

Available online at: <http://reactor.poltekatiptdg.ac.id/>

**REACTOR**  
Journal of Research on Chemistry and Engineering

| ISSN Online 2746-0401 |



# Pengembangan Teknologi Tepat Guna Untuk Produksi Bioetanol Skala Komunitas. Studi Kasus Pemanfaatan Rumput Laut *Sargassum Sp.* di Gunungkidul, Yogyakarta.

Eko Setiawan<sup>1</sup>, Muh Arif Wibisono<sup>1\*</sup>, Ferry Ikhsandy<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika no.2, Kampus UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia.

<sup>2</sup> Politeknik Industri Petrokimia Banten, Jl. Raya Karang Bolong, Cikoneng, Kec. Anyar, Kab. Serang, Banten 42166, Indonesia.

## ARTICLE INFORMATION

Received: April 15, 2026  
Revised: May 22, 2026  
Available online: June 5, 2026

## KEYWORDS

Bioetanol, *Sargassum sp.*, teknologi tepat guna, hidrolisis asam, ekonomi sirkular

## CORRESPONDENCE

Name: Muh Arif Wibisono  
E-mail: arifwibisono@ugm.ac.id

## A B S T R A C T

*Seaweed (Sargassum sp.) in Gunungkidul has potential as a third-generation bioethanol feedstock, but its development remains constrained by low conversion efficiency and reliance on laboratory-scale equipment. This study examines bioethanol production using an appropriate technology approach with equipment available in domestic market and evaluates the effect of HCl (1-5%) and silicone antifoam addition (0.07-0.14% w/v) on the stability of the hydrolysis process. The experimental results showed that hydrolysis without antifoam produced uncontrollable foam with material loss up to 16%. Antifoam addition successfully controlled the foam, reduced loss to 5%, and increased Brix to 6-8%. Field measurements with a refractometer showed ethanol content of 22% (v/v), but laboratory verification using gas chromatography (GC) revealed ethanol content of 0.09% and total sugar in dried seaweed of 0.04%, far below literature values. This discrepancy proves that the refractometer overestimation is due to dissolved solids interference. Additionally, during the hydrolysis process, corrosion on SS304 and Cl<sub>2</sub> gas were identified, requiring pH neutralization mitigation and scrubber system. Solid waste from fermentation has potential as an organic fertilizer mixture with water content of 91.35%, C-Organic of 0.975%, Total N of 0.07%, K<sub>2</sub>O of 0.565%, and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> of 0.070%. Integration with downstream industries such as the alginate industry (HCl 3% scenario) save consumption NaOH by 35,63% and HCl by 14,36%. This study concludes that appropriate technology framework is feasible for replication at the community scale, however, pretreatment optimization on raw material and standardized testing validation needs to be established and controlled.*

## PENDAHULUAN

Ketergantungan terhadap bahan bakar fosil telah menjadi masalah fundamental yang dihadapi pemerintah Indonesia. Pada tahun 2023, kebutuhan bahan bakar minyak secara nasional mencapai 518 juta barel, sementara produksi dalam negeri baru bisa memenuhi kebutuhan sebesar 42,66% [1]. Untuk mengatasi hal ini, pemerintah mengeluarkan Peraturan Menteri ESDM no 4 tahun 2025 tentang program mandatori bioetanol 10% (E10) pada Tahun 2026 [2]. Kebijakan ini menuntut percepatan pengembangan rantai pasok bioetanol yang

terjangkau dan dapat diadopsi pada daerah dengan penghasil biomassa.

Penelitian ini menggunakan pendekatan Teknologi Tepat Guna (TTG) sebagai strategi utama untuk pengembangan produksi bioetanol skala komunitas. Teknologi tepat guna didefinisikan sebagai teknologi dengan penggunaan bahan baku lokal, investasi rendah, mudah dioperasikan, dirawat, dan diperbaiki dengan sumber daya lokal yang sesuai dengan kondisi sosial, ekonomi, dan budaya setempat [3]. Semua peralatan dan bahan yang digunakan tersedia di pasar atau marketplace, sehingga komunitas dapat mereplikasinya. Ketersediaan rumput laut di Gunungkidul mencapai 169,6 ton/ tahun kering. Dan

berdasarkan wawancara langsung dengan UD Rumput Laut Mandiri pada 07 Juli 2025, jenis rumput laut *Sargassum sp.* dapat menghasilkan 35 ton/tahun kering dan selama ini pengolahan berfokus pada bahan baku pupuk [4]. Pemilihan Gunungkidul sebagai lokasi studi tidak hanya karena potensi yang belum dikembangkan secara optimal, tetapi juga karena karakter geografis wilayah pesisir yang banyak mewakili banyak daerah di Indonesia yang belum mengoptimalkan biomassa laut sebagai energi terbarukan. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi contoh model nasional. Bioetanol merupakan salah satu bahan bakar terbarukan yang dapat diproduksi dari biomassa. Rumput laut sebagai bioetanol generasi ketiga, tidak mengandung lignin sehingga lebih mudah dihidrolisis menjadi gula sederhana [5], [6], selain itu biomassa akuatik ini menjadi solusi strategis karena tidak bersaing dengan produk pangan, tidak memerlukan irigasi, pupuk, lahan subur dan memiliki laju pertumbuhan yang cepat [7]. Keuntungan lainnya, Indonesia merupakan produsen rumput laut terbesar didunia dengan kapasitas 9,9 juta ton pada tahun 2021 [8]. Tabel 1. menyajikan perbandingan potensi bioethanol dari berbagai bahan baku berdasarkan literatur.

Tabel 1. Perbandingan potensi bioetanol dari berbagai bahan baku.

Bahan Baku	Etanol	Referensi
Serat Sorgum	0,25 g/g	Salvi [9]
Ubi Jalar	0,21 g/g	Wang [10]
Jerami Gandum	0,3 g/g	Chen [11]
Jerami Jagung	0,3 g/g	Varga [12]
Kayu Aspen	0,28 g/g	Zhu [13]
Molasses	0,31 g/g	Hawaz [14]
Sari Tebu	0,55 g/g	Gupta [15]
Rumput Laut ( <i>Sargassum sp.</i> )	0,46 g/g	Kadimpati [16]

Berdasarkan Tabel 1, rendemen bioetanol dari rumput laut (0,46 g/g) memiliki potensi di atas rata-rata bahan baku lignoselulosa lainnya. Pada analisis proksimat yang dilakukan oleh Indriyawati (2024) [17], *Sargassum sp.* memiliki kandungan: kadar air 8,52%, kadar abu 2,62%, protein 4,37%, lemak 0,54%, karbohidrat 73,5%, serat pangan 10,37%. Ragi yang digunakan untuk fermentasi adalah *Saccharomyces cerevisiae* dari *Angel Yeast Co.Ltd.* Asam kuat yang digunakan pada proses hidrolisis adalah HCl 37% teknis dari *Shandong Dadi Salt Chemical Group Co., Ltd.* Antifoam yang digunakan adalah SIXIN® SY-7 (*silicone emulsifier defoamer*) dari *Sixin Group.*

Reaksi kimia yang mendasari proses hidrolisis (1) mengubah polisakarida menjadi glukosa:

$$(C_6H_{11}O_5)_n + nH_2O \rightarrow nC_6H_{12}O_6 \quad (1)$$

Dilanjutkan reaksi fermentasi (2) *Saccharomyces cerevisiae* mengubah glukosa menjadi alkohol dan gas CO<sub>2</sub>:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2 \quad (2)$$

