

TESIS

**KINETIKA DELIGNIFIKASI BATANG PISANG YANG
DIBERI PRAPERLAKUAN *ALKALINE MICROWAVE-
ASSISTED***



ULFA MEILA ANGGRIANI

03012682125002

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK KIMIA

JURUSAN TEKNIK KIMIA

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

2023

TESIS

**KINETIKA DELIGNIFIKASI BATANG PISANG YANG
DIBERI PRAPERLAKUAN *ALKALINE MICROWAVE-
ASSISTED***

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan Gelar
Magister Terknik (M.T) Pada Fakultas Teknik Universitas
Sriwijaya**



**ULFA MEILA ANGGRIANI
03012682125002**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK KIMIA
JURUSAN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2023**

HALAMAN PENGESAHAN

KINETIKA DELIGNIFIKASI BATANG PISANG YANG DIBERI PRAPERLAKUAN *ALKALINE MICROWAVE-ASSISTED*

TESIS

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan Gelar
Magister Terknik (M.T) Pada Fakultas Teknik Universitas
Sriwijaya**

Palembang, Desember 2023

Menyetujui,
Pembimbing I,



Prof. Novia, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197311052000032003

Pembimbing II,



Elda Melwita, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197505112000122001

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya



Prof. Dr. Eng. Ir. H. Joni Arliansyah, M.T.
NIP. 196706151995121002

Ketua Jurusan Teknik Kimia



Dr. Fuli Indah Sari, S.T., M.T.
NIP. 197502012000122001

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa Laporan Tesis ini dengan judul "Kinetika Delignifikasi Batang Pisang Yang Diberi Praperlakuan *Alkaline Microwave-Assisted*" telah dipertahankan di hadapan Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Program Studi Magister Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya pada tanggal 14 Desember 2023.

Palembang, Desember 2023

Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah berupa Laporan Tesis
Ketua :

1. Prof. Dr. Ir. H. M. Said, M.Sc.
NIP. 196108121987031003

()

Anggota :

1. Prof. Dr. Ir. Hj. Susila Arita, DEA
NIP. 196010111985032002

()

2. Dr. Leily Nurul Komariah, S.T., M.T.
NIP. 197503261999032002

()

3. Dr. David Bahrin, ST, MT
NIP. 198110312005011003

( 15/12/2023)

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya


Prof. Dr. Eng. Ir. H. Joni Arliansyah, M.T.
NIP. 19670615 199512 1002

Ketua Jurusan Teknik Kimia,


Dr. Futi Indah Sari, S.T., M.T.
NIP. 19750201 200012 2001

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Ulfa Meila Anggriani

NIM : 03012682125002

Judul : Kinetika Delignifikasi Batang Pisang Yang Diberi
Praperlakuan *Alkaline Microwave-Assisted*

Menyatakan bahwa Laporan Tesis saya merupakan hasil karya sendiri didampingi tim pembimbing dan bukan hasil penjiplakan/plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam Laporan Tesis ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai aturan yang berlaku.

Demikian, pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari siapapun.



Palembang, Desember 2023

Yang Membuat Pernyataan,



Ulfa Meila Anggriani

NIM. 03012682125002

RINGKASAN

KINETIKA DELIGNIFIKASI BATANG PISANG YANG DIBERI PRAPERLAKUAN *ALKALINE MICROWAVE-ASSISTED*
Karya tulis ilmiah berupa Tesis, Desember 2023

Ulfa Meila Anggriani, dibimbing oleh Prof. Novia, S.T., M.T., Ph.D. dan Elda Melwita, S.T., M.T., Ph.D.

Kinetics Of Delignification Of Banana Stems Pretreated With Microwave-Assisted Alkaline

xii + 86 Halaman, 10 Tabel, 31 Gambar, 3 Lampiran

RINGKASAN

Batang pisang merupakan sumber biomassa lignoselulosa dengan kandungan selulosa yang tinggi dan ketersediaan melimpah di Indonesia. Dalam penelitian ini akan menyelidiki tentang kinetika delignifikasi batang pisang yang diberi *alkaline pretreatment* dan *alkaline microwave-assisted*. Limbah batang pisang diberi perlakuan awal dengan bantuan alkaline dan microwave alkaline sehingga kadar lignin yang terkandung dalam biomassa lignoselulosa berkurang dan kadar selulosa meningkat. Pada pretreatment basa, KOH 6% ditambahkan pada lignoselulosa dan dipanaskan pada hotplate dengan variasi waktu kontak (10, 20, 30, 40, dan 50 menit) dengan variasi suhu (55, 65, 75, 85, dan 95°C). Pada pretreatment, larutan KOH 6% berbantuan gelombang mikro basa ditambahkan ke dalam lignoselulosa dan dipanaskan selama 20 menit dengan variasi suhu (55, 65, 75, 85, dan 95°C), kemudian dimasukkan ke dalam microwave dengan variasi waktu kontak (55, 65, 75, 85 dan 95 menit). Setelah dilakukan pretreatment, sampel dianalisis menggunakan metode Chesson untuk mengetahui kadar selulosa, hemiselulosa dan lignin. Hasil analisis menunjukkan bahwa pretreatment basa dengan bantuan alkali dan gelombang mikro efektif menurunkan kadar lignin dan meningkatkan kadar selulosa dalam lignoselulosa. Hasil terbaik pada kedua pretreatment diperoleh pada suhu 95°C dengan waktu kontak 50 menit yaitu pada *alkaline pretreatment* kadar selulosanya 64,38% dan ligninnya 8,13% lalu pada *alkaline microwave-assisted* didapatkan kadar selulosanya 68,27% dan ligninnya 6,24%. *Alkaline pretreatment* dan *alkaline microwave-assisted pretreatment* mengikuti model kinetika delignifikasi orde satu dengan nilai energi aktivasi (E_a) masing-masing *pretreatment* yaitu 22,79 KJ/mol dan 18,59 KJ/mol.

