

Rancang Bangun Fermentor Akrilik dengan Sistem Sirkulasi untuk Produksi Bioetanol dari Molases

Kerisna Darmawan Syahputra¹⁾, Farhan Johansyah Putra²⁾, Desniorita³⁾, Rosalina⁴⁾, Riski Gunawan Nasution^{5*)}

^{1,2,3,4,5)}Program Studi Teknologi Rekayasa Bioproses Energi Terbarukan, Politeknik ATI Padang, Jalan Kampus ATIP, Bungo Pasang, Koto Tangah, Kota Padang, Sumatera Barat, Indonesia

*e-mail: mhdriski200408@gmail.com

Received: 29-12-2025

Accepted: 05-01-2026

Published: 08-01-2026

ABSTRACT

This study aims to design, build, and test the performance of an acrylic fermenter integrated with a peristaltic pump circulation system for bioethanol production from molasses. The 7-liter fermenter was designed using transparent and easily fabricated acrylic material. The peristaltic pump circulation system was implemented to maintain substrate homogeneity, nutrient distribution, and temperature stability during the fermentation process. The study was conducted by comparing two operating conditions, namely fermentation with circulation and without circulation, using *Saccharomyces cerevisiae* yeast. The parameters observed included temperature, pH, decrease in Brix value (sugar content), and density during 5 days of fermentation. The results showed that the circulation system successfully maintained a more stable temperature in the range of 30–31°C and a constant pH. Fermentation with circulation also accelerated the exponential phase of yeast growth, although the duration was shorter due to faster sugar consumption. The decrease in Brix value in the circulation system was more significant, with an average reduction of 1.13 °Bx compared to 0.8 °Bx in the non-circulation system, indicating better substrate conversion efficiency. Additionally, theoretical ethanol estimation based on sugar consumption suggested the circulation system could yield up to 3.3% v/v ethanol, compared to 2.0% v/v in the non-circulation system, underscoring the importance of direct ethanol measurement for comprehensive process evaluation. It was concluded that the acrylic fermenter with a peristaltic pump circulation system was effective in improving the homogeneity and stability of fermentation conditions. For further development, it is necessary to add an automatic control system and optimize circulation speed to maximize bioethanol productivity..

Keywords: *bioethanol; acrylic fermenter; molasses; peristaltic pump; saccharomyces cerevisiae*

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk merancang, membangun, dan menguji kinerja fermentor berbahan akrilik yang diintegrasikan dengan sistem sirkulasi pompa peristaltik untuk produksi bioetanol dari molase. Fermentor berkapasitas 7 liter dirancang menggunakan material akrilik yang transparan dan mudah difabrikasi. Sistem sirkulasi pompa peristaltik diterapkan untuk menjaga homogenitas substrat, distribusi nutrisi, dan stabilitas suhu selama proses fermentasi berlangsung. Penelitian dilakukan dengan membandingkan dua kondisi operasi, yaitu fermentasi menggunakan sirkulasi dan tanpa sirkulasi, dengan memanfaatkan ragi *Saccharomyces cerevisiae*. Parameter yang diamati meliputi suhu, pH, penurunan nilai Brix (kadar gula), dan densitas selama fermentasi 5 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem sirkulasi berhasil mempertahankan suhu yang lebih stabil pada kisaran 30–31°C serta pH yang konstan. Fermentasi dengan sirkulasi juga mempercepat fase eksponensial pertumbuhan ragi, meskipun durasinya lebih singkat akibat konsumsi gula yang lebih cepat. Penurunan nilai Brix pada sistem bersirkulasi lebih signifikan, dengan rata-rata penurunan sebesar 1,13 °Bx dibandingkan 0,8 °Bx pada sistem tanpa sirkulasi, yang mengindikasikan efisiensi konversi substrat yang lebih baik. Estimasi etanol teoretis berdasarkan konsumsi gula menunjukkan sistem sirkulasi berpotensi menghasilkan etanol hingga 3,3% v/v, dibandingkan 2,0% v/v pada sistem tanpa sirkulasi, yang menegaskan pentingnya pengukuran etanol langsung untuk evaluasi proses yang komprehensif. Disimpulkan bahwa fermentor akrilik dengan sistem sirkulasi pompa peristaltik efektif dalam meningkatkan homogenitas dan stabilitas kondisi fermentasi. Untuk pengembangan selanjutnya, diperlukan penambahan sistem kontrol otomatis dan optimasi kecepatan sirkulasi guna memaksimalkan produktivitas bioetanol.

