

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada bulan April-Juni 2026 di Laboratorium Teknik Kimia Politeknik Negeri Sriwijaya dengan berjudul **“Produksi Bioetanol dari Sabut Kelapa dengan Metode *Simultaneous Saccharification Fermentation* (SSF) Ditinjau dari Pengaruh Konsentrasi NaOH dan Daya Microwave”** diperoleh hasil penelitian data hasil analisa, pengamatan dan perhitungan yang dapat dilihat pada **Tabel 4.1** sampai dengan **Tabel 4.3**.

Tabel 4 1 Hasil Pengamatan Kadar Lignin dengan Konsentrasi NaOH dan Daya Microwave sebelum dan sesudah Pretreatment

Konsentrasi NaOH (M)	Daya <i>Microwave</i> (W)	Sebelum <i>Pretreatment</i> Kadar Lignin (%)	Kadar Lignin Setelah <i>Pretratment</i> (%)	Kadar Penurunan Lignin (%)
0.5	400	34	26.5	22.06
	450		25.2	25.88
	500		24.3	28.53
	550		22.8	32.94
	600		21.5	36.76
1	400		18.8	44.71
	450		17.5	48.53
	500		16.3	52.06
	550		15.9	53.24
	600		14.2	58.24
1.5	400		13.8	59.41
	450		12.2	64.12
	500		11.8	65.29
	550		10.3	69.71
	600		9.8	71.18

Tabel 4 2 Hasil Produksi Bioetanol dengan Metode *Simultaneous Saccharification and Fermentation*

Berat Sampel (gr)	Konsentrasi NaOH (M)	Daya Microwave (W)	Kadar Lignin Setelah Pretreatment (%)	Volume Etanol (mL)	Kadar Etanol (%)
250	0.5	400 450	26.5	150 154	14
		500	25.2	154	17
			24.3		18
		550	22.8	156	18
		600	21.5	153	17
250	1	400 450	18.8	160 168	21
		500	17.5	178	24
			16.3		26
		550	15.2	204	20
		600	14.2	206	17
250	1.5	400	13.8	208	17
		450	12.2	206	18
		500	11.8	210	18
		550	10.3	210	15
		600	9.8	210	13

Tabel 4 3 Hasil Sampel optimum yang dianalisa

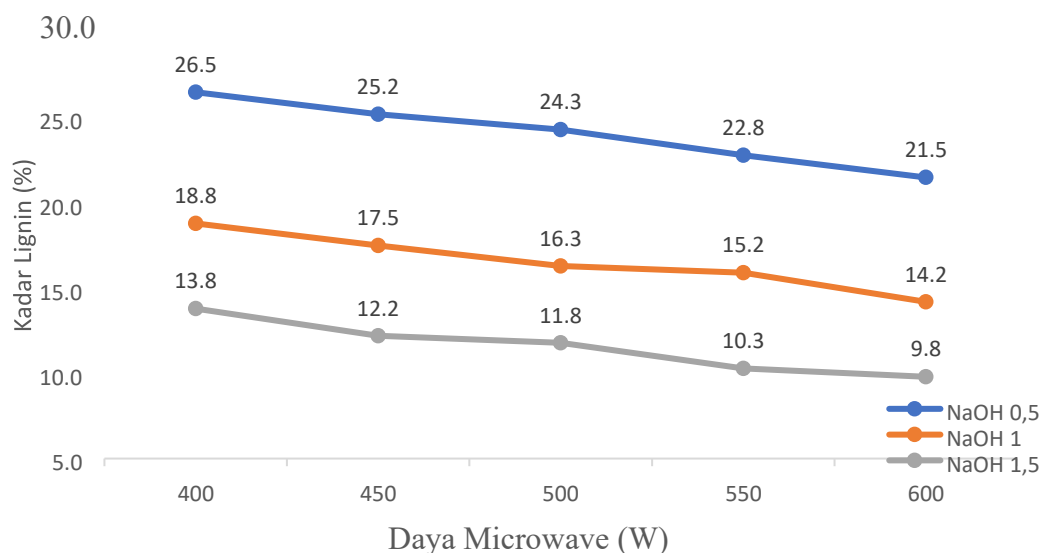
Nama Sampel	Kadar L Lignin (%)	Kadar Gula (%)	pH Etanol	Kadar Etanol (%)	Titik Nyala Api (°C)
1 M + 500 Watt	16.3	10	7	26	43.7