Kata kunci : Kinetika, Delignifikasi, Batang Pisang, Selulosa, lignin

Kepustakaan : 61 (1981-2023)

SUMMARY

KINETICS OF DELIGNIFICATION OF BANANA STEMS PRETREATED WITH MICROWAVE-ASSISTED ALKALINE

Scientific Paper in the Form of Thesis, December 2023

Ulfa Meila Anggriani, dibimbing oleh Prof. Novia, S.T., M.T., Ph.D. dan Elda Melwita, S.T., M.T., Ph.D.

Kinetika Delignifikasi Batang Pisang Yang Diberi Praperlakuan *Alkaline Microwave-Assisted*

xii + 86 Pages, 10 Tables, 31 Figures, 3 Appendices

SUMMARY

Banana stem is a source of lignocellulose biomass with high cellulose content and abundant availability in Indonesia. In this study will investigate the kinetics of delignification of banana stems given alkaline *pretreatment* and *alkaline microwave-assisted*. Banana stem waste is given preliminary treatment with the help of alkaline and microwave alkaline so that lignin levels contained in lignocellulose biomass are reduced and cellulose levels increase. In basic pretreatment, 6% KOH is added to lignocellulose and heated to a hotplate with variations in contact time (10, 20, 30, 40, and 50 minutes) with temperature variations (55, 65, 75, 85, and 95°C). In pretreatment, a 6% alkaline microwave-assisted solution of KOH is added to the lignocellulose and heated for 20 minutes with temperature variations (55, 65, 75, 85, and 95°C), then microwaved with variations in contact time (55, 65, 75, 85 and 95 minutes). After pretreatment, the sample was analyzed using the Chesson method to determine cellulose, hemicellulose and lignin levels. The results of the analysis showed that alkaline pretreatment with the help of alkalis and microwaves effectively lowered lignin levels and increased cellulose levels in lignocellulose. The best results in both pretreatments were obtained at a temperature of 95°C with a contact time of 50 minutes, namely *in alkaline pretreatment* the cellulose content was 64.38% and lignin was 8.13%, then in alkaline microwave-assisted obtained cellulose content was 68.27% and lignin was 6.24%. Alkaline pretreatment and *alkaline microwave-assisted pretreatment* follow the kinetic model of first-order delignification with activation energy (E_a) values of 22.79 KJ/mol and 18.59 KJ/mol, respectively.

Keywords : Kinetics, Delignification, Banana Stem, Cellulose, lignin

Citations : 61 (1981-2023)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT. karena atas rahmat dan karunia-Nya dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Kinetika Delignifikasi Batang Pisang yang Diberi Praperlakuan *Alkaline Microwave-Assisted*”. Tujuan dari penyusunan tesis ini adalah untuk memenuhi persyaratan mengikuti ujian tesis di Program Studi Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya. Keseluruhan rangkaian penelitian ini dapat terlaksana dengan baik oleh bantuan berbagai pihak. Untuk itu dalam kesempatan ini penyusun menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

- 1) Kedua orang tua yang telah memberikan dukungan dan doanya.
- 2) Kedua adik saya yang telah memberikan dorongan motivasi untuk lulus.
- 3) Ibu Dr. Tuti Indah Sari, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya.
- 4) Bapak Dr. David Bahrin, S.T., M.T. selaku Koordinator Prodi Magister Teknik Kimia Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya.
- 5) Ibu Prof. Novia, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing 1.
- 6) Ibu Elda Melwita, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing 2.
- 7) Analis beserta staf laboratorium Rekayasa Proses, Produk Industri Kimia Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya.
- 8) Teman-teman seperjuangan di Magister Teknik Kimia Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya.

Palembang, Desember 2023

Penulis

DAFTAR ISI

RINGKASAN	v
SUMMARY.....	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Hipotesa	4
1.5 Ruang Lingkup Penelitian.....	5
1.6 Manfaat	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Biomassa Lignoselulosa.....	6
2.1.1 Selulosa.....	7
2.1.2 Hemiselulosa	8
2.1.3 Lignin	8
2.2 Batang Pisang.....	9
2.3 Pretreatment Bahan Baku.....	11
2.4 Pretreatment Alkali (KOH) dan Microwave	15
2.5 Analisis Kandungan Lignoselulosa dengan Metode Chesson-Datta	16
2.6 Kinetika Delignifikasi	16
2.7 Penelitian Terdahulu	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1 Waktu dan Tempat penelitian	27
3.2 Peralatan dan Bahan.....	27
3.2.1 Peralatan	27
3.2.2 Bahan.....	28
3.3 Rancangan Penelitian	28
3.3.1 Variabel Penelitian	28
3.4 Metode Penelitian.....	29
3.4.1 Persiapan Bahan Baku (Proses Pengeringan).....	29
3.4.2 Persiapan Bahan Baku (Proses Pengepresan).....	29
3.4.3 Delignifikasi dengan Alkali KOH	29
3.4.4 Delignifikasi dengan Alkali KOH- <i>Microwave</i>	30
3.5 Uji Analisis Produk.....	30
3.5.1 Kadar Lignin dengan Metode Chesson (Datta, 1981).....	30
3.5.2 Uji Analisis Kadar Air – Thermogravimetri (SNI-01-2354.2-2006)	31
3.6 Diagram Alir	32