Kata Kunci: *bioetanol, fermentor akrilik, molase, pompa peristaltik, saccharomyces cerevisiae*

I. PENDAHULUAN

Krisis energi dan perubahan iklim merupakan isu global yang mendesak untuk segera diatasi. Ketergantungan Indonesia terhadap energi fosil masih sangat tinggi, yakni sekitar 88% dari total konsumsi energi nasional. Kondisi ini tidak hanya membebani aspek ekonomi, tetapi juga memperburuk lingkungan melalui peningkatan emisi gas rumah kaca (Dewan Energi Nasional, 2023). Untuk mengatasi hal tersebut, pemerintah telah menerbitkan UU Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi, yang mendorong pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT) di berbagai sektor. Target bauran energi EBT ditetapkan sebesar 23% pada tahun 2025 dan meningkat menjadi 31% pada 2050. Namun, hingga tahun 2023 capaian baru mencapai 13,09%. Padahal, potensi EBT Indonesia sangat besar, meliputi mikrohidro 450 MW, energi surya 4,80 kWh/m²/hari, energi angin 3-6 m/detik, energi nuklir 3 GW, dan biomassa 50 GW yang merupakan potensi terbesar (Kementerian ESDM, 2022).

Penggunaan energi fosil yang dominan di sektor transportasi, industri, rumah tangga, dan komersial tidak sejalan dengan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) berdasarkan Perpres No. 22 Tahun 2017. Oleh sebab itu, diperlukan inovasi dalam pengembangan sumber energi terbarukan, salah satunya bioetanol. Bioetanol merupakan bahan bakar alternatif dari kelompok biofuel yang dihasilkan melalui fermentasi substrat karbohidrat dengan bantuan mikroorganisme.

Di Indonesia, molase berpotensi besar sebagai bahan baku bioetanol. Molase adalah produk samping industri gula tebu yang masih mengandung gula cukup tinggi. Karena viskositas tinggi serta kadar gula dan pH yang berlebih, molase perlu melalui tahap pra-perlakuan sebelum difermentasi (Egamiati et al., 2022). Proses konversi molase menjadi bioetanol dilakukan melalui fermentasi menggunakan mikroorganisme, khususnya ragi *Saccharomyces cerevisiae*.

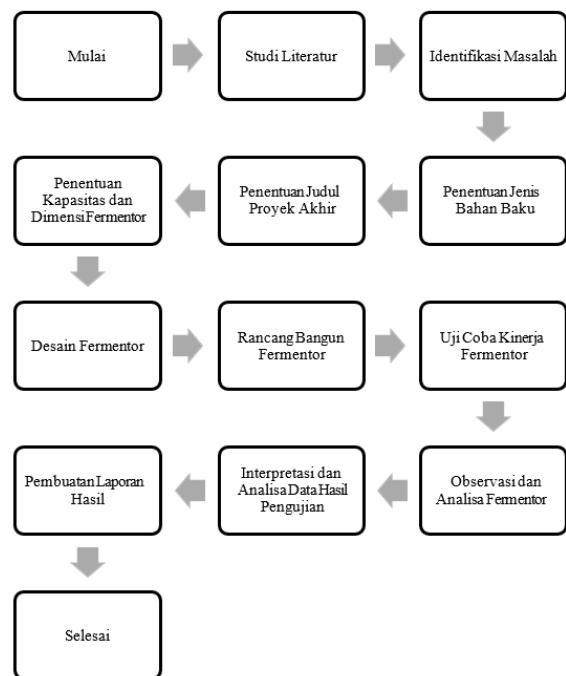
Pemilihan material fermentor menjadi aspek penting. Akrilik memiliki keunggulan dibanding kaca maupun stainless steel karena lebih ringan, tidak rapuh, mudah dibentuk, relatif murah, dan transparan untuk memudahkan pemantauan (Yadav et al., 2020). Selain material, sistem sirkulasi juga krusial. Pengadukan menjaga homogenitas substrat, mencegah pengendapan mikroorganisme, dan menstabilkan suhu dalam fermentor. *Saccharomyces cerevisiae* tumbuh optimal pada suhu 30-35 °C dan

pH 4,5-5,0. Suhu terlalu tinggi dapat menghasilkan asam asetat yang bersifat toksik, sedangkan suhu rendah memperlambat fermentasi (Torija, 2018; Raditya, 2019).