4.2 Pembahasan

Penelitian ini menggunakan sabut kelapa sebagai bahan baku yang akan diproses menjadi bioetanol. Kadar lignin awal sabut kelapa sebelum dilakukan proses pretreatment yaitu sebesar 34%, yang dianalisa menggunakan Metode Chesson-Datta. Sebelum proses *pretreatment*, sabut kelapa terlebih dahulu dicacah untuk memperkecil ukuran partikel sehingga memperluas luas permukaan kontak antara bahan dengan larutan NaOH dan energi gelombang mikro. Sebanyak 40 gram sabut kelapa untuk setiap sampel dilarutkan menggunakan larutan NaOH dengan variasi konsentrasi (0,5 M; 1 M; dan 1,5 M) dan dipanaskan menggunakan microwave dengan variasi daya (400 W; 450 W; 500 W; 550 W; dan 600 W) selama 20 menit.

Penggunaan *microwave* bertujuan untuk mempercepat reaksi antara NaOH dengan struktur lignoselulosa melalui pemanasan yang lebih merata. Pemilihan NaOH sebagai bahan kimia alkali merupakan basa kuat yang dapat terdissosiasi sempurna dalam air menghasilkan ion Na^+ dan OH^- dalam jumlah besar yang berperan aktif memutus ikatan ester dan eter pada struktur lignin serta melarutkan sebagian hemiselulosa, sehingga struktur lignoselulosa menjadi lebih terbuka dan selulosa mudah diakses oleh enzim selulase pada tahap SSF, dibandingkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang kelarutannya dalam air rendah (sehingga ion OH^- yang dihasilkan terbatas dan reaksi delignifikasi berjalan lebih lambat), NaOH memberikan hasil delignifikasi yang lebih cepat dan konsisten pada konsentrasi yang sama. (Hoang et al., 2021). *Simultaneous Saccharification and Fermentation* (SSF) merupakan metode produksi bioetanol yang proses hidrolisis (sakarifikasi) dan fermentasi berlangsung secara bersamaan dalam satu reaktor. Pada metode ini, enzim selulase berkerja menguraikan selulosa menjadi glukosa, sementara pada waktu yang sama mikroorganisme seperti *Saccharomyces cereviae* mengonversi glukosa tersebut menjadi etanol. Adapun kelebihan utama metode SSF terletak pada kemampuannya mengurangi terjadinya inhibisi enzim akibat penumpukan produk hidrolisis dan juga dinilai lebih unggul dari sisi efisiensi energi dan biaya operasional dengan menggabungkan dua tahap proses menjadi satu kebutuhan peralatan menjadi lebih sedikit dan waktu produksi lebih singkat (Kamal et al, 2023). Sedangkan

pada metode *Separate Hydrolysis and Fermentation* (SHF) yang memisahkan tahap hidrolisis dan tahap fermentasi menjadi dua proses berurutan dengan kondisi operasi yang diatur secara terpisah pada metode ini inhibisi produk yang dimana gula hasil hidrolisis menumpuk dan menghambat kerja enzim selulase sebelum sempat di fermentasi butuh dua reaktor dengan tahap terpisah dan waktu proses lebih lama (Tse et al., 2021).



Gambar 4 1 Grafik Pengaruh Daya Microwave Terhadap Proses Pretreatment pada Kadar Lignin

Berdasarkan data pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.3, peningkatan konsentrasi NaOH dari 0,5 M hingga 1,5 M secara konsisten mampu menurunkan kadar lignin sabut kelapa setelah proses *pretreatment*. Pada konsentrasi NaOH 0,5 M, kadar lignin setelah pretreatment masih berada pada kisaran 21,5% hingga 26,5%, dengan efisiensi delignifikasi yang hanya mencapai 22,06% hingga 36,76%. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi alkali yang rendah belum mampu memutus ikatan lignin-selulosa secara menyeluruh.