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	36
4.1 Hasil Penelitian	36
4.1.1 Data Kadar Air Batang Pisang Sebelum Pretreatment	36
4.1.2 Data Komposisi Batang Pisang Sebelum dan Sesudah Pretreatment.....	36
4.2 Pembahasan.....	39
4.2.1 Pengaruh Suhu dan Waktu pada Alkaline Pretreatment terhadap Komposisi Batang Pisang.....	39
4.2.2 Pengaruh Suhu dan Waktu pada Pretreatment Alkaline Microwave-Assisted terhadap Komposisi Batang Pisang.....	43
4.2.3 Kinetika Delignifikasi Pretreatment KOH terhadap Komposisi Batang Pisang	47
4.2.4 Kinetika Delignifikasi Pretreatment Alkaline Microwave-Assisted terhadap Komposisi Batang Pisang	54
4.2.5 Analisa Scanning Electron Microscopy (SEM) – Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)	62
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	65
5.1 Kesimpulan	65
5.1 Saran.....	65
DAFTAR PUSTAKA	66

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Jenis pemanfaatan sumber lignoselulosa dan produknya.....	6
Gambar 2.2 Struktur Selulosa	7
Gambar 2.3 Struktur Selulosa	8
Gambar 2.4 Struktur Lignin	9
Gambar 2.5 Batang pisang	10
Gambar 3.1 Diagram alir persiapan bahan baku (proses pengeringan)	32
Gambar 3.2. Diagram alir persiapan bahan baku (proses pengeringan).	33
Gambar 3.3 Delignifikasi dengan <i>alkaline pretreatment</i>	34
Gambar 3.4 Delignifikasi dengan <i>alkaline microwave-assisted pretreatment</i>	35
Gambar 4.1 Pengaruh Suhu dan Waktu terhadap Kadar Selulosa sesudah Alkaline Pretreatment	39
Gambar 4.2 Pengaruh Suhu dan Waktu terhadap Kadar Lignin sesudah Alkaline Pretreatment	40
Gambar 4.3 Pengaruh Suhu dan Waktu Alkaline Pretreatment terhadap % Lignin Removal	41
Gambar 4.4 Pengaruh Suhu dan Waktu terhadap Kadar Selulosa sesudah Alkaline Microwave-Assisted Pretreatment	43
Gambar 4.5 Pengaruh Suhu dan Waktu terhadap Kadar Lignin sesudah Alkaline Microwave-Assisted Pretreatment	44
Gambar 4.6 Pengaruh Suhu dan Waktu Alkaline Microwave – Assisted Pretreatment terhadap % Lignin Removal	45
Gambar 4.7 Hubungan Antara $-\ln(1-L_D)$ dan t pada Suhu 55°C untuk <i>Alkaline Pretreatment</i>	47
Gambar 4.8 Hubungan Antara $-\ln(1-L_D)$ dan t pada Suhu 65°C untuk <i>Alkaline Pretreatment</i>	48
Gambar 4.9 Hubungan Antara $-\ln(1-L_D)$ dan t pada Suhu 75°C untuk <i>Alkaline Pretreatment</i>	48
Gambar 4.10 Hubungan Antara $-\ln(1-L_D)$ dan t pada Suhu 85°C untuk <i>Alkaline Pretreatment</i>	49
Gambar 4.11 Hubungan Antara $-\ln(1-L_D)$ dan t pada Suhu 95°C untuk <i>Alkaline Pretreatment</i>	49

Gambar 4.12 Kinetika Dengan Mempertimbangkan Dp pada T 55°C untuk <i>Alkaline Pretreatment</i>	50
Gambar 4.13 Kinetika Dengan Mempertimbangkan Dp pada T 65°C untuk <i>Alkaline Pretreatment</i>	51
Gambar 4.14 Kinetika Dengan Mempertimbangkan Dp pada T 75°C untuk <i>Alkaline Pretreatment</i>	51
Gambar 4.15 Kinetika Dengan Mempertimbangkan Dp pada T 85°C untuk <i>Alkaline Pretreatment</i>	52
Gambar 4.16 Kinetika Dengan Mempertimbangkan Dp pada T 95°C untuk <i>Alkaline Pretreatment</i>	52
Gambar 4.17 Penentuan Energi Aktivasi <i>Alkaline Pretreatment</i>	53
Gambar 4.18 Hubungan Antara $-\ln(1-L_D)$ dan t pada Suhu 55°C untuk <i>Alkaline Microwave-Assisted Pretreatment</i>	54
Gambar 4.19 Hubungan Antara $-\ln(1-L_D)$ dan t pada Suhu 65°C untuk <i>Alkaline Microwave-Assisted Pretreatment</i>	55
Gambar 4.20 Hubungan Antara $-\ln(1-L_D)$ dan t pada Suhu 75°C untuk <i>Alkaline Microwave-Assisted Pretreatment</i>	55
Gambar 4.21 Hubungan Antara $-\ln(1-L_D)$ dan t pada Suhu 85°C untuk <i>Alkaline Microwave-Assisted Pretreatment</i>	56
Gambar 4.22 Hubungan Antara $-\ln(1-L_D)$ dan t pada Suhu 95°C untuk <i>Alkaline Microwave-Assisted Pretreatment</i>	56
Gambar 4.23 Kinetika dengan Mempertimbangkan Dp pada T 55°C untuk <i>Alkaline Microwave-Assisted Pretreatment</i>	57
Gambar 4.24 Kinetika dengan Mempertimbangkan Dp pada T 65°C untuk <i>Alkaline Microwave-Assisted Pretreatment</i>	58
Gambar 4.25 Kinetika dengan Mempertimbangkan Dp pada T 75°C untuk <i>Alkaline Microwave-Assisted Pretreatment</i>	58
Gambar 4.26 Kinetika dengan Mempertimbangkan Dp pada T 85°C untuk <i>Alkaline Microwave-Assisted Pretreatment</i>	59
Gambar 4.27 Kinetika dengan Mempertimbangkan Dp pada T 95°C untuk <i>Alkaline Microwave-Assisted Pretreatment</i>	59