Pompa peristaltik dipilih sebagai sistem sirkulasi karena mampu menjaga sterilitas media. Prinsip kerjanya menggunakan tekanan roller pada selang fleksibel, sehingga cairan tidak bersentuhan langsung dengan komponen pompa. Keunggulan lainnya adalah laju alir dapat diatur dengan presisi, risiko kontaminasi rendah, serta aliran lebih halus dibanding agitasi mekanis yang berpotensi merusak sel (Nugroho et al., 2021; Shaikh et al., 2020).

II. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam studi ini adalah metode perancangan alat, yang dilaksanakan melalui beberapa tahapan sistematis. Setiap tahap disusun secara berurutan mulai dari perencanaan, perancangan, pembuatan, hingga pengujian kinerja alat. Alur tahapan perancangan tersebut ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Proses Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan rancang bangun untuk mengevaluasi kinerja fermentor berbahan akrilik yang dilengkapi sistem sirkulasi pompa peristaltik. Penelitian dilakukan melalui beberapa tahap utama, yaitu perancangan dan fabrikasi

fermentor, preparasi bahan baku, proses fermentasi, serta pengumpulan dan analisis data.

2.1 Perancangan dan Fabrikasi Fermentor

Fermentor dirancang menggunakan material akrilik dengan kapasitas 7 liter (diameter 15 cm, tinggi 43 cm) berdasarkan prinsip perancangan alat proses kimia. Sistem dilengkapi sirkulasi internal menggunakan pompa peristaltik untuk menjaga homogenitas medium. Perhitungan parameter aliran meliputi bilangan Reynolds, tekanan, dan waktu sirkulasi ($T = V/Q$) dilakukan untuk optimasi sistem. Adapun desain fermentor akrilik dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Desain Fermentor 3D

2.2 Variabel Penelitian

Dalam penelitian produksi bioetanol berbasis substrat molase ini, terdapat sejumlah variabel yang dikendalikan secara tetap untuk memastikan konsistensi eksperimen. Volume fermentor ditetapkan sebesar 5 liter, dengan tekanan operasi sirkulasi (jika ada) dijaga konstan pada 1 bar. Konsentrasi nutrien pendukung, yaitu urea dan $MgSO_4$, juga dipertahankan masing-masing pada level 200 ppm. Komposisi substrat utama menggunakan rasio tetap molase terhadap air sebesar 1:5, dan durasi proses fermentasi untuk semua perlakuan adalah 120 jam. Di sisi lain, variabel bebas yang menjadi fokus penelitian adalah penggunaan sistem sirkulasi dalam bioreaktor. Perbandingan dilakukan antara bioreaktor yang dilengkapi dengan sistem sirkulasi terhadap bioreaktor yang dioperasikan tanpa sirkulasi, dengan tujuan untuk menganalisis pengaruh mekanisme sirkulasi tersebut terhadap kinerja proses fermentasi dan kinerja bakteri *Saccharomyces Cerevisiae* dalam menurunkan kadar gula pada molase menggunakan nilai Brix pada produk.

2.3 Alat dan Bahan

Alat utama: fermentor akrilik, pompa peristaltik, termometer, pH meter, refraktometer, gas kromatografi. Bahan: molases, aquades, ragi *Saccharomyces cerevisiae*, urea, $MgSO_4$. Bahan baku yang digunakan adalah molase tebu yang diencerkan dengan aquades pada rasio 1:5. Sebagai inokulum digunakan ragi roti (*Saccharomyces cerevisiae*) yang diaktivasi terlebih dahulu. Nutrisi fermentasi berupa urea dan $MgSO_4$ ditambahkan dengan konsentrasi masing-masing 200 ppm untuk mendukung pertumbuhan mikroba. Variabel tetap yang diterapkan meliputi volume fermentasi 5 liter, waktu fermentasi 120 jam, dan tekanan sirkulasi 1 bar. Variabel bebas adalah ada atau tidaknya sistem sirkulasi pompa peristaltik.