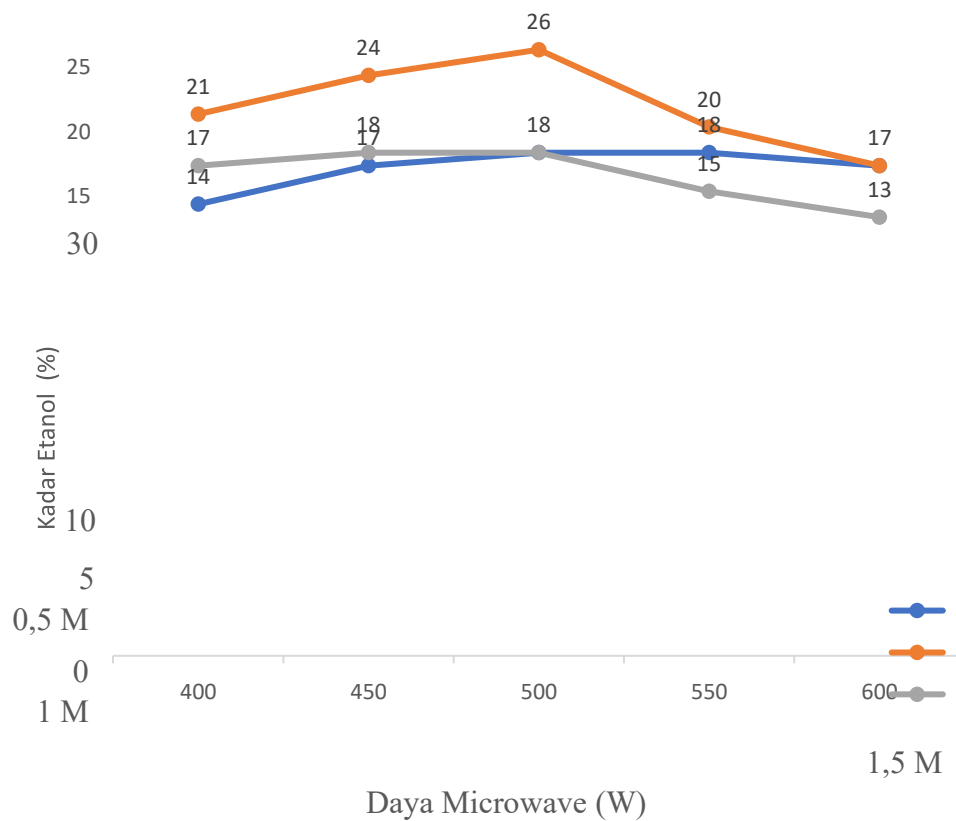
Pada konsentrasi NaOH 1 M, terjadi penurunan lignin yang lebih signifikan dengan kadar lignin tersisa berkisar antara 14,2% hingga 18,8%, dan efisiensi delignifikasi mencapai 44,71% hingga 58,24%. Mekanisme kerja NaOH dalam proses delignifikasi adalah ion OH^- yang bersifat nukleofil menyerang dan memutus ikatan ester antara lignin dengan polisakarida, sehingga struktur matriks lignoselulosa terbuka dan selulosa menjadi lebih mudah diakses enzim selulase (Khairiah & Ridwan, 2021).

Pretreatment alkali juga menyebabkan pengembangan selulosa (swelling) yang menurunkan kristalinitas dan derajat polimerisasi, sehingga meningkatkan luas permukaan internal dan aksesibilitas selulosa terhadap enzim (Jablonowski et al., 2022).

Pada konsentrasi NaOH 1,5 M, lignin yang tersisa turun lebih jauh menjadi 9,8% hingga 13,8% dengan efisiensi delignifikasi tertinggi mencapai 71,18% (pada daya 600 W). Secara teoritis, semakin tinggi konsentrasi NaOH maka semakin besar kemampuan ion OH^- dalam mendegradasi dan melarutkan lignin dari matriks lignoselulosa (Zulnazri dkk., 2022). Hal ini sesuai dengan pernyataan bahwa konsentrasi NaOH yang lebih tinggi berkorelasi positif dengan penurunan kadar lignin (Selvia dkk., 2025).