Gambar 4.28 Penentuan Energi Aktivasi <i>Pretreatment Alkaline Microwave-Assisted</i>	60
Gambar 4.29 Analisa SEM Sampel Batang Pisang Sebelum Dilakukan <i>Pretreatment</i>	63
Gambar 4.30 Analisa SEM Sampel Batang Pisang Setelah <i>Alkaline Pretreatment</i>	63
Gambar 4.31 Analisa SEM Sampel Batang Pisang Setelah <i>Alkaline Microwave-Assisted Pretreatment</i>	63

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Batang Pisang	10
Tabel 2.2 Kelebihan dan Kekurangan Macam-Macam <i>Pretreatment</i>	11
Tabel 4.1 Perhitungan Data Analisa Kadar Air Batang Pisang proses Pengeringan	36
Tabel 4.2 Perhitungan Data Analisa Chesson Batang Pisang Sebelum <i>Pretreatment</i>	37
Tabel 4.3 Perhitungan Data Analisa Chesson Batang Pisang Setelah <i>Alkaline Pretreatment</i>	37
Tabel 4.4 Perhitungan Data Analisa Chesson Batang Pisang Setelah <i>Alkaline Microwave -Assisted Pretreatment</i>	38
Tabel 4.5 Perbandingan Energi Aktivasi dengan Berbagai Macam <i>Pretreatment</i> pada Penelitian Terdahulu	61
Tabel 4.6 Hasil Analisa EDS Batang Pisang Sebelum Dan Sesudah Dilakukan <i>Pretreatment</i>	62

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	73
Lampiran B	76
Lampiran C	86

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan populasi manusia secara global maupun nasional menyebabkan kebutuhan akan bahan bakar fosil ikut meningkat. Menurut prediksi Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB), populasi manusia akan terus bertambah hingga dapat menggapai 8,5 miliar di tahun 2030 dan 9,7 miliar di tahun 2050. Indonesia sendiri menduduki peringkat 4 negara negara terpadat di dunia, dengan jumlah penduduk mencapai 275 juta jiwa (United Nation, 2022).

Di sisi lain, bahan bakar fosil adalah sumber energi yang tidak bisa diperbaharui. dimana energi dari bahan bakar fosil ini ketersediaannya justru semakin menipis seiring dengan kebutuhan energi yang meningkat. Selain itu, pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh kendaraan yang menggunakan bahan bakar fosil menggiring manusia untuk beralih ke bahan bakar energi terbarukan. Salah satu alternatif energi terbarukan adalah biofuel.

Biofuel adalah bahan bakar berbasis nabati dengan banyak potensi pengembangan dan termasuk bahan bakar yang aman terhadap lingkungan (Budianto et al., 2021). Salah satu contoh biofuel yang dapat dikembangkan adalah bioetanol. Bioethanol terbuat dari sumber daya hayati yang mengandung gula atau pati seperti ubi kayu atau singkong, ubi jalar, sorgum, nira, tebu, ganyong, nira nipah, dan lain-lain. Bahan-bahan tersebut merupakan bahan yang mudah didapat, namun beberapa diantaranya dijadikan sebagai bahan pakan. Salah satu sumber bahan yang dianggap limbah dan kaya akan karbohidrat adalah batang pisang (Arjeni et al., 2022).

Batang pisang diketahui memiliki kandungan selulosa sebanyak (60-65)%, hemiselulosa sebesar (6-8)% dan lignin sebesar (5-10)% (Naufal, 2018). Tingginya kandungan selulosa pada batang pisang ini berpotensi untuk dijadikan bahan baku bioetanol. Batang pisang merupakan tanaman yang dapat ditemukan di banyak tempat di Indonesia yang beriklim tropis sehingga dianggap sebagai limbah pertanian. Menurut Badan Pusat Statistik dan Direktorat Jenderal Hortikultura

(2019), luas panen tanaman pisang di Indonesia mencapai 105,801 ha. Selain itu, produksi tanaman pisang di Indonesia mencapai 8.741.147 Ton, sedangkan di Provinsi Sumatera selatan mencapai 354.143 Ton yang merupakan urutan ke-6 sebagai provinsi yang memproduksi tanaman pisang terbanyak di Indonesia pada tahun 2021 (Badan Pusat Statistik, 2021).

Besarnya luas panen tanaman pisang dan produksi tanaman pisang menyebabkan melimpahnya batang pisang, sehingga berpotensi besar untuk dijadikan bahan baku pembuatan bioetanol. Bahan baku batang pisang harus melalui beberapa proses dengan berbagai metode untuk memperoleh selulosa yang terkandung di dalamnya. Diperlukan *pretreatment* yang berfungsi untuk mendapatkan selulosa pada batang pisang yang nantinya akan diproses menjadi bioetanol. Komponen lignin harus dihilangkan terlebih dahulu karena dapat menghalangi degradasi selulosa yang dilakukan oleh mikroba ataupun bahan kimia (Ralph et al., 2019). Delignifikasi perlu dilakukan untuk menghilangkan lignin dan mendapatkan kandungan selulosa pada batang pisang. Namun sebelum dilakukan delignifikasi, batang pisang harus dikurangi kadar airnya karena dapat mengganggu proses konversi menjadi glukosa nantinya (Akbar et al., 2019).

Biasanya untuk mengurangi kadar air dilakukan dengan proses pengeringan, seperti yang lakukan oleh Akbar et al., (2019) yang melakukan proses pengeringan pada oven dengan suhu 100 °C selama 2 jam dan 4 jam diperoleh kadar air bahan baku 12,056% sedangkan 4 jam adalah 5,613%. Namun, cara ini tentunya kurang efisien karna membutuhkan waktu yang cukup lama padahal sebetulnya pengurangan kadar air bahan baku dapat dilakukan dengan cara di pres menggunakan alat pemisah ekstrak cairan dan padatan. Proses pengepresan ini belum pernah dilakukan oleh penelitian sebelumnya, padahal proses ini tentunya akan sangat menghemat energi dan juga waktu sehingga proses *pretreatment* lebih optimal.

