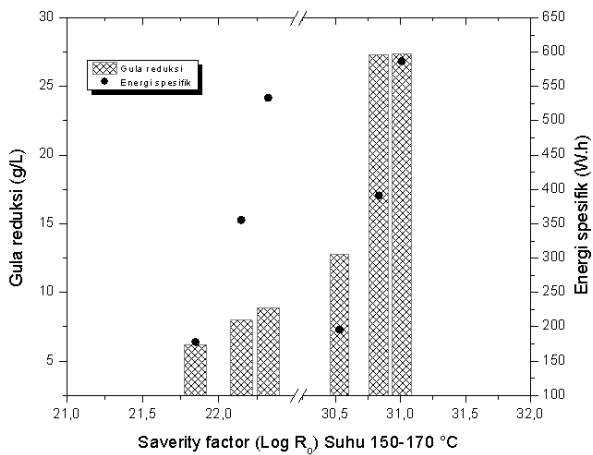
subkritis), analisa kebutuhan energi dapat dievaluasi menggunakan faktor keparahan (*severity factor*) yang berbeda pada setiap variabel proses (Batista et al., 2019).

Severity Factor pada Oven

Sangat penting untuk mengoptimalkan kebutuhan energi pada proses hidrolisis air subkritis agar dapat digunakan secara efektif. *Low severity factor* digunakan untuk membandingkan energi dan gula reduksi yang didapatkan pada suhu 110-130°C saat menggunakan oven. Konsumsi energi spesifik untuk hidrolisis air subkritis pada oven dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Konsumsi energi proses hidrolisis air subkritis menggunakan oven pada suhu 110 -



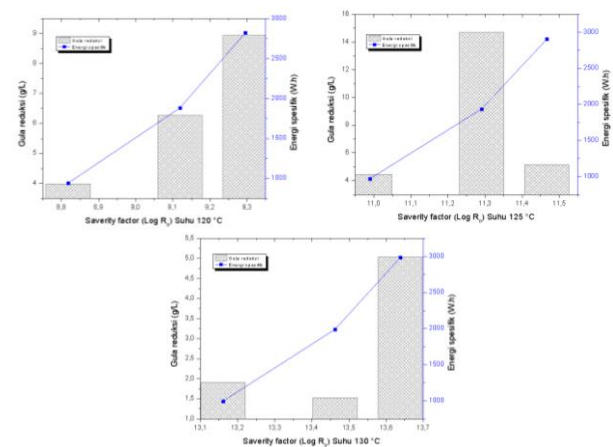
Gambar 4. Konsumsi energi proses hidrolisis air subkritis menggunakan oven pada suhu 150 - 170°C

Gambar 3 menunjukkan hidrolisis air subkritis pada *severity factor* 4,48 membutuhkan energi sebesar 142,2 (W.h) untuk menghasilkan gula reduksi terendah 0,59 g/L. Sedangkan hidrolisis pada *severity factor* 13,64 membutuhkan energi spesifik sebesar 480 W.h untuk menghasilkan gula

reduksi tertinggi 4,059 g/L. *High severity factor* digunakan untuk membandingkan energi dan gula reduksi yang didapatkan pada suhu 150-170°C pada oven, konsumsi energi spesifiknya dapat dilihat pada Gambar 4.

Hidrolisis air subkritis pada *severity factor* 21,85 (Gambar 4) membutuhkan energi sebesar 177,77 (W.h) untuk menghasilkan gula reduksi terendah 6,17 g/L. Sedangkan untuk hidrolisis air pada *severity factor* 31,01 membutuhkan energi spesifik sebesar 586,67 (W.h) untuk menghasilkan gula pereduksi tertinggi 27,39 g/L. Pada penelitian (Lachos-Perez et al., 2016), degradasi gula meningkat dengan meningkatnya *severity factor* (faktor keparahan). Apabila hidrolisis air subkritis ditujukan untuk menghasilkan gula yang dapat difermentasi, tingkat faktor keparahan harus diperhatikan untuk menghindari degradasi gula secara simultan yang dapat membentuk senyawa penghambat fermentasi (Muharja et al., 2019). Pada penelitian ini, semakin meningkat *severity factor* semakin besar gula reduksi yang didapatkan, maka semakin tinggi pula energi yang dibutuhkan.