Penelitian terdahulu telah banyak mengoptimalkan produksi bioetanol dari rumput laut, Kusuma (2019) mencapai kadar etanol sebesar 24,67% menggunakan autoklaf [18], Kadimpati (2023) menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) untuk melakukan hidrolisis dengan hasil menggunakan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dan ragi *S. cerevisiae* MTCC170 dengan hasil 0,465 g etanol/gula pereduksi [16], Zeng (2020) menggunakan *semi-simultaneous saccharification and fermentation* (S-SSF) dengan ragi *Pichia stipites* menghasilkan etanol 0,11 g/g bahan baku [19]. Secara umum, mayoritas masih berfokus pada skala laboratorium dan belum membahas kendala teknis seperti pembentukan busa selama proses hidrolisis, dampak korosif pada reaktor sederhana, manajemen pengendalian gas klor dan integrasi dengan industri hilir [20], [21], [22], [23], [24]. Penelitian ini menawarkan pendekatan teknologi tepat guna dengan peralatan yang tersedia di pasar dan penggunaan antibusa untuk mengendalikan busa yang diharapkan dapat diduplikasi oleh komunitas. Fokus utama dalam penelitian ini yaitu konsentrasi HCl dan penambahan antibusa. Konsentrasi HCl dipilih karena berpengaruh pada efisiensi hidrolisis yang akan menentukan rendemen gula yang terbentuk, sementara antibusa dipilih untuk mengendalikan busa yang terbentuk, yang jika dibiarkan dapat menurunkan efektivitas reaktor dan *yield* etanol.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan teknologi tepat guna menggunakan alat sederhana yang tersedia di pasar atau *marketplace*, untuk memproduksi bioetanol dari rumput laut (*Sargassum sp.*). Mengkaji pengaruh konsentrasi HCl (1-5% v/v) terhadap efisiensi hidrolisis dan risiko korosi pada reaktor sederhana. Mengevaluasi efektivitas penambahan antibusa (0,07-0,14% b/v) terhadap stabilitas proses hidrolisis. Penelitian ini juga bertujuan untuk menghitung neraca massa dan *material loss* dengan membandingkan *yield* aktual dan stoikiometri, untuk memproyeksikan kebutuhan bahan baku dan kerugian finansial pada penerapan skenario E10 di Gunungkidul.

## METODOLOGI

### Peralatan Teknologi Tepat Guna

Penelitian ini mengadopsi prinsip teknologi tepat guna (TTG) yang menggunakan peralatan sederhana dan bahan baku yang tersedia di pasar lokal, investasi rendah, mudah dioperasikan, dirawat, dan diperbaiki dengan sumber daya lokal sesuai dengan kondisi sosial, ekonomi, dan budaya setempat. Berikut rincian peralatan yang digunakan berdasarkan tahapan proses:

*Pra-perlakuan:*

*Food chopper* kapasitas 2 liter, digunakan untuk mencacah dan homogenisasi ukuran partikel (1-2cm).

*Hidrolisis:*

Panci SS304 kapasitas 22 liter tahan terhadap asam dan panas, termometer analog untuk mengontrol suhu hidrolisis dan distilasi, refraktometer *Brix* untuk mengukur kadar gula. Untuk mengukur derajat keasaman menggunakan pH meter. Kompor gas satu tungku sebagai sumber panas. Saringan nilon ukuran 100 mesh sebagai pemisah larutan hidrolisis dan residu tak larut.

### Fermentasi:

Galon PET 15 liter sebagai bioreaktor, memiliki karakteristik transparan, ringan, dapat ditutup rapat dan mudah diperoleh. Botol PET 250 ml, selang plastik dan air sabun yang dirangkai menjadi satu unit sebagai *airlock* untuk monitoring proses fermentasi (gelembung CO<sub>2</sub>).

### Distilasi:

Menggunakan alat distilasi komersial merek *moonshine* SS304 dengan ketebalan 0,8mm, pengunci, *silicon seal*. Hidrometer Baume dan refraktometer untuk mengukur kadar alkohol.

Pemilihan peralatan diatas secara sengaja untuk menghindari ketergantungan pada peralatan yang memerlukan keahlian teknis khusus dan biaya perawatan yang tinggi.

## Prosedur Analisis

### Analisis alkohol dan Brix

Prosedur diawali dengan kalibrasi alat menggunakan akuades pada suhu 20°C untuk memastikan pembacaan nol pada skala indeks bias. Contoh cairan yang akan diuji diambil sebanyak 2-3 tetes dan ditempatkan pada prisma refraktometer, kemudian prisma ditutup dengan hati-hati agar tidak terbentuk gelembung udara. Contoh dibiarkan terdistribusi merata pada permukaan prisma, lalu refraktometer diarahkan ke sumber cahaya dan dibaca nilai indeks bias yang tertera pada skala okuler. Nilai indeks bias yang terbaca dibaca dan dicatat.

### Analisis alkohol menggunakan hidrometer Baume

Silinder ukur, dan hidrometer Baume yang bersih dan kering disiapkan. Contoh dimasukkan ke dalam silinder ukur kemudian hidrometer dimasukkan secara perlahan hingga mengapung bebas tanpa menyentuh dinding silinder. Skala hidrometer dibaca pada permukaan meniskus cairan dengan posisi mata sejajar. Nilai kadar alkohol (%v/v) dicatat.

### Analisis pH

Dilakukan kalibrasi pH meter menggunakan larutan buffer standar pH 4,0 dan 7,0. Elektroda pH meter dibilas dengan akuades dan dikeringkan perlahan dengan tisu sebelum dicelupkan ke dalam contoh. Elektroda dipastikan terendam sempurna dan ditunggu hingga pembacaan stabil. Nilai pH yang tampil dalam layar digital dicatat.

### Analisis suhu

Termometer dipastikan dalam kondisi bersih dan skala menunjukkan nilai awal yang sesuai dengan suhu ruangan. Ujung sensor termometer dicelupkan ke dalam contoh, pastikan tidak menyentuh dinding wadah. Hasil pengukuran dicatat.

### Analisis karbohidrat dengan metode Luff-Schoorl[25]

Analisis karbohidrat total dengan metode Luff-Schoorl sesuai SNI 01-2891-1992 dengan prinsip oksidasi gula pereduksi oleh larutan Luff (CuSO<sub>4</sub> dalam alkali). Ditimbang 5 gram contoh dan ditambahkan 200 ml HCl

3% dan dihidrolisis selama 3 jam. Setelah dingin, dinetralkan dengan NaOH dan ditambahkan CH<sub>3</sub>COOH hingga suasana sedikit asam. Campuran dipindahkan ke dalam labu ukur 500 ml, ditera dengan akuades dan disaring. Dipipet 10 ml filtrat ke dalam Erlenmeyer 500 ml, ditambahkan 25 ml larutan Luff dan 15 ml akuades. Dipanaskan hingga mendidih selama 3 menit dan tetap dijaga dalam keadaan mendidih selama 10 menit. Setelah larutan dingin ditambahkan 15 ml larutan KI 20% dan 25 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 25%. Kemudian ditrasi dengan Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,1 M hingga warna biru hilang. Dihitung karbohidrat dengan membandingkan volume titrasi contoh terhadap blanko menggunakan tabel konversi Luff-Schoorl.

### Analisis limbah padat (kadar abu, C-Organik, N, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) sesuai SNI 7763:2024[26]

Analisis komposisi limbah padat dilakukan sesuai dengan SNI 7763:2024.

**Kadar Air :** Cawan porselen kosong dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 15-30 menit, kemudian didinginkan dalam desikator dan timbang sebagai cawan kosong. Contoh dimasukkan sebanyak 10-12 g kedalam cawan porselen, dikeringkan didalam oven selama 16 jam pada suhu 105°C. Dinginkan didalam desikator dan dihitung persentasenya dengan berat awal.

**Kadar Abu:** Contoh ditimbang dalam cawan porselen, lalu dipijarkan dalam *furnace* pada suhu 550-600°C selama 3 jam, dinginkan dalam desikator timbang residu abu dan hitung persentasenya dengan berat awal.