Selanjutnya, metode *pretreatment* (delignifikasi) dapat dilakukan baik secara konvensional ataupun non konvensional. Salah satu *pretreatment* non konvensional yaitu menggunakan *microwave*. Menurut Sari et al. (2018), *pretreatment* dengan penggabungan antara *microwave* dan alkali menggunakan berbagai bahan mentah yang dapat menghasilkan kandungan glukosa yang lebih tinggi dan penghilangan

lignin yang lebih banyak dari larutan basa. Jika dibandingkan dengan prosedur konvensional, reaksi kimia yang dilakukan dengan adanya gelombang mikro biasanya lebih cepat, lebih ekonomis, dan lebih ramah terhadap lingkungan (Ditia et al., 2021).

Selanjutnya, selulosa yang diperoleh pada proses *pretreatment* sebelumnya akan dilanjutkan ke proses hidrolisis untuk menghasilkan glukosa. Hidrolisis merupakan reaksi antara reaktan dan air untuk memecah atau mengurai suatu senyawa polisakarida (selulosa) menjadi monomer gula penyusunnya (Ketut, 2018). Glukosa yang dihasilkan pada proses hidrolisis akan diteruskan ke proses fermentasi untuk mendapatkan bioetanol (Novia et al., 2017). Proses fermentasi dilakukan dengan bantuan mikroba yang nantinya akan mengubah glukosa menjadi bioetanol. Pada proses produksi bioetanol ini, diperlukan proses yang tepat agar optimal dalam menghasilkan bioetanol dengan kualitas dan kemurnian yang tinggi .

Berdasarkan paparan diatas, proses *pretreatment* (delignifikasi) sangat mempengaruhi banyaknya glukosa dan kualitas bioetanol yang akan dihasilkan. Hanya sedikit sekali penelitian yang menggunakan *pretreatment* gabungan antara *alkaline* dan *microwave-assisted* untuk mengurangi kandungan lignin pada batang pisang. Oleh karena itu, perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut mengenai kinetika delignifikasi batang pisang menggunakan metode *alkaline* dan *microwave-assisted*. Limbah batang pisang akan lebih termanfaatkan dengan optimal sehingga mengurangi pencemaran lingkungan.

1.2 Rumusan Masalah

Batang pisang memiliki kandungan selulosa sebesar (60-65)%, hemiselulosa sebesar (6-8)% dan lignin sebesar (5-10)%. Tingginya kandungan selulosa pada batang pisang ini berpotensi untuk dijadikan bahan baku bioetanol, namun sebelum diproses lebih lanjut menjadi bioetanol batang pisang harus diberikan *pretreatment* penghilangan lignin terlebih dahulu sehingga penelitian ini memiliki rumusan masalah sebagai berikut

1. Bagaimana pengaruh variasi suhu pada metode *alkaline pretreatment* dan *alkaline microwave—assisted* terhadap komposisi biomassa batang pisang?

2. Bagaimana pengaruh variasi waktu kontak pada metode *alkaline pretreatment* dan *alkaline microwave—assisted* terhadap komposisi biomassa batang pisang?
3. Apakah *alkaline microwave-assisted pretreatment* lebih baik daripada *alkaline pretreatment* dalam men delignifikasi batang pisang?
4. Bagaimana kinetika delignifikasi biomassa batang pisang yang telah diproses *alkaline pretreatment* dan *alkaline microwave—assisted*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian ini yaitu

1. Menganalisis pengaruh variasi suhu pada metode *alkaline pretreatment* dan *alkaline microwave—assisted* terhadap komposisi biomassa batang pisang.
2. Menganalisis pengaruh variasi waktu kontak pada metode *alkaline pretreatment* dan *alkaline microwave—assisted* terhadap komposisi biomassa batang pisang.
3. Menentukan *pretreatment* yang lebih baik dalam men delignifikasi batang pisang.
4. Menghitung kinetika *delignifikasi* biomassa batang pisang yang telah diproses *alkaline pretreatment* dan *alkaline microwave—assisted*.

1.4 Hipotesa

Hipotesa pada penelitian ini yaitu

1. Semakin tinggi suhu proses dan semakin lama waktu kontak pada proses delignifikasi maka akan semakin baik komposisi biomassa batang pisang yang dihasilkan (Chi et al., 2019).
2. Semakin lama waktu pengontakan bahan baku dengan microwave, maka akan semakin mudah struktur biomassa batang pisang dipecah dan proses delignifikasi akan semakin optimal (Sari et al. 2018).
3. *Alkaline microwave-assisted pretreatment* lebih baik daripada *alkaline pretreatment* dalam mendelignifikasi batang pisang (Low et al., 2015).

4. Kinetika delignifikasi dapat ditentukan menggunakan reaksi orde satu (Novia et al., 2022).

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup pada penelitian ini yaitu

1. Persiapan bahan baku menggunakan 2 metode yaitu proses pengeringan dan proses pengepresan.
2. Suhu proses pengeringan 100°C dengan waktu proses ± 2 jam.
3. Perbandingan massa batang pisang dan pelarut adalah 1:10 % b/v.
4. Proses delignifikasi menggunakan 2 cara yaitu *alkaline pretreatment* dan *alkaline microwave-assisted pretreatment*.
5. Konsentrasi KOH yaitu 6%, dengan variasi waktu reaksi (10, 20, 30, 40, dan 50 menit) pada variasi suhu (55, 65, 75, 85 dan 95°C).
6. Sampel yang sudah direaksikan dengan larutan KOH selama 20 menit) pada variasi suhu (55, 65, 75, 85 dan 95°C) kemudian dimasukkan ke *microwave* dengan daya gelombang mikro 360 Hz serta variasi (10, 20, 30, 40, dan 50 menit).