2.4 Prosedur Eksperimen

Proses penelitian dimulai dengan tahap fabrikasi dan uji coba, di mana fermentor dirakit sesuai desain yang telah direncanakan. Setelah perakitan, dilakukan pengujian menyeluruh untuk memastikan tidak adanya kebocoran dan untuk menguji kinerja sistem sirkulasi (jika diterapkan) sebelum digunakan untuk fermentasi. Selanjutnya, dilakukan pretreatment substrat dimana molases diencerkan dengan air mengikuti rasio 1:5. Campuran ini kemudian dipanaskan hingga suhu 85°C, sementara secara terpisah, ragi (*Saccharomyces cerevisiae*) dan nutrien (urea dan $MgSO_4$) diaktivasi sebagai persiapan. Tahap inti yaitu proses fermentasi dimulai dengan menginokulasi media yang telah dipretreatment menggunakan ragi aktif dengan konsentrasi 15% (v/v). Fermentasi kemudian berlangsung selama 5 hari (120 jam), dengan pemantauan parameter kunci seperti suhu, pH, dan kadar gula (°Brix) yang dilakukan setiap 24 jam untuk memantau perkembangan proses. Setelah fermentasi selesai, dilakukan tahap analisis produk. Densitas atau massa jenis sampel diukur dengan menggunakan piknometer. Data dari analisis ini akan digunakan untuk mengevaluasi kinerja dan hasil dari perlakuan yang diterapkan.

Analisis Data

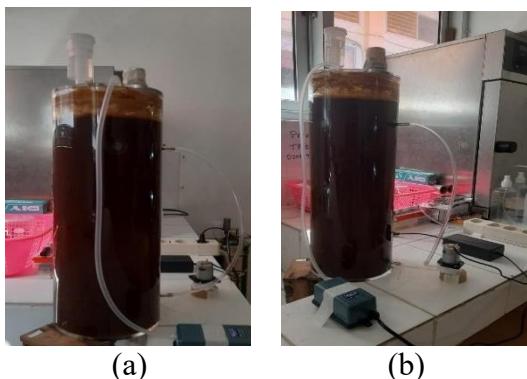
Data suhu, pH dan Brix, dianalisis secara komparatif antara sistem sirkulasi dan non-sirkulasi menggunakan pendekatan deskriptif-kuantitatif.

Pengumpulan data dilakukan dalam tiga kali pengulangan untuk setiap kondisi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Evaluasi Kinerja Fermentor Akrilik dengan Sistem Sirkulasi

Fermentor yang digunakan dalam penelitian ini merupakan hasil rancangan yang dibuat dari bahan akrilik dan dilengkapi dengan sistem sirkulasi berbasis pompa peristaltik. Pemilihan akrilik dilakukan karena material ini memiliki sejumlah keunggulan, antara lain mudah dibentuk, transparan sehingga memudahkan proses observasi, serta harganya relatif ekonomis untuk skala laboratorium (Yadav et al., 2020). Sementara itu, penggunaan pompa peristaltik berfungsi menciptakan aliran sirkulasi internal yang menjaga distribusi substrat dan mikroorganisme tetap merata di dalam media fermentasi, sekaligus meminimalkan risiko kontaminasi dan kerusakan sel akibat gesekan mekanis (Nugroho et al., 2021; Shaikh et al., 2020). Fermentor hasil rancangan ini terdiri atas beberapa komponen utama, meliputi wadah fermentasi berbahan akrilik, unit pompa peristaltik sebagai penggerak sirkulasi, serta rangkaian sambungan yang memastikan kelancaran aliran media. Adapun rancangan dan bentuk fermentor yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Fermentor Akrilik (a. Tampak Samping; b. Tampak Depan)

Berdasarkan evaluasi penelitian, sistem sirkulasi pompa peristaltik terbukti efektif dalam menjaga homogenitas medium fermentasi dan mempercepat fase eksponensial pertumbuhan ragi, meskipun kecepatan sirkulasi berlebihan dapat menyebabkan resuspensi gula yang memicu fluktuasi nilai Brix. Fermentor akrilik memiliki keunggulan dalam hal

transparansi, kemudahan fabrikasi, dan ekonomis untuk skala laboratorium, namun memiliki keterbatasan pada ketahanan suhu tinggi, risiko goresan, dan kerentanan terhadap kontaminasi jangka panjang (Yadav et al., 2020). Tantangan utama sistem ini adalah belum adanya sensor *online* untuk pemantauan *real-time* parameter kunci (pH, suhu, Brix) serta ketiadaan kontrol suhu otomatis yang mengakibatkan ketergantungan pada kondisi lingkungan. Untuk pengembangan selanjutnya, diperlukan integrasi sensor *real-time*, optimasi kecepatan sirkulasi, penggunaan material yang lebih tahan (seperti stainless steel), dan implementasi sistem kontrol otomatis guna meningkatkan efisiensi dan konsistensi produksi bioetanol.