**C-Organik:** Contoh dioksidasi dengan larutan K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> dalam suasana asam, kelebihan dikromat di titrasi dengan Fe<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Kadar C-Organik dihitung berdasarkan jumlah dikromat yang tereduksi.

**Nitrogen (N):** Ditetapkan dengan metode Kjeldahl, contoh didestruksi dengan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pekat dan katalis, kemudian distilasi dengan NaOH. Amonia yang terbebas dititrasi dengan HCl standar.

**P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> :** Contoh diekstraksi dengan HNO<sub>3</sub> dan HClO<sub>4</sub> dan ditetapkan secara spektrofotometri dengan metode mobilat, diukur absorbansinya pada panjang gelombang 889 nm.

**K<sub>2</sub>O :** Contoh diekstraksi dengan HNO<sub>3</sub> dan HClO<sub>4</sub> dan ditetapkan dengan *flame photometer*, contoh yang sudah diekstraksi ditambahkan larutan LaCl<sub>3</sub>, diukur absorbansinya pada panjang gelombang 766,5 nm.

## Prosedur Penelitian

### Pra-perlakuan rumput laut

Rumput laut (*Sargassum sp.*) dibersihkan dengan merendamnya dalam air bersih untuk melarutkan kotoran seperti pasir, garam, tanah dan sampah plastik. Kemudian rumput laut dikeringkan di bawah sinar matahari selama 3-5 hari hingga kadar air mencapai ±20%. Selanjutnya, rumput laut dicacah menggunakan *food chopper* hingga berukuran seragam 1-2 cm untuk memperluas permukaan kontak selama proses hidrolisis. Hasil cacahan disimpan dalam plastik PP (*Polypropylene*) agar tidak menyerap kelembapan lingkungan.

### Proses hidrolisis tanpa antibusa

Sebanyak 500 gram rumput laut kering dicuci kembali dengan air bersih hingga bersih dari pasir dan garam, kemudian rumput laut direndam dengan larutan HCl (konsentrasi 1-4% b/b) dengan perbandingan contoh dan HCl rasio 1:9 (b/b) yang berarti 500 g contoh ditambahkan 4500 g larutan HCl. Hidrolisis bertujuan memecah polisakarida rumput laut menjadi gula sederhana yang dapat difermentasi. Proses hidrolisis dilakukan pada suhu 80-90°C selama 20 menit, karena hidrolisis berlebih akan mengubah gula sederhana menjadi furfural dan HMF yang bersifat inhibitor bagi ragi, sehingga proses fermentasi tidak optimal [23], [27]. Selanjutnya, larutan hidrolisis didinginkan sampai dengan suhu 40°C. Dengan menggunakan saringan nilon, larutan hidrolisis dipisahkan dari residu padat yang tidak larut dan dilakukan netralisasi dengan NaOH 20% sampai dengan mencapai pH 4,5-5,5. pH tersebut merupakan kondisi optimal di mana ragi (*Saccharomyces cerevisiae*) dapat melakukan fermentasi secara efisien tanpa mengalami stress osmotik [28], [29], [30].

### Proses hidrolisis dengan antibusa

Sebanyak 500 gram rumput laut kering dicuci kembali dengan air bersih hingga bersih dari pasir dan garam, kemudian rumput laut direndam dengan larutan HCl (konsentrasi 3-5% b/b). Percobaan dengan konsentrasi HCl 1-2% tidak dilakukan karena hasil *Brix* dari hidrolisis sebelumnya rendah. Pemanasan dilakukan secara bertahap hingga mencapai suhu 80°C, antibusa berbasis silikon (SIXIN® SY-7) sebanyak 0,07-0,14 % (b/v) ditambahkan secara bertahap dan diamati secara visual bahwa busa yang terbentuk dapat dikendalikan. Selanjutnya, larutan hidrolisis didinginkan sampai suhu 40°C, selanjutnya dilakukan netralisasi dengan NaOH 20% sampai pH mencapai 4,5-5,5.

### Proses fermentasi

Dari hasil proses penyaringan dan netralisasi didapatkan larutan hidrolisis sebanyak 4-4,5 kg, larutan hidrolisis didinginkan sampai dengan suhu 40 °C lalu dimasukkan kedalam galon PET 15 liter. Ditambahkan urea 46% N dengan konsentrasi 0,5% (b/b) sebagai sumber nitrogen dan ragi (*Saccharomyces cerevisiae* dari *Angel Yeast Co. Ltd.*) dengan variasi konsentrasi 0,25%-1% (b/b). Proses fermentasi terjadi ketika ragi mengubah gula menjadi etanol dan gas karbon dioksida tanpa bantuan oksigen (proses anaerob). Fermentasi dilakukan dalam galon PET 15 liter yang sudah dicuci bersih dan dikeringkan. Pada galon PET 15 liter ditambahkan sistem *airlock*. Penggunaan air pada *airlock* tidak dapat memvisualisasikan adanya proses anaerob (proses di mana ragi menghasilkan CO<sub>2</sub>). Namun dengan cairan sabun, hasil fermentasi dapat dilihat dari gelembung udara yang terbentuk. Sistem *airlock* pada galon PET ditunjukkan pada Gambar 1. Proses fermentasi berlangsung pada suhu ruang 28-35°C selama 3-5 hari, pengukuran kadar alkohol dilakukan setiap 24 jam menggunakan refraktometer.



Gambar 1. Proses fermentasi pada galon PET 15 liter.

### Proses Distilasi

Distilasi bertujuan memisahkan dan memurnikan etanol dari campuran larutan fermentasi berdasarkan perbedaan titik didih (etanol 78°C dan air 100°C). Hasil fermentasi di distilasi pada suhu 78-90°C, uap etanol dikondensasi melalui sistem air pendingin dan hasil distilat ditampung. Selanjutnya distilat akan kembali dilakukan proses distilasi sampai dengan mencapai kemurnian alkohol yang diinginkan 90-95% (v/v). Alat distilasi sederhana komersial dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Alat distilasi sederhana komersial.

### Analisis Neraca Massa

Setiap tahapan penelitian (hidrolisis, netralisasi dan fermentasi) dilakukan penimbangan massa masuk dan keluar. Dengan prinsip kekekalan massa, kita dapat mengukur efisiensi proses, mengidentifikasi sumber *material loss* (3), membandingkan hasil aktual dengan teoritis, menjadi dasar optimasi dan *scale-up* proses produksi.

$$\text{Material loss} = \Sigma \text{ Massa masuk} - \Sigma \text{ Massa keluar} \quad (3)$$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Proses hidrolisis tanpa antibusa

Pada percobaan ini, ketika suhu mulai mencapai 80°C terbentuk busa dari hasil proses hidrolisis. Percobaan hidrolisis direncanakan dengan konsentrasi HCl 1%, 2%, 3%, 4% dan 5% (v/v). Percobaan dengan

konsentrasi HCl 5% (v/v) tidak dapat dilaksanakan karena busa yang dihasilkan semakin banyak dan tidak bisa dikendalikan. Kondisi hidrolisis tanpa antibusa ditunjukkan pada Gambar 3. Fenomena ini terjadi karena pelepasan polisakarida dan protein terdenaturasi yang bertindak sebagai surfaktan alami dan memicu gelembung uap dan CO<sub>2</sub> hingga terbentuk busa[31], [32], [33]. Hal ini menyebabkan luapan material hingga kehilangan sampai dengan 16% dari total volume dan berpotensi membahayakan operator yang bertugas. Kenaikan *Brix*, seiring meningkatnya konsentrasi HCl dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 3. Hidrolisis tanpa antibusa.

Tabel 2. Perbandingan hasil hidrolisis tanpa antibusa.