1.6 Manfaat

Manfaat pada penelitian ini yaitu

1. Memberikan informasi tentang pengaruh variasi suhu pada metode *alkaline pretreatment* dan *alkaline microwave-assisted pretreatment* terhadap komposisi biomassa batang pisang.
2. Memberikan informasi mengenai pengaruh variasi waktu kontak pada metode *alkaline pretreatment* dan *alkaline microwave-assisted pretreatment* terhadap komposisi biomassa batang pisang.
3. Batang pisang dapat dimanfaatkan secara optimal sebagai sumber bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan.
4. Menambah nilai jual terhadap limbah batang pisang.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, R. (2016). *Pengaruh Ekstrak Abu Kayu Keras Dan Komposisi Serat Pisang Klutuk (Musa Balbisiana Colla) Terhadap Karakteristik Serat Kain*.
- Akbar, M., Putra, H., & Purnama, H. (2019). Pengaruh Waktu Pengeringan dan Rasio Bahan Baku/Starter Zymomonas Mobilis Pada Pembuatan Bioethanol dari Limbah Kulit Kopi Robusta. *Simposium Nasional RAPI XVIII – 2019 FT UMS, 1963*, 420–425.
- Arjeni, R., Hasan, A., & Syarif, A. (2022). Analisa Konsentrasi NaOH dan Temperatur Pemanasan Terhadap Kadar Selulosa dan Kadar Lignin dari Batang Pisang Klutuk Menggunakan Alat Delignifikasi sebagai Bahan Baku Pembuatan Bioetanol. *Jurnal Inovator*, 5(1), 18. <https://doi.org/10.37338/ji.v5i1.219>
- Badan Pusat Statistik. (2021). *Produksi Tanaman Buah-Buahan*.
- Badan Pusat Statistik dan Direktorat Jenderal Hortikultura. (2019). *Luas Panen Pisang Menurut Provinsi , Tahun 2015-2019* (Vol. 2019).
- Baksi, S., Sarkar, U., Saha, S., Ball, A. K., Chandra Kuniyal, J., Wentzel, A., Birgen, C., Preisig, H. A., Wittgens, B., & Markussen, S. (2019). Studies on delignification and inhibitory enzyme kinetics of alkaline peroxide pre-treated pine and deodar saw dust. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 143(November 2018), 107607. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107607>
- Budianto, A., Sari, A. R., Monica, Y. W., Ningsih, E., & Kusdarini, E. (2021). Proses Pembuatan Biofuel dengan Metode perengakahan Menggunakan Katalis Padat. *Journal of Industrial Process and Chemical Engineering (JOICHE)*, 1(1), 25. <https://doi.org/10.31284/j.joiche.2021.v1i1.2116>
- Chang, X., Bai, Y., Wu, R., Liu, D., & Zhao, X. (2020). Heterogeneity of lignocellulose must be considered for kinetic study: A case on formic acid fractionation of sugarcane bagasse with different pseudo-homogeneous kinetic models. *Renewable Energy*, 162, 2246–2258. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.029>
- Chi, X., Liu, C., Bi, Y. H., Yu, G., Zhang, Y., Wang, Z., Li, B., & Cui, Q. (2019).

- A clean and effective potassium hydroxide pretreatment of corncob residue for the enhancement of enzymatic hydrolysis at high solids loading. *RSC Advances*, 9(20), 11558–11566. <https://doi.org/10.1039/C9RA01555H>
- Datta, R. (1981). Acidogenic fermentation of Lignocellulose–Acid Yield and Conversion of Components. *Biotechnology and Bioengineering*, 23(9), 2167–2170. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/bit.260230921>
- Ditia, A., Bardant, T. B., Utami, A. R. I., Maryana, R., Irawan, Y., Muryanto, M., Triwahyuni, E., & Sudiyani, Y. (2021). Telaah Potensi Penerapan Teknologi Terkini pada Hidrolisis Selulosa dengan Sistem Pengendalian Terintegrasi dalam Proses Bioetanol G2. *JURNAL SELULOSA*, 11(01), 21. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.25269/jsel.v11i01.320>
- Dong, L., Zhao, X., & Liu, D. (2015). Kinetic modeling of atmospheric formic acid pretreatment of wheat straw with “potential degree of reaction” models. *RSC Advances*, 5(27), 20992–21000. <https://doi.org/10.1039/c4ra14634d>
- Gao, J., Yang, X., Wan, J., He, Y., Chang, C., Ma, X., & Bai, J. (2016). Delignification Kinetics of Corn Stover with Aqueous Ammonia Soaking Pretreatment. *BioResources*, 11(1), 2403–2416. <https://doi.org/10.15376/BIORES.11.1.2403-2416>
- Ghazy, M. (2016). Effect of temperature and time on the kraft pulping of Egyptian bagasse. *International Journal of Science and Research*, 5(2), 179–184.
- Hamidah, Y. N. (2021). *Analisis Kadar Air - Thermogravimetri (SNI-01-2354.2-2006)*. <https://doi.org/10.1002/ejoc.201200111>
- Ihsan, D. M. (2022). *Optimasi Delignifikasi Tandan Kosong Kelapa Sawit menggunakan Batch lab-Scale dan Ekstruksi pada Reaktor Kontinu untuk Produksi Bioetanol*.
- Kamalini, A., Muthusamy, S., Ramapriya, R., Muthusamy, B., & Pugazhendhi, A. (2018). Optimization of sugar recovery efficiency using microwave assisted alkaline pretreatment of cassava stem using response surface methodology and its structural characterization. *Journal of Molecular Liquids*, 254, 55–63. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.01.091>
- Kassim, M. A., Meng, T. K., Seng, K. Y., & Serri, N. A. (2019). Alkaline-assisted microwave pretreatment of tetraselmis suecica biomass for fed-batch