Severity Factor pada Autoklaf



Gambar 5. Konsumsi energi proses hidrolisis air subkritis menggunakan autoklaf

Gambar 5 menunjukkan konsumsi energi spesifik hidrolisis air subkritis menggunakan autoklaf. Dapat dilihat bahwa pada *severity factor* 11,3 membutuhkan energi 1.936,67 W.h untuk menghasilkan gula pereduksi tertinggi sebesar 14,69 g/L. Jika dibandingkan dengan oven, hasil ini menunjukkan konsumsi energi autoklaf sangat tinggi. Hal ini disebabkan karena pemanasan pada autoklaf tidak langsung kontak dengan sampel melainkan pemanasan terhadap air terlebih dahulu sampai menguap, kemudian uap yang dihasilkan

digunakan untuk memanaskan sampel. Hal ini yang menjadikan proses membutuhkan waktu lebih lama, sehingga energi yang digunakan juga semakin tinggi.

Perbandingan Hidrolisis Air Subkritis Menggunakan Oven dan Autoklaf

Hidrolisis air subkritis sudah terbukti jelas mampu mengkonversi bahan lignoselulosa menjadi gula reduksi yang siap untuk difermentasi menjadi biofuel (Muharja *et al.*, 2020). Namun, hidrolisis air subkritis termasuk proses intensif energi sehingga manfaatnya terhadap hasil gula reduksi harus lebih besar daripada energi yang dikonsumsi (Ampese *et al.*, 2021). Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, hidrolisis air subkritis menggunakan oven lebih baik dari segi ekonomi dan efisiensi energi. Hidrolisis menggunakan oven membutuhkan biaya yang lebih rendah dan menghasilkan gula reduksi yang lebih besar dengan konsumsi energi lebih sedikit daripada autoklaf. Pada prinsipnya, oven menggunakan udara panas secara langsung untuk memanaskan atau mengeringkan sampel, sedangkan autoklaf menggunakan panas dan tekanan dari uap air.

KESIMPULAN DAN SARAN

Hidrolisis air subkritis mampu mengubah bahan lignoselulosa menjadi gula yang dapat di fermentasi. Waktu dan suhu merupakan faktor yang berpengaruh signifikan terhadap konsentrasi gula reduksi hasil hidrolisis air subkritis. Hidrolisis menggunakan oven lebih baik dari pada autoklaf karena oven memiliki suhu yang lebih tinggi dan pemanasan yang lebih cepat. Penggunaan oven lebih direkomendasikan daripada autoklaf karena konsumsi energinya lebih sedikit dan hasil analisa ekonomi menunjukkan oven membutuhkan biaya produksi yang lebih murah dengan hasil gula reduksi yang lebih tinggi. Rekomendasi yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah penambahan kelengkapan analisa seperti HPLC (*High Performance Liquid Chromatography*) untuk mengetahui konsentrasi monomer-monomer gula reduksi yang dihasilkan dan analisa TGA (*Thermogravimetric Analysis*) untuk mengetahui %lignin yang hilang setelah hidrolisis air subkritis.

DAFTAR PUSTAKA

- Abaide, E. R., Mortari, S. R., Ugalde, G., Valério, A., Amorim, S. M., Di Luccio, M., de FPM Moreira, R., Kuhn, R. C., Priamo, W. L., & Tres, M. V. (2019). Subcritical water hydrolysis of rice straw in a semi-continuous mode. *Journal of Cleaner Production*, 209, 386–397. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.259>
- Abaide, E. R., Ugalde, G., Di Luccio, M., Moreira, R. de F. P. M., Tres, M. V, Zabot, G. L., & Mazutti, M. A. (2019). Obtaining fermentable sugars and bioproducts from rice husks by subcritical water hydrolysis in a semi-continuous mode. *Bioresource Technology*, 272, 510–520. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.075>
- Amborowati, C., Adriani, U., Aditya, I. L., Feviasari, H., Hastin, T. K., Adhiksana, A., Prodi, M., Industri, T. K., Kimia, T., Samarinda, P. N., Pengajar, S., & Kimia, J. T. (2016). Pengaruh Waktu Dan Temperatur Hidrolisis Dalam Proses Sintesis Furfural Dari Sekam Padi Dengan Menggunakan Metode Hidrolisis Dan Dehidrasi. *Journal of Research and Technology*, 2(2), 2460–5972.
- Ampese, L. C., Buller, L. S., Myers, J., Timko, M. T., Martins, G., & Forster-Carneiro, T. (2021). Valorization of Macaúba husks from biodiesel production using subcritical water hydrolysis pretreatment followed by anaerobic digestion. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105656>
- Bambang Trisakti, Yustina br Silitonga, & Irvan. (2015). Pembuatan Bioetanol Dari Tepung Ampas Tebu Melalui Proses Hidrolisis Termal Dan Fermentasi Serta Recycle Vinasse (Pengaruh Konsentrasi Tepung Ampas Tebu, Suhu Dan Waktu Hidrolisis). *Jurnal Teknik Kimia USU*, 4(3), 17–22. <https://doi.org/10.32734/jtk.v4i3.1476>
- Batista, G., Souza, R. B. A., Pratto, B., dos Santos-Rocha, M. S. R., & Cruz, A. J. G. (2019). Effect of severity factor on the hydrothermal pretreatment of sugarcane straw. *Bioresource Technology*, 275(November 2018), 321–327. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.073>
- Boedoyo, M. S. (2014). Prospek Pemanfaatan Bioethanol Sebagai Pengganti BBM di Indonesia. *Prosiding Peluncuran Buku Outlook Energi Indonesia 2014 & Seminar Bersama BPPT Dan BKK-P11, September 2014*, 55–63.