Adapun pengaruh daya microwave juga menunjukkan tren yang konsisten. Semakin tinggi daya microwave yang digunakan, semakin rendah kadar lignin yang tersisa. Pada setiap level konsentrasi NaOH, peningkatan daya dari 400 W ke 600 W menghasilkan penurunan lignin yang lebih besar. Energi gelombang mikro yang lebih tinggi menyebabkan getaran molekuler yang lebih intensif sehingga mempercepat penetrasi NaOH ke dalam struktur lignoselulosa dan mempercepat pemutusan ikatan lignin (Gude et al., 2023; Mikulski & Kłosowski, 2022).

Kondisi optimal *pretreatment* berdasarkan pertimbangan keseimbangan antara efisiensi delignifikasi dan keutuhan selulosa untuk proses SSF diperoleh pada konsentrasi NaOH 1 M dengan daya microwave 500 W, menghasilkan kadar lignin sesudah *pretreatment* sebesar 16,3% (penurunan 52,06%). Meskipun konsentrasi 1,5 M menghasilkan penurunan lignin yang lebih tinggi, namun pada konsentrasi berlebih, ion OH^- yang tidak selektif dapat menyerang ikatan dalam struktur selulosa itu sendiri sehingga sebagian selulosa terdispersi dan ikut terbawa pada saat proses penyaringan. Hal ini menyebabkan berkurangnya substrat yang tersedia untuk proses SSF (Widodo et al., 2013; Bina et al., 2023). Selain itu, sisa NaOH yang tidak ternetralkan sempurna berpotensi menghambat aktivitas *Saccharomyces cerevisiae* dalam proses fermentasi sehingga kadar etanol yang dihasilkan justru menurun pada konsentrasi alkali yang berlebih



Gambar 4.2 Grafik Pengaruh Daya Microwave Terhadap Proses *Pretreatment* pada Kadar Etanol

Berdasarkan Tabel 4.2 dan Gambar 4.4, hasil produksi bioetanol melalui metode SSF menunjukkan bahwa kadar etanol tertinggi diperoleh pada kondisi NaOH 1 M dengan daya microwave 500 W, yaitu sebesar 26% dengan volume etanol 178 mL. Hasil ini berbanding lurus dengan tingkat penurunan lignin yang optimal pada kondisi tersebut, di mana kadar lignin setelah pretreatment turun menjadi 16,3%.

Pada konsentrasi NaOH 0,5 M, kadar etanol yang dihasilkan berkisar antara 14% hingga 18%. Kadar lignin yang masih relatif tinggi (21,5%–26,5%) menghambat akses enzim selulase terhadap selulosa, sehingga konversi selulosa menjadi glukosa tidak berlangsung optimal. Hal ini menyebabkan ketersediaan substrat glukosa bagi *Saccharomyces cerevisiae* dalam proses fermentasi menjadi terbatas (Arruda et al., 2021).

Pada konsentrasi NaOH 1 M, kadar etanol meningkat secara signifikan seiring peningkatan daya microwave dari 400 W (kadar etanol 21%) hingga mencapai puncaknya pada 500 W (kadar etanol 26%). Penurunan kadar lignin yang lebih besar pada kondisi ini memungkinkan enzim selulase bekerja lebih efektif dalam menguraikan selulosa menjadi glukosa, yang kemudian difermentasi oleh *Saccharomyces cerevisiae* menjadi etanol secara simultan dalam proses SSF (Tse et al., 2021; Saini et al., 2022). Keunggulan metode SSF yaitu glukosa yang terbentuk dari hidrolisis enzimatis langsung dikonsumsi oleh mikroorganisme fermentasi sehingga tidak terjadi akumulasi produk yang dapat menghambat aktivitas enzim (Kamal et al., 2023). Namun, pada daya 550 W dan 600 W dalam konsentrasi NaOH 1 M, kadar etanol justru mengalami penurunan menjadi 20% dan 17% adapun pada konsentrasi NaOH 1,5 M di mana kadar etanol menurun seiring meningkatnya daya microwave. Hal ini dapat dijelaskan melalui dua mekanisme yaitu daya microwave yang terlalu tinggi dapat menghasilkan panas berlebih yang menyebabkan degradasi termal pada sebagian struktur selulosa, sehingga mengurangi substrat yang tersedia (Ethaib et al., 2015).