- enzymatic hydrolysis. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 51(2), 272–289. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2019.51.2.8>
- Kawamata, Y., Yoshikawa, T., Aoki, H., Koyama, Y., Nakasaka, Y., Yoshida, M., & Masuda, T. (2019). Kinetic analysis of delignification of cedar wood during organosolv treatment with a two-phase solvent using the unreacted-core model. *Chemical Engineering Journal*, 368, 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.103>
- Khururoh, I. Ha. (2019). *Pengaruh Fraksi Volume Bahan terhadap Sifat Mekanik Komposit Berpenguat Serat Sisal untuk Aplikasi Lambung Kapal* (Vol. 8, Issue 5).
- Kim, J. S., Lee, Y. Y., & Kim, T. H. (2016). A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 199, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.085>
- Kolo, S. M. D., & Edi, E. (2018). Hidrolisis Ampas Biji Sorgum dengan Microwave untuk Produksi Gula Pereduksi sebagai Bahan Baku Bioetanol. *Jurnal Saintek Lahan Kering*, 1(2), 22–23. <https://doi.org/10.32938/slk.v1i2.596>
- Kurniati, S., S., S., Galla, W. F., & Nursalim. (2020). *Pembuatan Biodiesel Dari Minyak Nyamplung (Calophyllum inophyllum L.) Dengan Katalis KOH Menggunakan Gelombang Mikro (Microwave)*. Universitas Nusa Cendana.
- Lange, F., Queiroz, P., Henrique, P., Ghiraldi, C., Bueno, R., Carlos, F., Souza, W. De, Sant, C., & Brienzo, M. (2018). Industrial Crops & Products Acid , alkali and peroxide pretreatments increase the cellulose accessibility and glucose yield of banana pseudostem. *Industrial Crops & Products*, 115(February), 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.024>
- Lismeri, L., Darni, Y., Sanjaya, M. D., & Immadudin, M. I. (2019a). *Pengaruh Suhu Dan Waktu Pretreatment Alkali Pada Isolasi Selulosa Limbah Batang Pisang*. 4(June), 17–22.
- Lismeri, L., Darni, Y., Sanjaya, M. D., & Immadudin, M. iqbal. (2019b). Pengaruh Suhu dan Waktu Pretreatment Alkali pada Isolasi Selulosa Limbah Batang Pisang. *Journal of Chemical Process Engineering*, 4.
- Low, J. C., Halis, R., Md Shah, U. K., Tahir, P., Abood, F., Tukimin, T., Idris, M. D., Lanika, L., & Razali, N. (2015). Enhancing enzymatic digestibility of

- alkaline pretreated banana pseudostem for sugar production. *BioResources*, *10*(1), 1213–1223. <https://doi.org/https://doi.org/10.15376/biores.10.1.1213-1223>
- Mirmohamadsadeghi, S., Karimi, K., Azarbaijani, R., Dashora, K., Kumar, V., Aghbashlo, M., & Kumar, V. (2021). Pretreatment of lignocelluloses for enhanced biogas production : A review on influencing mechanisms and the importance of microbial diversity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *135*(August 2019), 110173. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110173>
- Moodley, P., & Gueguim Kana, E. B. (2017). Development of a steam or microwave-assisted sequential salt-alkali pretreatment for lignocellulosic waste: Effect on delignification and enzymatic hydrolysis. *Energy Conversion and Management*, *148*, 801–808. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.056>
- 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 and Catalysis*, *16*(1), 31–43. <https://doi.org/10.9767/BCREC.16.1.8872.31-43>
- Mulyadi, I. (2019). Isolasi Dan Karakterisasi Selulosa : Review. *Jurnal Saintika Unpam : Jurnal Sains Dan Matematika Unpam*, *1*(2), 177. <https://doi.org/10.32493/jsmu.v1i2.2381>
- Nadia, A., Mada, U. G., Fauziah, A., Sunardi, S., & Mangkurat, U. L. (2017). *POTENSI LIMBAH LIGNOSELULOSA KELAPA SAWIT DI KALIMANTAN SELATAN UNTUK PRODUKSI BIOETANOL DAN XYLITOL Potential of Lignocellulosic Oil Palm Waste in South Kalimantan for Bioethanol ... Potential of Lignocellulosic Oil Palm Waste in South Kalimantan for. January.*
- Nation, United Department of Economic and Social Affairs, P. D. (2022). *World Population Prospects 2022.*
- Naufal, A. D. (2018). *Pembuatan Bioetanol Secara Fermentasi dari Selulosa yang di Isolasi dari Batang Pisang Kepok (Musa Paradisiaca L.) Menggunakan*