- Cho, Y. J., Haq, M., Park, J. S., Lee, H. J., & Chun, B. S. (2019). Physicochemical and biofunctional properties of shrimp (*Penaeus japonicus*) hydrolysates obtained from hot-compressed water treatment. *Journal of Supercritical Fluids*, 147(November), 322–328. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.11.021>
- Cocero, M. J., Cabeza, Á., Abad, N., Adamovic, T., Vaquerizo, L., Martínez, C. M., & Pazo-Cepeda, M. V. (2018). Understanding biomass fractionation in subcritical & supercritical water. *The Journal of Supercritical Fluids*, 133, 550–565. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.08.012>
- Darmayanti, R., Amini, H. W., Rizkiana, M. F., Setiawan, F. A., Palupi, B., Rahmawati, I., Susanti, A., & Fachri, B. A. (2019). Lignocellulosic material from main Indonesian plantation commodity as the feedstock for fermentable sugar in biofuel production. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(20), 3524–3534.
- Debiagi, F., Madeira, T. B., Nixdorf, S. L., & Mali, S. (2020). Pretreatment efficiency using autoclave high-pressure steam and ultrasonication in sugar production from liquid hydrolysates and access to the residual solid fractions of wheat bran and oat hulls. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 190(1), 166–181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12010-019-03092-0>
- Djali, M., Kayaputri, I. L., Kurniati, D., Sukarminah, E., Mudjenan, I. M. H., & Utama, G. L. (2021). Degradation of Lignocelluloses Cocoa Shell (*Theobroma cacao* L.) by Various Types of Mould Treatments. *Journal of Food Quality*, 2021, 6127029. <https://doi.org/10.1155/2021/6127029>
- Fadilah, S. N., Musyafa, R., Putri, L. N., Syahril, D., Khamil, A. I., & Muharja, M. (2023). Pengaruh Penambahan Chemical Agent Terhadap Angka Gula Reduksi Nira Perahan Pertama (NPP). *Rekayasa; Vol 16, No 1: April 2023* DO - 10.21107/rekayasa.v16i1.17200 . <https://journal.trunojoyo.ac.id/rekayasa/article/view/17200>
- Fawzy, S., Osman, A. I., Doran, J., & Rooney, D. W. (2020). Strategies for mitigation of climate change: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(6), 2069–2094. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w>
- Feng, R., Li, Q., Zaidi, A. A., Peng, H., & Shi, Y. (2021). Effect of autoclave pretreatment on biogas production through anaerobic digestion of green algae. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 65(4), 483–492. <https://doi.org/10.3311/PPch.18064>
- Isnain Khamil, A., Saputra Widariantio, E., Zulham Valensyah, A., Muharja, M., Fitria Darmayanti, R., Umami, R., Shinta Mamnukha, K., & Zikrillah, M. (2023). Machine Learning Approach to Design of Biodiesel Production Extraction Equipment from Tamanu Seed Oil. *National Multidisciplinary Sciences*, 2(3 SE - Articles), 146–152. <https://doi.org/10.32528/nms.v2i3.278>
- Jiang, L., Zheng, A., Zhao, Z., He, F., Li, H., & Liu, W. (2015). Obtaining fermentable sugars by dilute acid hydrolysis of hemicellulose and fast pyrolysis of cellulose. *Bioresource Technology*, 182, 364–367. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.032>
- Khamil, A. I., Valensyah, A. Z., Muharja, M., Waji, D. I. S., Fitria, N. L. I., Pramudya, A. N., Shelli, P., Adrian, F., Zahiyah, Z. A., Mahendra, M. D., Syah, M. Z., Darmayanti, R. F., Mumtazah, Z., & Zikrillah, M. (2023). Recycle Home: Inovasi Pemanfaatan Sampah Organik menjadi Biogas Terintegrasi Aplikasi Mobile Recycle App sebagai Upaya Peningkatan Kesejahteraan Masyarakat Sekitar TPA Pakusari, Kabupaten Jember. *Sewagati*, 7(4 SE -), 602–613. <https://doi.org/10.12962/j26139960.v7i4.563>
- Ko, J. K., Um, Y., & Lee, S. M. (2016). Effect of manganese ions on ethanol fermentation by xylose isomerase expressing *Saccharomyces cerevisiae* under acetic acid stress. *Bioresource Technology*, 222, 422–430. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.130>
- Kumar, M., Oyedun, O., Adetoyese, & Kumar, A. (2018). A review on the current status of various hydrothermal technologies on biomass feedstock. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(March), 1742–1770. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.270>
- Lachos-Perez, D., Baseggio, A. M., Torres-Mayanga, P. C., Ávila, P. F., Tompsett, G. A., Marostica, M., Goldbeck, R., Timko, M. T., Rostagno, M., Martinez, J., & Forster-Carneiro, T. (2020).