Parameter	HCl 1%	HCl 2%	HCl 3%	HCl 4%
Rumput laut Kering (gram)	515	505	505	503
HCL 37% (ml)	102	243	307	408
H <sub>2</sub> O (ml)	4.378	4.256	4.135	4.014
NaOH (ml)	120	140	230	250
<i>Brix</i> akhir (%)	3,5	4	5	6
Residu Padat (gram)	1.431	1.545	1.610	1.605
Larutan Hidrolisis (gram)	3.461	3.388	3.278	3.240

**Proses hidrolisis dengan antibusa**

Pada percobaan awal tanpa antibusa, busa yang terbentuk sangat banyak dan tidak terkendali. Hal ini disebabkan oleh pelepasan gas (CO<sub>2</sub>, uap air) dan protein yang terlarut dari rumput laut yang bertindak sebagai surfaktan alami yang dapat menurunkan tegangan permukaan sehingga tercipta gelembung udara. Penambahan antibusa berbasis silikon 0,07-0,14% (b/v) berhasil mengendalikan busa yang terbentuk dan mengurangi kehilangan material hingga 5%. Proses hidrolisis yang stabil setelah penambahan antibusa disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hidrolisis dengan antibusa

Peningkatan *Brix* dari 3,5-6% menjadi 6-8% karena transfer panas dan kontak permukaan HCl dan rumput laut menjadi lebih sempurna tanpa hambatan busa. Perbandingan hasil hidrolisis dengan antibusa dapat dilihat pada Tabel 3. Ringkasan perbandingan hasil hidrolisis yang tidak menggunakan antibusa dan menggunakan antibusa disajikan pada Tabel 4.

Tabel 3. Perbandingan hasil hidrolisis dengan antibusa.

Parameter	HCl 3%	HCl 4%	HCl 5%
Rumput laut Kering (gram)	502	502	502
HCL 37% (ml)*	364	408	511
H <sub>2</sub> O (ml)	4078	4013	3891
NaOH (ml)	230	270	430
Antibusa (gram)	4,3	6	7
<i>Brix</i> akhir (%)	6	7	8
Residu Padat (gram)	1220	1120	1180
Larutan Hidrolisis (gram)	4296	4456	4483

\*Untuk HCl 3% menggunakan HCl 32%.

Tabel 4. Perbandingan hidrolisis tanpa dan dengan antibusa pada konsentrasi HCl 3%.

Komponen	HCl 3% dengan antibusa	HCl 3% tanpa antibusa
<b>Input</b>		
Rumput Laut Cuci (gram)	1.018	1.024
HCl 37% (gram)	422	365
H <sub>2</sub> O (gram)	4.078	4.135
Antibusa (gram)	4,3	0
NaOH 20% (gram)	281	281
<b>Total</b>	<b>5.803,3</b>	<b>5.805</b>
<b>Output</b>		
Residu Padat (gram)	1.220	1.610
Larutan Hidrolisis (gram)	4.296	3.278
<i>Material Loss</i> (gram)	287,3	917
<b>Total</b>	<b>5.803,3</b>	<b>5.805</b>

### Proses fermentasi

Pada fermentasi hari ke 3 dengan *Brix* awal 8% (hasil hidrolisis HCl 5% v/v) dan penambahan ragi 1% (b/v) serta urea 0,5% (b/v) menghasilkan kadar etanol tertinggi sebesar 22% (v/v) dan stabil hingga hari ke 5. Penggunaan asam kuat yang berlebihan akan menghasilkan HMF (*Hydroxymethylfurfural*) yang akan menjadi inhibitor pada pertumbuhan ragi [23]. Pada Tabel 5, diperoleh hasil kadar etanol tertinggi 22% (v/v) mendekati temuan Kusuma (2019) yang memperoleh 24,67% pada *Sargassum sp.* Hasil ini masih dibawah penelitian Kadimpati (2021) yang mencapai *yield* konversi gula 0,465 g/g dan penelitian Zeng (2020) diperoleh 0,11 g/g. Hasil fermentasi yang optimal diperoleh dengan ragi yang diaktivasi pada suhu 30-40°C.

Tabel 5. Perbandingan hasil fermentasi.

<i>Brix</i> awal (%)	Ragi (gram)	Urea (gram)	Etanol (%) hari ke-3	Etanol (%) hari ke-4	Etanol (%) hari ke-5
5	8,97	18,68	16	17	17
6	22,76	22,97	17	17	17
6	46,22	24,03	18	18	18
6	23,04	19,08	16	17	17
7	48,05	24,08	20	20	20
8	47,76	24,03	22	22	22

### Proses distilasi

Proses distilasi dengan dandang nasi *stainless steel* yang dimodifikasi mengalami kegagalan disebabkan adanya kebocoran pada sambungan dan proses korosi pada dasar dandang nasi. Desain awal alat distilasi sederhana yang dibuat dari dandang nasi ditunjukkan pada Gambar 5. Proses distilasi dilakukan kembali dengan alat distilasi komersial dengan *stainless steel* yang lebih tebal, serta penambahan fitur pengunci dan *silicon seal* pada tutup alat distilasi untuk mencegah kebocoran. Alat distilasi komersial yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2. Proses distilasi dilakukan pada suhu 78-90°C selama 2-4 jam dengan hasil alkohol 0%. Percobaan dihentikan karena terbentuk *stain* atau noda karat pada alat distilasi. Pemeriksaan pH pada larutan fermentasi menunjukkan nilai pH 4,70 untuk contoh dengan konsentrasi HCl 5% (v/v) dan pH 4,07 pada contoh HCl 3% (v/v). Oleh karena itu, diperlukan netralisasi kembali sebelum proses distilasi hingga mencapai pH 6,5-8,5 untuk mengurangi risiko korosi pada alat distilasi.



Gambar 5. Desain alat distilasi sederhana dari dandang nasi.

### Analisis Neraca Massa

Dari hasil keseluruhan proses yang sudah dilakukan, kemudian dengan analisis neraca massa lengkap. Hasil percobaan empiris dapat dilihat pada Tabel 6 dan Tabel 7.

### Neraca Massa Empiris (Berdasarkan Percobaan)

Tabel 6. Neraca massa hidrolisis empiris HCl 5%.

Komponen	Empiris HCl 5%
<b>Input</b>	
Rumput laut kering (gram)	502
Rumput laut basah* (gram)	1.017
HCl 37% (gram)	608
H <sub>2</sub> O (gram)	3.891
Antibusa (gram)	7
NaOH 20% (gram)	525
<b>Total</b>	6.048
<b>Output</b>	
Residu Padat (gram)	1.180
Larutan Hidrolisis (gram)	4.483
<i>Material Loss</i> (gram)	385
<b>Total</b>	6.048

\*Rumput laut basah (setelah dicuci) berasal dari 502 gram rumput laut kering + air yang diserap selama pencucian (1.017 g- 502 g= 515 gram air terserap).

Tabel 7. Neraca massa fermentasi empiris HCl 5%

Komponen	Empiris HCl 5%
<b>Input</b>	
Larutan Hidrolisis (gram)	4.483
<i>S. Cerevisiae</i> (gram)	48,05
Urea 46N (gram)	24,08
<b>Total</b>	4.555,13

<b>Output</b>	
Larutan Fermentasi (gram)*	2.479
Sludge Fermentasi (gram)	2.070
H <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub> (gram)	385
<b>Total</b>	<b>4.555,13</b>

\*Etanol 22% (v/v)

### Neraca Massa Berdasarkan Stoikiometri

Proses selanjutnya analisis neraca massa stoikiometri. Hasil neraca massa dibuat berdasarkan proses hidrolisis dan fermentasi pada skenario optimal HCl 5%, sebagai berikut:

Dasar perhitungan:

Basis : rumput laut kering 502g

Kadar Karbohidrat : 73,5%

Berat molekul glukosa (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>) = 180 g/mol

Berat molekul etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH)=46 g/mol

1 mol glukosa menghasilkan 2 mol etanol

Berdasarkan neraca massa pada Tabel 6. Hasil pengukuran *yield* teoritis =  $(2 \times 460 / 180) = 0,511$  g etanol/ g glukosa. Pada rumput laut kering 502 g dengan kadar karbohidrat 73,5%, didapatkan persentase alkohol  $0,735 \times 0,511 = 0,376$  g etanol/ g rumput laut kering atau 37,6 % (b/b), atau dalam 502 gram rumput laut kering mengandung  $502 \times 0,376 = 189$  gram etanol.