3.2 Analisis Stabilitas Parameter Fermentasi

Hasil pengamatan parameter suhu dan pH selama fermentasi 5 hari menunjukkan perbedaan pola antara sistem dengan sirkulasi dan tanpa sirkulasi. Pada sistem dengan sirkulasi, suhu fermentasi stabil pada kisaran 30-31°C, sementara pada sistem tanpa sirkulasi suhu lebih bervariasi dengan rentang 27-31 °C. Stabilitas suhu yang lebih baik pada sistem bersirkulasi didukung oleh distribusi panas yang lebih merata dalam medium fermentasi, sesuai dengan prinsip homogenisasi dalam bioreaktor (Torija, 2018).

1. Percobaan Ke-1

Adapun data pengamatan pada percobaan ke-1 pada fermentor tanpa sirkulasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Pengamatan Percobaan 1 tanpa Sirkulasi

Tanggal	Jam (WIB)	Suhu (°C)	pH	Brix	Densitas (gr/ml)
21-07-2025	09.00	30	4,4	12,5	1,03255
22-07-2025	09.00	31	4,4	12,4	1,03249
23-07-2025	09.00	31	4,3	12,3	1,03204
24-07-2025	09.00	31	4,3	11,8	1,03197
25-07-2025	09.00	31	4,3	11,6	1,03193

Adapun data pengamatan pada percobaan ke-1 pada fermentor dengan sirkulasi dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Pengamatan Percobaan 1 dengan Sirkulasi

Tanggal	Jam (WIB)	Suhu (°C)	pH	Brix	Densitas (gr/ml)
21-07-2025	09.00	27	3,9	14,7	1,03977
22-07-2025	09.00	28	3,9	14,5	1,03964
23-07-2025	09.00	28	3,9	14,4	1,03894
24-07-2025	09.00	27	4	14,1	1,03896
25-07-2025	09.00	27	4	14	1,04162

2. Percobaan Ke-2

Adapun data pengamatan pada percobaan ke-2 pada fermentor tanpa sirkulasi dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Pengamatan Percobaan 2 tanpa Sirkulasi

Tanggal	Jam (WIB)	Suhu (°C)	pH	Brix	Densitas (gr/ml)
28-07-2025	09.00	30	4,1	12,7	1,09771
29-07-2025	09.00	31	4,1	12,5	1,06449
30-07-2025	09.00	31	4,1	12,2	1,05805
31-07-2025	09.00	31	4,1	12	1,05301
01-08-2025	09.00	31	4,1	11,8	1,05298

Adapun data pengamatan pada percobaan ke-2 pada fermentor dengan sirkulasi dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Data Pengamatan Percobaan 2 dengan Sirkulasi

Tanggal	Jam (WIB)	Suhu (°C)	pH	Brix	Densitas (gr/ml)
28-07-2025	09.00	30	4	14,5	1,14078
29-07-2025	09.00	28	4	14,4	1,13977
30-07-2025	09.00	28	4	14,1	1,04978
31-07-2025	09.00	30	4	13,9	1,04963
01-08-2025	09.00	30	4	13,8	1,0496

3. Percobaan Ke-3

Adapun data pengamatan pada percobaan ke-3 pada fermentor tanpa sirkulasi dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Data Pengamatan Percobaan 3 tanpa Sirkulasi

Tanggal	Jam (WIB)	Suhu (°C)	pH	Brix	Densitas (gr/ml)
04-08-2025	09.00	30	4,1	12,3	1,09834
05-08-2025	09.00	31	4,1	12,2	1,09828
06-08-2025	09.00	31	4,1	12	1,09814
07-08-2025	09.00	31	4,1	11,9	1,09809
08-08-2025	09.00	31	4,1	11,7	1,09795

Adapun data pengamatan pada percobaan ke-2 pada fermentor dengan sirkulasi dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Data Pengamatan Percobaan 3 dengan Sirkulasi