Pada konsentrasi NaOH 1,5 M dengan daya tinggi, degradasi lignin yang berlebihan disertai kerusakan parsial selulosa mengakibatkan penurunan rendemen etanol secara nyata (Selvia dkk., 2025).

Secara keseluruhan, kondisi optimum dalam penelitian ini dicapai pada kombinasi NaOH 1 M dan daya microwave 500 W dengan lama waktu perlakuan pretreatment 20 menit (0,33 jam) maka didapat analisis konsumsi energi menggunakan satu batch pretreatment, yaitu 40 gr sabut kelapa yang dilarutkan dalam 400 mL larutan NaOH 1 M, mengacu pada kondisi optimum pada hasil penelitian ini (NaOH 1 M daya microwave 500 W) biaya listrik yang dibutuhkan per batch sekitar 0,167 kWh dengan estimasi biaya listrik hanya Rp. 241 per batch sementara itu pada metode hot plate stirrer dengan labu reflux yang berdaya sekitar 350 W pada proses pretreatment umumnya membutuhkan waktu lebih lama yaitu sekitar 60-90 menit (1-1,5 jam), sehingga energi yang dikonsumsi mencapai 0,35- 0,53 kWh. Biaya listrik dihitung menggunakan tarif dasar listrik golongan B-2/TR (daya 6.600 VA – 200 kVA) sebesar Rp1.444,70

per kWh yang berlaku pada Triwulan III 2026 (PLN, 2026), sebagai acuan tarif untuk skala laboratorium/industri kecil. Perhitungan biaya energi menggunakan persamaan yaitu : Biaya Energi (Rp) = Daya (kW) × Waktu (jam) × Tarif Listrik (Rp/kWh) Parameter metode microwave diambil langsung dari kondisi optimum hasil penelitian, yaitu daya 500 W selama 20 menit (0,33 jam). Pada parameter metode ekstraksi fisika (konvensional) diacu dari kajian literatur (Hoang et al., 2021; Mikulski & Kłosowski, 2022) yang menyatakan bahwa pemanasan konvensional bersifat konduksi dari permukaan luar bahan menuju bagian dalam, sehingga membutuhkan waktu pemaparan panas yang jauh lebih lama untuk mencapai tingkat pemutusan struktur lignin yang setara dengan pemanasan microwave. Berdasarkan analisa perbandingan metode yang digunakan pada daya pemanas konvensional (hot plate/heating mantle) sebesar 600 W dengan waktu proses 90 menit (1,5 jam) sebagai representasi umum metode ekstraksi fisika.

Berikut hasil dari analisa GC-MS pada pengecekan sampel optimum NaOH 1 M + Daya Microwave 500 W pada hasil distilasi menunjukkan etanol 40,33% Pada analisa sampel optimum NaOH 1 M + Daya Microwave 500 W pengukuran kadar etanol menggunakan alkoholmeter menghasilkan kadar etanol 26% dengan volume etanol sebanyak 173 mL. Nilai ini merupakan kadar etanol tertinggi diantara seluruh variasi konsentrasi NaOH dan daya microwave yang diuji pada tahap pretreatment dalam penurunan kadar lignin sabut kelapa yaitu dari 34% menjadi 16,3%, dengan efisiensi delignifikasi sebesar 52,06% penurunan kadar lignin yang optimal ini membuka struktur lignolelulosa sehingga selulosa menjadi lebih mudah diakses enzim selulase dengan hasil kadar gula 10%, pH 7, dan titik nyala api 43,7°C.