Berdasarkan data empiris pada Tabel 7. massa larutan fermentasi = 2479 gram dengan kadar etanol 22% (v/v), diperoleh densitas larutan fermentasi sebesar 1,0038 g/ml, dan densitas etanol sebesar 0,789 g/ml. Dari data diatas dilakukan perhitungan untuk massa etanol. Massa Etanol yang diperoleh yaitu =  $2479 \text{ g} \times 0,22 / 1,0038 \text{ g/ml} \times 0,789 \text{ g/ml} = 428,7$  gram etanol. Perbandingan antara *yield* teoritis berdasarkan stoikiometri dan *yield* empiris hasil pengukuran disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Perbandingan *Yield* Stoikiometri dan Empiris

Parameter	Nilai	Satuan
<i>Yield</i> Stoikiometri	189	gram etanol
<i>Yield</i> Empiris	428,7	gram etanol
<b>Selisih</b>	<b>(+)239,7 gram</b>	<b>(+)126,8%</b>

Pada tabel 8, *yield* aktual terukur 428,7 gram secara teoritis tidak mungkin melebihi *yield* teoritis maksimum 189 gram atau surplus sebesar 126,8%. Fenomena ini mengindikasikan adanya pengukuran berlebih menggunakan refraktometer. Indikasi yang mungkin menyebabkan adanya kesalahan pembacaan seperti adanya padatan terlarut seperti sisa gula, asam organik, protein, mineral) yang mempengaruhi indeks bias. Ketidaksesuaian refraktometer yang dirancang untuk membaca larutan etanol-air, bukan larutan fermentasi yang kompleks.

Perhitungan *material loss* pada proses hidrolisis berdasarkan pelepasan CO<sub>2</sub>, berdasarkan *Brix* 8% dari

larutan hidrolisis 4483 gram, mengandung 286,9g gula. Maka CO<sub>2</sub> yang dilepaskan adalah  $(88/180) \times 286,9 = 140,3$  g CO<sub>2</sub>. H<sub>2</sub>O loss = 385 g – 140,3 g = 244,7 g.

Perhitungan *material loss* pada proses fermentasi. *Material loss* = input total – output total =  $4.555,13 - (2.479 + 2.070) = 6,13$  g.

Total *material loss* = loss hidrolisis + loss fermentasi =  $385 \text{ g} + 6,13 \text{ g} = 391,13 \text{ g}$ .

% *Loss* = total *lost* material / total input hidrolisis x 100% =  $(391,13 / 6.048) \times 100\% = 6,47\%$

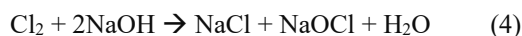
### Hambatan Penelitian

#### Korosi pada stainless steel SS304

Setelah pengulangan percobaan 3-4 kali pada konsentrasi HCl 5%, permukaan tangki SS304 mulai menunjukkan bercak karat dan lubang kecil. Hal ini terjadi karena ion klorida (Cl<sup>-</sup>) bersifat reaktif terhadap lapisan Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang terdapat pada SS304. Dengan keterbatasan akses pada SS316 yang tersedia di pasaran, penggunaan material SS304 tidak dianjurkan. Alternatif yang dapat dipertimbangkan adalah menggunakan reaktor hidrolisis berbahan silika atau menurunkan konsentrasi HCl, sehingga jangka waktu pemakaian reaktor menjadi lebih lama. Penambahan proses netralisasi sebelum distilasi diperlukan agar penggunaan alat bisa lebih lama [34], [35], [36].

#### Netralisasi Gas Klor

Selama proses hidrolisis dengan HCl, terdeteksi bau gas klor (Cl<sub>2</sub>) yang cukup menyengat. Gas ini terbentuk dari reaksi oksidasi ion klorida dari HCl dan udara. Pada skala produksi yang lebih besar, gas klor bersifat toksik dan korosif terhadap saluran pernapasan dapat menimbulkan masalah serius pada kesehatan manusia dan lingkungan sekitar [37], [38], [39]. Untuk mengatasi bahaya gas klor tersebut, perlu dibuat jalur ventilasi dan pada akhir saluran ventilasi terdapat larutan NaOH 5% atau sistem *scrubber* untuk menetralkan gas klor sesuai reaksi (4).



#### Pemanfaatan dari limbah padat

Hasil analisis limbah padat fermentasi disajikan pada Tabel 9. dengan kandungan C-Organik 0,975%, N-Total 0,07%, K<sub>2</sub>O 0,565% dan P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0,070%. Berdasarkan SNI 7763:2024[26] tentang standar kualitas pupuk organik padat, memiliki persyaratan sebagai berikut: C-Organik min.15%, rasio C/N maks.25, Kadar hara makro (N + P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + K<sub>2</sub>O) min. 2%. Limbah ini berpotensi sebagai bahan baku pada campuran pupuk kompos yang biasanya terdiri dari kotoran hewan, sekam padi, ampas kopi, serbuk kayu, blotong tebu, dan tanah dolomit. Terkait dengan kandungan air yang mencapai 91% hal ini dapat diatasi dengan *filter press* ataupun proses dehidrasi (penjemuran).

Tabel 9. Hasil uji limbah padat

Parameter	Unit	Simplo	Duplo	Rata-Rata
Kadar Abu	%	5,34	5,5	5,42
Kadar Air	%	91,14	91,56	91,35
C-Organik	g/100g	0,98	0,97	0,975
Kadar Nitrogen	%	0,07	0,07	0,07
K <sub>2</sub> O	mg/100g	562,1	567,96	565,03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	mg/kg	698,7	703,86	701,28

**Proyeksi untuk skala industri dan komunitas**

Berdasarkan data BPS Yogyakarta tahun 2024, Kabupaten Gunungkidul memiliki kendaraan bermotor sebanyak 377.707 unit, didominasi oleh kendaraan roda dua sebanyak 333.812 unit dan sisanya kendaraan roda empat. Pada penelitian yang dilakukan oleh Deendarlianto [40], [41], rata-rata jarak tempuh kendaraan roda empat mencapai 18.480 km/tahun dengan konsumsi bensin sebanyak 9,1 km/liter, sedangkan kendaraan roda dua mampu menempuh jarak 10.080 km/tahun dengan konsumsi bahan bakar 26,8 km/liter. Maka diperkirakan kebutuhan bensin sebanyak 188.677.338 liter pertahun, dengan penerapan skenario E10, kebutuhan bioetanol yang dibutuhkan sebesar 18.867.734 liter per tahun. Dengan rendemen yang diperoleh, kebutuhan bahan baku dan bahan pembantu diproyeksikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Proyeksi kebutuhan bahan baku tahunan di Gunungkidul, Yogyakarta.