Tanggal	Jam (WIB)	Suhu (°C)	pH	Brix	Densitas (gr/ml)
04-08-2025	09.00	30	4,1	16	1,13975
05-08-2025	09.00	30	4,1	14,5	1,06438
06-08-2025	09.00	31	4,1	14,3	1,06414
07-08-2025	09.00	31	4,1	14,2	1,05308
08-08-2025	09.00	30	4,1	14	1,05292

Berdasarkan hasil pengamatan selama 5 hari fermentasi, sistem fermentasi dengan sirkulasi pompa peristaltik menunjukkan performa yang setara dalam menjaga stabilitas parameter suhu dibandingkan sistem tanpa sirkulasi. Data pada Tabel 1-6 menunjukkan bahwa suhu pada kedua sistem secara konsisten berada dalam kisaran optimal 30-31°C, dengan variasi minimal. Sementara itu, parameter pH pada sistem tanpa sirkulasi juga relatif stabil, yaitu pada 4.1-4.4 untuk percobaan 1 dan 4.1 untuk percobaan 2 dan 3. Pada sistem dengan sirkulasi, pH juga dijaga dalam rentang yang sempit, yaitu 3.9-4.0 untuk percobaan 1 dan 4.0-4.1 untuk percobaan 2 dan 3.

Meskipun demikian, keunggulan sistem bersirkulasi terlihat dari kemampuannya mencapai homogenitas medium yang lebih baik

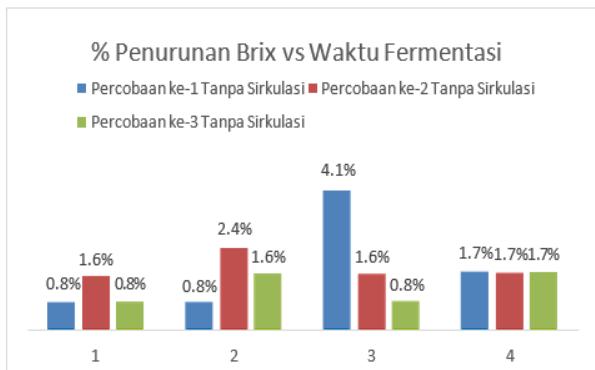
sejak awal proses. Hal ini didukung oleh tiga faktor utama: (1) distribusi panas dan metabolit yang lebih merata, (2) aliran yang dihasilkan pompa peristaltik membantu menyeragamkan suhu di seluruh bagian fermentor, dan (3) kemampuan sistem sirkulasi dalam mendistribusikan nutrisi dan hasil metabolisme (seperti asam organik) secara lebih efektif. Dengan demikian, sistem sirkulasi tidak hanya mempertahankan stabilitas, tetapi juga menciptakan kondisi lingkungan yang lebih homogen bagi pertumbuhan *Saccharomyces cerevisiae*.

3.3 Kinematika Penurunan Brix dan Konsumsi Substrat

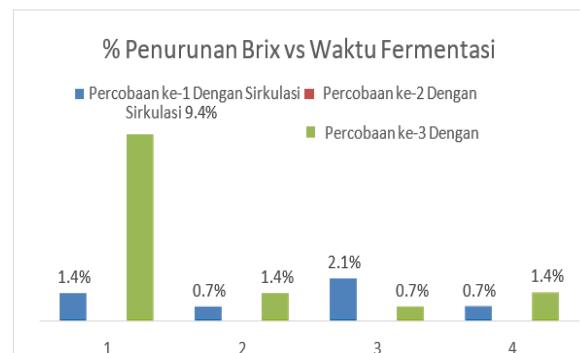
Perubahan nilai Brix menjadi indikator utama dalam penelitian ini untuk memantau dinamika konsumsi substrat oleh *Saccharomyces cerevisiae*. Penurunan nilai Brix mencerminkan konversi gula terlarut dalam molase menjadi etanol, sekaligus mengindikasikan efisiensi fermentasi. Analisis terhadap pola penurunan Brix juga memungkinkan identifikasi fase pertumbuhan mikroba (lag, eksponensial, stasioner, dan penurunan). Persentase penurunan Brix dihitung menggunakan persamaan 1:

$$\text{Persentase (\%)} = \frac{B_0 - B_t}{B_0} \times 100\% \quad (1)$$

dengan B_0 adalah nilai Brix awal dan B_t adalah nilai Brix pada waktu t . Penelitian membandingkan kinerja dua sistem fermentasi—dengan dan tanpa sirkulasi pompa peristaltik melalui tiga kali replikasi percobaan untuk memastikan keandalan data. Hasil pengamatan kemudian divisualisasikan dalam bentuk kurva hubungan antara persentase penurunan Brix dan waktu fermentasi, seperti yang ditampilkan pada Gambar 4 (untuk sistem tanpa sirkulasi) dan Gambar 5 (untuk sistem dengan sirkulasi).