- Sequential subcritical water process applied to orange peel for the recovery flavanones and sugars. *The Journal of Supercritical Fluids*, 160, 104789.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.104789>
- Lachos-Perez, D., Martinez-Jimenez, F., Rezende, C. A., Tompsett, G., Timko, M., & Forster-Carneiro, T. (2016). Subcritical water hydrolysis of sugarcane bagasse: An approach on solid residues characterization. In *Journal of Supercritical Fluids* (Vol. 108). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.10.019>
- Lachos-Perez, D., Tompsett, G. A., Guerra, P., Timko, M. T., Rostagno, M. A., Martínez, J., & Forster-Carneiro, T. (2017). Sugars and char formation on subcritical water hydrolysis of sugarcane straw. *Bioresource Technology*, 243, 1069–1077.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.080>
- Lin, R., Cheng, J., Ding, L., Song, W., Qi, F., Zhou, J., & Cen, K. (2015). Subcritical water hydrolysis of rice straw for reducing sugar production with focus on degradation by-products and kinetic analysis. *Bioresource Technology*, 186, 8–14.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.047>
- Luft, L., Confortin, T. C., Toderó, I., Ugalde, G., Zabet, G. L., & Mazutti, M. A. (2018). Transformation of residual starch from brewer's spent grain into fermentable sugars using supercritical technology. *Journal of Supercritical Fluids*, 140(April), 85–90.
<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.06.006>
- Maharani, D. M., & Rosyidin, K. (2018). Efek Pretreatment Microwave-NaOH Pada Tepung Gedebog Pisang Kepok terhadap Yield Selulosa. *Agritech*, 38(2), 133.
<https://doi.org/10.22146/agritech.16657>
- Manzanares, P., Ballesteros, I., Negro, M. J., González, A., Oliva, J. M., & Ballesteros, M. (2020). Processing of extracted olive oil pomace residue by hydrothermal or dilute acid pretreatment and enzymatic hydrolysis in a biorefinery context. *Renewable Energy*, 145, 1235–1245.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.120>
- Muharja, M., Albana, I., Zuhdan, J., Bachtiar, A., & Widjaja, A. (2019). *Reducing Sugar Production in Subcritical Water and Enzymatic Hydrolysis using Plackett- Burman Design and Response Surface Methodology*. 8(2).
- Muharja, M., Darmayanti, R. F., Khamil, A. I., Prastika, A., Rizalluddin, M., Fadilah, S. N., & Sari, D. A. D. (2023). Evaluation Of Dehydration Performance Of Belitung Taro (*Xanthosoma Sagittifolium*) Using Tray Dryer. *IPTEK The Journal for Technology and Science; Vol 34, No 1 (2023): On Progress*.
<https://iptek.its.ac.id/index.php/jts/article/view/14878>
- Muharja, M., Darmayanti, R. F., Palupi, B., Rahmawati, I., Fachri, B. A., Setiawan, F. A., Amini, H. W., Rizkiana, M. F., Rahmawati, A., Susanti, A., & Putri, D. K. Y. (2021). Optimization of microwave-assisted alkali pretreatment for enhancement of delignification process of cocoa pod husk. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 16(1), 31–43.
<https://doi.org/10.9767/BCREC.16.1.8872.31-43>
- Muharja, M., Fadhillah, N., Darmayanti, R. F., Sangian, H. F., Nurtono, T., & Widjaja, A. (2020). Effect of Severity Factor on the Subcritical Water and Enzymatic Hydrolysis of Coconut Husk for Reducing Sugar Production. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis; 2020: BCREC Volume 15 Issue 3 Year 2020 (December 2020)DO - 10.9767/bcrec.15.3.8870.786-797*.
<https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/bcrec/article/view/8870>
- Muharja, M., Fadilah, S. N., Khamil, A. I., & Darmayanti, R. F. (2023). *Effect of Immersion Concentration in Salt Solution , Drying Time and Air Velocity on Drying Wet Noodles Using a Tray Dryer and Solar Assistance*. 7(1), 9–16.
- Muharja, M., Junianti, F., Nurtono, T., & Widjaja, A. (2017). Combined subcritical water and enzymatic hydrolysis for reducing sugar production from coconut husk. *AIP Conference Proceedings*, 1840(1), 30004.
<https://doi.org/10.1063/1.4982264>
- Muharja, M., Junianti, F., Ranggina, D., Nurtono, T., & Widjaja, A. (2018). An integrated green process: Subcritical water, enzymatic hydrolysis, and fermentation, for biohydrogen production from coconut husk. *Bioresource Technology*,