Komponen	HCl 5%	HCl 3%	Selisih	Satuan
Bioetanol 99%	18.868	18.868	-	m <sup>3</sup> /tahun
Massa Bioetanol	14.887	14.887	-	ton/tahun
Rumput Laut kering	27.682	33.294	(5.613)	ton/tahun
HCl 32%	28.174	24.128	4.046	m <sup>3</sup> /tahun
H <sub>2</sub> O (pencucian)	28.398	34.223	(5.824)	m <sup>3</sup> /tahun
H <sub>2</sub> O (Hidrolisis)	214.559	270.464	(55.905)	m <sup>3</sup> /tahun
Antibusa	385	284	100	m <sup>3</sup> /tahun
NaOH	23.729	15.276	8.453	m <sup>3</sup> /tahun
Ragi	2.650	3.065	(416)	ton/tahun
Urea	1.328	1.523	(196)	ton/tahun

Tabel 10. menunjukkan bahwa skenario HCl 3% membutuhkan rumput laut kering 20,27% lebih banyak, namun menghemat penggunaan bahan kimia HCl 14,36% dan NaOH 35,63%. Penghematan energi juga terjadi, karena pada skenario HCl 3%, tahapan hidrolisis tidak dilakukan oleh komunitas namun memanfaatkan hasil limbah hidrolisis industri alginat. Penggunaan air sebesar 304.687 m<sup>3</sup>/tahun pada skenario HCl 3% dapat dikurangi dengan melalui penerapan *Water Treatment Plant* (WTP) yang memanfaatkan reklamasi air (*water*

*recycling*). Dengan kebutuhan etanol sebesar 14.887 ton/tahun, kebutuhan rumput laut kering sebesar 27.682 ton/tahun dengan *material loss* sebesar 6,47% menyebabkan kehilangan sebesar 1.791 ton/tahun dengan harga rumput laut sebesar Rp 8.000/kg, kerugian ditaksir sebesar Rp 14,33 miliar/tahun.

**Perbandingan Kinerja Peralatan Teknologi Tepat Guna (TTG) dengan skala laboratorium**

**Tahapan Hidrolisis**

Peralatan TTG menggunakan SS304 dan kompor gas dengan nilai *Brix* 6-8% dengan penambahan antibusa silikon 0,07-0,14% (b/v) dapat dilihat pada Tabel 5. Secara kinerja, metode ini setara dengan Kusuma (2019) yang mencapai *yield* 24,67% etanol, namun pada TTG menghadapi tantangan korosi ion klorida pada SS304 dan busa berlebih jika antibusa tidak digunakan. Pada skala laboratorium, penggunaan reaktor SS316 atau silika dan pengontrol suhu otomatis dapat meminimalkan risiko korosi dan memastikan transfer panas secara seragam dan optimum. Meskipun control suhu TTG bersifat manual, penambahan zat kimia sederhana seperti antibusa dapat menstabilkan proses dan menurunkan *material loss*.

**Tahapan Fermentasi**

Sistem fermentasi TTG menggunakan galon PET 15 liter dengan *airlock* sabun menghasilkan kadar etanol 22% (v/v) dalam 3-5 hari. Dibandingkan dengan bioreaktor skala laboratorium yang dilengkapi dengan pengaduk mekanis, pengontrol suhu dan pH. Hasil fermentasi tetap kompetitif dengan studi yang dilakukan oleh Kadimpati (2023) dan Zeng (2020), kelemahan TTG terletak pada deteksi penurunan aktivitas ragi secara *real-time*.

**Tahapan Distilasi**

Alat distilasi bertingkat menghasilkan kemurnian alkohol 90-95% dan efisiensi waktu yang lebih cepat dibandingkan alat distilasi sederhana yang perlu pengulangan distilasi untuk mencapai kemurnian tersebut. Dari sisi waktu peralatan TTG untuk proses distilasi masih dibawah alat distilasi bertingkat, namun dari sisi biaya investasi jauh lebih murah dan mudah untuk proses pemeliharaan dan perawatan.

**Analisis dan Monitoring**

Penggunaan refraktometer dan hidrometer Baume pada TTG memberikan kecepatan pembacaan dan biaya yang rendah per contoh. Namun pada penelitian ini pada tabel 10. mengonfirmasi adanya pengukuran berlebih sebesar 126,8% yang diakibatkan adanya residu gula, protein, dan mineral. Penggunaan *Gas Chromatography* memberikan akurasi nilai yang tinggi, namun perlu biaya pengujian yang tinggi. Dalam konteks komunitas, penggunaan refraktometer sebagai indikator operasional harian tetap relevan dengan catatan verifikasi berkala dengan metode terstandarisasi untuk menjaga kualitas produk.

**Perbandingan Ekonomis**

Perbandingan investasi modal awal antara TTG dan skala laboratorium disajikan pada Tabel 11.

Tabel 11. Perbandingan investasi TTG dan Laboratorium.

Komponen	TTG (harga)	Lab (harga)	Rasio
Reaktor Hidrolisis	Panci SS304, Kompor gas, dan tabung gas: Rp 800 ribu	Hydrother mal autoclave reactor: Rp 23 juta	1: 29
Sistem Fermentasi	Galon 15L dan airlock: Rp 100 ribu	PET Fermentor stainless : Rp 2,2 Juta	1: 22
Sistem distilasi	Distilasi sederhana: Rp 1,5 Juta	Pot Still Distillation Boiler ; Rp 20 juta	1: 33
Instrument Analisis	Refraktometer , pH meter, Hidrometer, Timbangan : Rp 1,5 juta	Gas kromatogra fi : Rp 90 juta	1:60
Total Estimasi	Rp 3,9 juta	Rp 135,2 juta	

Dari segi ekonomi, pendekatan TTG memiliki investasi awal yang sangat rendah sekitar Rp 3,9 juta dibandingkan dengan skala laboratorium yang mencapai Rp 135,2 juta. Namun demikian perlu dilakukan analisis ekonomi yang lebih mendalam untuk menentukan kelayakan usaha ini.

**Ekonomi Sirkular: Integrasi dengan Industri Alginat**

Industri ekstraksi alginat dari rumput laut umumnya menggunakan HCl 3% untuk hidrolisis. Limbah hidrolisis dari ekstraksi alginat yang selama ini menjadi beban operasional perusahaan (biaya pembuangan dan tempat penyimpanan limbah) mendapatkan nilai tambah. Dan keuntungan bagi komunitas adalah tidak perlu melakukan investasi alat, bahan baku dan bahan penolong pada tahap hidrolisis.

**Verifikasi hasil dengan laboratorium**

Hasil pengujian independen menggunakan metode standar Tabel 12, mengonfirmasi bahwa pengukuran operasional lapangan perlu koreksi interpretasi. Pada tabel tersebut dapat dilihat, total gula yang dihitung sebagai karbohidrat pada rumput laut *Sargassum sp.* sebesar 0,04% jauh dari nilai referensi yang didapatkan oleh Kusuma (2019) sebesar 58,23% dan Indriyawati (2024) sebesar 73,5%. Hasil etanol dari larutan fermentasi sebesar 0,09% terlalu kecil dan menjelaskan hasil pengukuran distilasi tidak terbaca oleh hidrometer Baume ataupun refraktometer.

Tabel 12. Hasil pengujian bahan baku dan larutan fermentasi.

Komponen	Parameter	Hasil	Metode
Rumput Laut Kering	Kadar air	24,06 %	SNI 01-2891-1992
	Total gula	0,04 %	SNI 01-2891-1992

Larutan Fermentasi	Total gula	0,02 %	SNI 01-2892-1992
	Etanol	0,09 %	MU/INST/25 (GC)
	Metanol	<0,05%	MU/INST/25 (GC)
	HMF	Not detected	AOAC 980.23,2015

**KESIMPULAN**

Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan Teknologi Tepat Guna (TTG) untuk produksi bioetanol dari *Sargassum sp.* telah memenuhi karakteristik utama TTG. Hal ini ditunjukkan dengan pemanfaatan bahan baku lokal dari Gunungkidul, investasi peralatan yang rendah (estimasi Rp 3,9 juta dibandingkan dengan peralatan skala laboratorium Rp 135,2 juta), kemudahan operasi, perawatan dan perbaikan dengan menggunakan sumber daya lokal, karena seluruh komponen tersedia di pasar domestik atau marketplace. Pendekatan ini membuka peluang komunitas untuk memproduksi bioetanol secara mandiri.