- Ragi Roti (Saccharomyces Cerevisiae)*. Universitas Sumatera Utara.
- Novia, N., Hasanudin, H., Hermansyah, H., & Fudholi, A. (2022). Kinetics of Lignin Removal from Rice Husk Using Hydrogen Peroxide and Combined Hydrogen Peroxide–Aqueous Ammonia Pretreatments. *Fermentation*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/fermentation8040157>
- Novia, Wijaya, D., & Yanti, P. (2017). Pembuatan Bioetanol Dari Sekam Padi. *Teknik Kimia*, 23(1), 19–27.
- Oliveira, G. Q. de, do Nascimento, R. A., Costa, J. F., Santana, E. B., Costa, C. M. L., & Ribeiro, N. F. da P. (2022). Drying of Banana Pseudo-stem Fibers: Evaluation of Kinetic Models, Effective Diffusivity, Thermodynamic Properties, and Structural Characterization. *Journal of Natural Fibers*, 19(10), 3654–3667. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1848717>
- Permata, D. A., Kasim, A., Asben, A., & Yusniwati. (2021). Delignification of Lignocellulosic Biomass. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 12(2), 462–469. <https://doi.org/https://doi.org/10.30574/wjarr.2021.12.2.0618>
- Putri, D. K., & Sutri, R. (2023). *Pre-Treatment Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Bahan Baku Bioetanol dengan Bantuan Gelombang Microwave*. 8, 43–48.
- Putro, J. N., Soetaredjo, F. E., Lin, S., Ju, Y., & Ismadji, S. (2016). *RSC Advances Pretreatment and conversion of lignocellulose biomass into valuable chemicals*. 46834–46852. <https://doi.org/10.1039/c6ra09851g>
- Ralph, J., Lapierre, C., & Boerjan, W. (2019). Lignin structure and its engineering. *Current Opinion in Biotechnology*, 56, 240–249. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.02.019>
- Rosadah, M. F. (2020). *Pengaruh Lama Waktu Pemaparan Gelombang Mikro Terhadap Ekstraksi Daun Pepaya (Carica Papaya L.)*.
- Rosyidin, K., Khaharudin, Y., Amin, R., Andriani, N. K., & Maharani, D. M. (2015). *Assisted Pretreatment with Microwave Heating untuk Peningkatan Kadar Selulosa Batang Pisang pada Produksi Bioetanol*. 2015(Snips), 33–36.
- Sarah, M., & Misran, E. (2020). *Konversi Tandan Kosong Kelapa Sawit Menjadi Bahan Baku Bioethanol Menggunakan Rotating Microwave Reactor*.
- Sari, N. K. (2018). Pembuatan Bioetanol dari Rumput Gajah dengan Distilasi

- Batch. *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*, 8(3), 94.
<https://doi.org/10.5614/jtki.2009.8.3.4>
- Sari, P. D., Puri, W. A., & Hanum, D. (2018). *Delignifikasi Bonggol Jagung dengan metode Microwave Alkali*. 12.
<https://doi.org/https://doi.org/10.31328/ja.v12i2.767>
- Savana, R. T., & Maharani, D. K. (2018). Analisis Komposisi Unsur Pupuk Lepas Lambat Kitosan-Silika- Glutaraldehyd. *Unesa Journal of Chemistry*, 7(1), 21–24.
- Selman, M. A. K. (2019). *Delignifikasi Biomassa Lignosedari Larva Cossus-cossus dalam Produksi Biofuel Generasi Kedua*. 45(45), 95–98.
- Sharma, H. K., Xu, C., & Qin, W. (2019). Biological Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Biofuels and Bioproducts: An Overview. *Waste and Biomass Valorization*, 10(2), 235–251. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0059-y>
- Shrivastava, D. K., Singh, A. K., & Chakraborty, J. P. (2023). Model-free isoconversional methods to determine the intrinsic kinetics and thermodynamic parameters during pyrolysis of boiled banana peel: influence of inorganic species. *Bioresource Technology Reports*, 24(October), 101676. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101676>
- Sidana, A., & Yadav, S. K. (2022). Recent developments in lignocellulosic biomass pretreatment with a focus on eco-friendly, non-conventional methods. *Journal of Cleaner Production*, 335(September 2021), 130286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130286>
- Sina, N. W. F., Sukmaria, A. A., & Redjeki, S. (2020). Studi Kinetika Reaksi Fermentasi Selulosa Tongkol Jagung menggunakan Enzim Selulase pada Reaktor Batch. *ChemPro*, 1(02), 14–19. <https://doi.org/10.33005/chempro.v1i02.80>
- Sivanarutselvi, P. Poornima, Muthukumar, & Velan, M. (2019). *Studies on effect of alkali pretreatment of banana pseudostem for fermentable sugar production for biobutanol production*. 40(May), 2019.
- Susilo, B., Damayanti, R., & Izza, N. (2017). *Teknik Bioenergi*. UB Press. <https://books.google.co.id/books?id=KDhTDwAAQBAJ&printsec=frontcov>

er&hl=id#v=onepage&q&f=false

- Sutini, S., Widiastuty, Y. R., & Ramadhani, A. N. (2020). Review: Hidrolisis Lignoselulosa dari Agricultural Waste Sebagai Optimasi Produksi Fermentable Sugar. *Equilibrium Journal of Chemical Engineering*, 3(2), 59. <https://doi.org/10.20961/equilibrium.v3i2.42788>
- Tripathi, N., Hills, C. D., Singh, R. S., & Atkinson, C. J. (2019). Biomass waste utilisation in low-carbon products: harnessing a major potential resource. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 2(1). <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0093-5>
- Winarsih, S. (2016). *Pengaruh Konsentrasi NaOH dan Lama Pemaparan Microwave terhadap Kandungan Selulosa, Hemiselulosa dan Lignin Tongkol Jagung*. 285–290.
- Xing, W., Xu, G., Dong, J., Han, R., & Ni, Y. (2018). Novel dihydrogen-bonding deep eutectic solvents: Pretreatment of rice straw for butanol fermentation featuring enzyme recycling and high solvent yield. *Chemical Engineering Journal*, 333, 712–720. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.176>
- Yiin, C. L., Yusup, S., Quitain, A. T., Uemura, Y., Sasaki, M., & Kida, T. (2018). Delignification kinetics of empty fruit bunch (EFB): a sustainable and green pretreatment approach using malic acid-based solvents. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(9), 1987–2000. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1592-5>
- Zhou, M., & Tian, X. (2022). Development of different pretreatments and related technologies for efficient biomass conversion of lignocellulose. *International Journal of Biological Macromolecules*, 202(January), 256–268. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.036>
- Zhou, X., Li, W., Mabon, R., & Broadbelt, L. J. (2017). A critical review on hemicellulose pyrolysis. *Energy Technology*, 5(1), 52–79. <https://doi.org/10.1002/ente.201600327>