- 249, 268–275. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.10.024>
- Muharja, M., Umam, D. K., Pertiwi, D., Zuhdan, J., Nurtono, T., & Widjaja, A. (2019). Enhancement of sugar production from coconut husk based on the impact of the combination of surfactant-assisted subcritical water and enzymatic hydrolysis. *Bioresource Technology*, *274*, 89–96. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.074>
- Muharja, M., Widjaja, A., Darmayanti, R. F., Airlangga, B., Anugraha, R. P., Fauziyah, M., Wijanarto, E., Sholehuddin, M., & Khamil, A. I. (2023). Heat Exchanger Network Analysis of The Power Plant Industry Using Aspen Energy Analyzer Software. *ASEAN JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING*, *23*(1), 14–27. <https://doi.org/10.22146/ajche.72261>
- Muharja, M., Widjaja, A., Darmayanti, R. F., & Fadhilah, N. (2022). *Subcritical Water Process for Reducing Sugar Production from Biomass: Optimization and Kinetics*. *17*(4), 839–849. <https://doi.org/10.9767/bcrec.17.4.16527.839-849>
- Nanda, S., & Berruti, F. (2021a). Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *19*(2), 1433–1456. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01100-y>
- Nanda, S., & Berruti, F. (2021b). Thermochemical conversion of plastic waste to fuels: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *19*(1), 123–148. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01094-7>
- Oliveira, T. C. G., Hanlon, K. E., Interlandi, M. A., Torres-Mayanga, P. C., Silvello, M. A. C., Lachos-Perez, D., Timko, M. T., Rostagno, M. A., Goldbeck, R., & Forster-Carneiro, T. (2020). Subcritical water hydrolysis pretreatment of sugarcane bagasse to produce second generation ethanol. *The Journal of Supercritical Fluids*, *164*, 104916. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.104916>
- Rahardjo, A. H., Azmi, R. M., Muharja, M., Aparamarta, H. W., & Widjaja, A. (2021). Pretreatment of Tropical Lignocellulosic Biomass for Industrial Biofuel Production: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1053*(1), 12097. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1053/1/012097>
- Sarker, T. R., Pattnaik, F., Nanda, S., Dalai, A. K., Meda, V., & Naik, S. (2021). Hydrothermal pretreatment technologies for lignocellulosic biomass: A review of steam explosion and subcritical water hydrolysis. *Chemosphere*, *284*(March), 131372. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131372>
- Setiati, R., Wahyuningrum, D., Siregar, S., & Marhaendrajana, T. (2016). Optimasi Pemisahan Lignin Ampas Tebu Dengan Menggunakan Natrium Hidroksida. *ETHOS (Jurnal Penelitian Dan Pengabdian)*, *June*, 257. <https://doi.org/10.29313/ethos.v0i0.1970>
- Sganzerla, W. G., Zabet, G. L., Torres-Mayanga, P. C., Buller, L. S., Mussatto, S. I., & Forster-Carneiro, T. (2021). Techno-economic assessment of subcritical water hydrolysis process for sugars production from brewer's spent grains. *Industrial Crops and Products*, *171*, 113836. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113836>
- Sondhi, S., Kaur, P. S., & Kaur, M. (2020). Techno-economic analysis of bioethanol production from microwave pretreated kitchen waste. *SN Applied Sciences*, *2*(9). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03362-1>
- Zhang, X., Zhang, W., Lei, F., Yang, S., & Jiang, J. (2020). Coproduction of xylooligosaccharides and fermentable sugars from sugarcane bagasse by seawater hydrothermal pretreatment. *Bioresource Technology*, *309*, 123385. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123385>