Evaluasi pengaruh konsentrasi HCl menunjukkan bahwa konsentrasi 3-5% (v/v) memberikan efisiensi hidrolisis yang lebih baik dengan nilai Brix 6-8%. Namun demikian, penggunaan HCl meningkatkan risiko korosi pada reaktor dengan bahan SS304 dan pelepasan gas klor. Sehingga diperlukan netralisasi pH sebelum distilasi untuk mencegah terjadinya korosi pada reaktor dan sistem scrubber untuk netralisasi gas klor. Penambahan antibusa silikon (SIXIN® SY-7) pada rentang 0,07-0,14% (b/v) terbukti sangat efektif mengendalikan pembentukan busa, menurunkan material loss dari 16% menjadi 5%, serta meningkatkan kontak reaktan sehingga menghasilkan Brix yang lebih tinggi.

Analisis neraca massa menunjukkan material loss keseluruhan proses mencapai 6,47%. Terdapat ketidaksesuaian antara pengukuran lapangan menggunakan refraktometer (Brix 8% dan alkohol 22% v/v) dengan verifikasi hasil laboratorium (alkohol 0,09% dan kadar total gula 0,04%). Hal ini menjelaskan kenapa terjadi overestimate pengukuran antara yield empiris dan teoritis sebesar 126,8%. Namun demikian penggunaan refraktometer, hidrometer Baume pada skala komunitas sebagai indikator operasional tetap relevan, dengan catatan hasil proses dan produk harus diverifikasi dengan metode pengujian yang terstandarisasi.

Dari sisi teknologi tepat guna, penelitian ini mengidentifikasi tantangan teknis utama beserta mitigasinya, yaitu:

1. Pembentukan busa berlebih selama hidrolisis, yang dapat dikendalikan dengan antibusa silikon;
2. Korosi pada reaktor SS304 akibat ion klorida, yang dapat diminimalkan dengan netralisasi pH hingga 6,5–8,5 sebelum distilasi;

3. Pelepasan gas klor ( $Cl_2$ ), yang memerlukan sistem ventilasi dan *scrubber* berbasis larutan NaOH 5%.

Dari sisi ekonomi sirkular, integrasi dengan limbah hidrolisis alginat (skenario HCl 3%) secara konsep menunjukkan potensi penghematan konsumsi NaOH sebesar 35,63% dan HCl sebesar 14,36%. Pada proyeksi E10 (asumsi karbohidrat 73,5%), dibutuhkan bahan baku sebanyak 27.682 ton/tahun, dengan *material loss* sebesar 6,47%, berpotensi kehilangan bahan baku sebesar 1.791 ton/tahun, atau kerugian finansial sekitar Rp 14,33 miliar/tahun (harga Rp 8.000/kg). Namun dengan kualitas bahan baku rumput laut *Sargassum sp* yang rendah karbohidrat, proyeksi kebutuhan E10 di Gunungkidul sebesar 18,9 juta liter bioetanol per tahun perlu dievaluasi ulang. Penelitian lebih lanjut disarankan dengan optimalisasi *pretreatment* bahan baku, mengeksplorasi bahan baku alternatif yang memiliki kandungan karbohidrat tinggi dan melimpah di daerah komunitas seperti singkong dan varietas rumput laut lainnya, serta penggunaan material reaktor yang lebih tahan korosi.

## ACKNOWLEDGEMENT

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP), Kementerian Keuangan Republik Indonesia, atas dukungan pendanaan yang diberikan. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada Universitas Gadjah Mada atas dukungan yang diberikan selama proses penelitian ini berlangsung.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] ESDM, 'Ini Strategi Pemerintah Tekan Impor Migas'. Accessed: Jun. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/-ini-strategi-pemerintah-tekkan-impor-migas-?>
- [2] ESDM, 'Peraturan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 4 Tahun 2025 Tentang Pengusahaan Dan Pemanfaatan Bahan Bakar Nabati', 2025, Accessed: Apr. 14, 2026. [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/317626/per-men-esdm-no-4-tahun-2025>
- [3] E. F. Schumacher, *Small Is Beautiful: A Study of Economics As If People Mattered*. London: Blond & Briggs, 1973.
- [4] A. Y. Pramono, 'Ekspor Rumput Laut Gunungkidul ke Jepang dan Hongkong Tinggi, Pasokan Masih Minim'. Accessed: Jul. 24, 2025. [Online]. Available: <https://jogjapolitan.harianjogja.com/read/2024/09/30/513/1189662/ekspor-rumput-laut-gunungkidul-ke-jepang-dan-hongkong-tinggi-pasokan-masih-minim>
- [5] M. El Harchi, F. Z. Fakihi Kachkach, and N. El Mtili, 'Optimization of thermal acid hydrolysis for bioethanol production from *Ulva rigida* with yeast *Pachysolen tannophilus*', *South African Journal of Botany*, vol. 115, pp. 161–169, Mar. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.01.021>.
- [6] T. E. Oluwole, 'Extraction of Bioethanol From Seaweed Via Hydrolysis and Fermentation Using Mass-Produced Enzymes and Yeast', May 2025. [Online]. Available: <https://digitalcommons.newhaven.edu/masterstheses/259>
- [7] R. Salvador *et al.*, 'From ocean to meadow: A circular bioeconomy by transforming seaweed, seagrass, grass, and straw waste into high-value products', *Waste Management*, vol. 200, Jun. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114753>.
- [8] KKP, 'Profil Pasar Rumput Laut', 2023, Accessed: May 25, 2025. [Online]. Available: <https://kkp.go.id/storage/Materi/profil-pasar-rumput-laut66753a465fe09/materi-66753a4696928.pdf>
- [9] D. A. Salvi, G. M. Aita, D. Robert, and V. Bazan, 'Ethanol production from sorghum by a dilute ammonia pretreatment', *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 37, no. 1, pp. 27–34, Jan. 2010, doi: <https://doi.org/10.1007/s10295-009-0645-5>.
- [10] F. Wang *et al.*, 'An environmentally friendly and productive process for bioethanol production from potato waste', *Biotechnol. Biofuels*, vol. 9, no. 1, Mar. 2016, doi: <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0464-7>.
- [11] H. Chen, Y. Han, and J. Xu, 'Simultaneous saccharification and fermentation of steam exploded wheat straw pretreated with alkaline peroxide', *Process Biochemistry*, vol. 43, no. 12, pp. 1462–1466, Dec. 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2008.07.003>.
- [12] E. Varga, H. B. Klinke, K. Réczey, and A. B. Thomsen, 'High solid simultaneous saccharification and fermentation of wet oxidized corn stover to ethanol', *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 88, no. 5, pp. 567–574, Dec. 2004, doi: <https://doi.org/10.1002/bit.20222>.
- [13] J. Y. Zhu, R. Gleisner, C. T. Scott, X. L. Luo, and S. Tian, 'High titer ethanol production from simultaneous enzymatic saccharification and fermentation of aspen at high solids: A comparison between SPORL and dilute acid pretreatments', *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 19, pp. 8921–8929, Oct. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.047>.
- [14] E. Hawaz *et al.*, 'Bioethanol production from sugarcane molasses by co-fermentation of *Saccharomyces cerevisiae* isolate TA2 and *Wickerhamomyces anomalus* isolate HCJ2F-19', *Ann. Microbiol.*, vol. 74, no. 1, Dec. 2024, doi: <https://doi.org/10.1186/s13213-024-01757-8>.
- [15] A. Gupta, L. Kashyap, G. S. Sanghera, K. Bhushan, and G. S. Kochar, 'Analyzing the Potential of Sugarcane Juice for Bio-ethanol Production', *Sugar Tech*, vol. 26, no. 4, pp.

- 1179–1193, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s12355-024-01466-1>.
- [16] K. K. Kadimpati, S. Thadikamala, K. Devarapalli, L. Banoth, and K. B. Uppuluri, ‘Characterization and hydrolysis optimization of *Sargassum cinereum* for the fermentative production of 3G bioethanol’, *Biomass Convers. Biorefin.*, vol. 13, no. 3, pp. 1831–1841, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01270-3>.
- [17] N. Indriyawati, Supriyanto, and N. D. N. Nabwiyah, ‘Nutritional composition of *Sargassum* sp. and *Padina* sp.’, in *BIO Web of Conferences*, EDP Sciences, Sep. 2024. doi: <https://doi.org/10.1051/bioconf/202412703001>.
- [18] A. Kusuma Wardani and R. Herrani, ‘Bioethanol from *sargassum* sp using acid hydrolysis and fermentation method using microbial association’, in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Jun. 2019. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1241/1/012008>.
- [19] G. Zeng *et al.*, ‘Semi-simultaneous Saccharification and Fermentation of Ethanol Production from *Sargassum horneri* and Biosorbent Production from Fermentation Residues’, *Waste Biomass Valorization*, vol. 11, no. 9, pp. 4743–4755, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00748-0>.
- [20] S. M. D. Kolo *et al.*, ‘The Effect of Fermentation Time, pH and *Saccharomyces Cerevisiae* Concentration for Bioethanol Production from *Ulva Reticulata* Macroalgae’, *Trends in Sciences*, vol. 21, no. 5, May 2024, doi: <https://doi.org/10.48048/tis.2024.7484>.
- [21] N. Smichi *et al.*, ‘Bioethanol production from Tunisian macroalgal biomass’, *EuroMediterr. J. Environ. Integr.*, vol. 9, no. 3, pp. 1459–1469, Sep. 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s41207-024-00482-7>.
- [22] L. Cassani *et al.*, ‘Thermochemical Characterization of Eight Seaweed Species and Evaluation of Their Potential Use as an Alternative for Biofuel Production and Source of Bioactive Compounds’, *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 23, no. 4, Feb. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/ijms23042355>.
- [23] R. Gusvita, ‘Desain Proses Hidrolisis Dan Fermentasi Pada Produksi Bioetanol Dari Rumput Laut *Eucheama Cottonii*’, Universitas Gadjah Mada, 2015.
- [24] J. H. Park *et al.*, ‘Use of *Gelidium amansii* as a promising resource for bioethanol: A practical approach for continuous dilute-acid hydrolysis and fermentation’, *Bioresour. Technol.*, vol. 108, pp. 83–88, Mar. 2012, doi: [10.1016/j.biortech.2011.12.065](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.065).
- [25] BSN, ‘SNI 01-2891-1992 - Cara Uji Makanan dan Minuman’, Badan Standardisasi Nasional (BSN), SNI 01-2891-1992, 1992. Accessed: May 03, 2026. [Online]. Available: <https://pesta.bsn.go.id/produk/index?key=SNI+01-2891-1992>
- [26] BSN, ‘SNI 7763:2024 - Pupuk Organik Padat’, Badan Standardisasi Nasional (BSN), Indonesia, SNI 7763:2024, 2024. Accessed: Apr. 14, 2026. [Online]. Available: <https://pesta.bsn.go.id/produk/detail/77632024-sni7763:2024>
- [27] F. Kholiya, M. R. Rathod, D. R. Gangapur, S. Adimurthy, and R. Meena, ‘An integrated effluent free process for the production of 5-hydroxymethyl furfural (HMF), levulinic acid (LA) and KNS-ML from aqueous seaweed extract’, *Carbohydr. Res.*, vol. 490, p. 107953, Apr. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carres.2020.107953>.
- [28] Y. Wu, B. Li, B. Miao, C. Xie, and Y. Q. Tang, ‘*Saccharomyces cerevisiae* employs complex regulation strategies to tolerate low pH stress during ethanol production’, *Microb. Cell Fact.*, vol. 21, no. 1, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.1186/s12934-022-01974-3>.
- [29] N. V. Narendranath and R. Power, ‘Relationship between pH and medium dissolved solids in terms of growth and metabolism of *Lactobacilli* and *Saccharomyces cerevisiae* during ethanol production’, *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 71, no. 5, pp. 2239–2243, May 2005, doi: <https://doi.org/10.1128/AEM.71.5.2239-2243.2005>.
- [30] U. Y. Salihu, U. G. Usman, A. Y. Abubakar, and G. Mansir, ‘Effect of pH and Temperature on Bioethanol Production: Evidences from the Fermentation of Sugarcane Molasses using *Saccharomyces cerevisiae*’, *Dutse Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 8, no. 4b, pp. 9–16, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.4314/dujopas.v8i4b.2>.
- [31] P. Masson and S. Lushchekina, ‘Conformational Stability and Denaturation Processes of Proteins Investigated by Electrophoresis under Extreme Conditions’, *Molecules*, vol. 27, no. 20, Oct. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/molecules27206861>.
- [32] M. A. Mohammad, I. M. Grimsey, R. T. Forbes, I. S. Blagbrough, and B. R. Conway, ‘Effect of mechanical denaturation on surface free energy of protein powders’, *Colloids Surf. B Biointerfaces*, vol. 146, pp. 700–706, Oct. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.07.010>.
- [33] L. Dai, R. Shivananda, J. Hinrichs, and J. Weiss, ‘Foaming of Acid-Hydrolyzed Insoluble Microalgae Proteins from *Chlorella protothecoides*’, *Food Biophys.*, vol. 15, no. 3, pp. 368–375, Sep. 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s11483-020-09630-2>.
- [34] S. R. Ahmed, ‘Influence of high temperature on corrosion behavior of 304 stainless steel in chloride solutions’, *AIP Adv.*, vol. 6, no. 11, Nov. 2016, doi: <https://doi.org/10.1063/1.4967204>.

- [35] R. T. Loto, S. Oladipupo, T. Folarin, and E. Okosun, 'Impact of chloride concentrations on the electrochemical performance and corrosion resistance of austenitic and ferritic stainless steels in acidic chloride media', *Discover Applied Sciences*, vol. 7, no. 7, Jul. 2025, doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07234-4>.
- [36] H. M. Ezuber, 'Influence of temperature on the pitting corrosion behavior of AISI 316L in chloride-CO<sub>2</sub> (sat.) solutions', *Mater. Des.*, vol. 59, pp. 339–343, Jul. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2014.02.045>.
- [37] C. Winder, 'The Toxicology of Chlorine', *Environ. Res.*, vol. 85, no. 2, pp. 105–114, Feb. 2001, doi: <https://doi.org/10.1006/ENRS.2000.4110>.
- [38] C. W. White and J. G. Martin, 'Chlorine gas inhalation: Human clinical evidence of toxicity and experience in animal models', Jul. 01, 2010. doi: <https://doi.org/10.1513/pats.201001-008SM>.
- [39] S. Achanta and S. E. Jordt, 'Toxic effects of chlorine gas and potential treatments: a literature review', 2021, *Taylor and Francis Ltd.* doi: <https://doi.org/10.1080/15376516.2019.1669244>.
- [40] K. Chotimah, *Statistik daerah kabupaten Gunungkidul 2024*. BPS Kab Gunungkidul, 2024. Accessed: Jul. 19, 2025. [Online]. Available: <https://gunungkidulkab.bps.go.id/id/publication/2024/12/03/d6fc260aab5300284db747c4/statistik-daerah-kabupaten-gunungkidul-2024.html>
- [41] Deendarlianto, A. Widyaparaga, T. Widodo, I. Handika, I. Chandra Setiawan, and A. Lindasista, 'Modelling of Indonesian road transport energy sector in order to fulfill the national energy and oil reduction targets', *Renew. Energy*, vol. 146, pp. 504–518, Feb. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.169>.