Gambar 4. Persentase Penurunan Brix vs Waktu Fermentasi Tanpa Sirkulasi



Gambar 5. Persentase Penurunan Brix vs Waktu Fermentasi Dengan Sirkulasi

Hasil pengamatan menunjukkan variasi pola penurunan Brix pada kedua sistem fermentasi. Pada sistem bersirkulasi, tercatat percepatan fase eksponensial yang signifikan (penurunan Brix 9,4% pada hari pertama percobaan ketiga), namun diikuti durasi fase yang lebih singkat akibat konsumsi substrat yang cepat. Sebaliknya, sistem tanpa sirkulasi menunjukkan fase adaptasi lebih panjang tetapi laju penurunan Brix lebih stabil setelah memasuki fase eksponensial (penurunan 4,1% pada hari ketiga percobaan pertama).

Fenomena fluktuasi Brix pada kedua sistem diduga disebabkan oleh resuspensi gula, autolisis sel, atau faktor teknis pengukuran. Analisis kinetika mengonfirmasi bahwa sistem sirkulasi mendorong pertumbuhan eksponensial yang cepat, namun mengorbankan stabilitas metabolik jangka panjang. Temuan ini menyoroti trade-off antara kecepatan fermentasi dan konsistensi produksi etanol, dimana sistem bersirkulasi cocok untuk aplikasi yang mengutamakan efisiensi waktu, sedangkan sistem tanpa sirkulasi berpotensi menghasilkan yield yang lebih stabil.

3.4 Karakteristik Penurunan Brix dan Kadar Gula

Proses fermentasi dengan *Saccharomyces cerevisiae* dimonitor melalui perubahan kadar gula terlarut (°Bx) sebagai indikator konversi substrat. Penelitian ini mengkaji pengaruh sistem sirkulasi pompa peristaltik terhadap laju penurunan Brix selama fermentasi molase. Hasilnya menunjukkan sistem bersirkulasi mempercepat konsumsi gula pada fase awal, tercermin dari penurunan Brix lebih tajam, namun diikuti stabilitas yang lebih rendah pada fase lanjut akibat terbatasnya ketersediaan substrat. Sebaliknya, sistem tanpa sirkulasi menunjukkan penurunan Brix lebih bertahap dengan pola konsumsi substrat yang lebih terkendali.

Tabel 7. Hubungan antara Brix dan Kadar Gula Tanpa Sirkulasi

Waktu ke -	Percobaan 1		Percobaan 2		Percobaan 3	
	Brix (°Bx)	Kadar Gula (%)	Brix (°Bx)	Kadar Gula (%)	Brix (°Bx)	Kadar Gula (%)
0	12,5	8,7	12,7	9,3	12,3	8,1
1	12,4	8,4	12,5	8,7	12,2	7,8
2	12,3	8,1	12,2	7,8	12	7,2
3	11,8	6,6	12	7,2	11,9	6,9
4	11,6	6	11,8	6,6	11,7	6,3

Tabel 8. Hubungan antara Brix dan Kadar Gula Dengan Sirkulasi

Waktu ke -	Percobaan 1		Percobaan 2		Percobaan 3	
	Brix (°Bx)	Kadar Gula (%)	Brix (°Bx)	Kadar Gula (%)	Brix (°Bx)	Kadar Gula (%)
0	14,7	15,3	14,5	14,7	16	19,2
1	14,5	14,7	14,4	14,4	14,5	14,7
2	14,4	14,4	14,1	13,5	14,3	14,1
3	14,1	13,5	13,9	12,9	14,2	13,8
4	14	13,2	13,8	12,6	14	13,2

Berdasarkan analisis data (Tabel 7), teramati perbedaan karakteristik konsumsi substrat antara kedua sistem. Sistem tanpa sirkulasi menunjukkan penurunan kadar gula bertahap dari 8.1-9.3% menjadi 6.0-6.6% dalam 4 hari, mengindikasikan metabolisme mikroba yang stabil melalui mekanisme difusi alami. Penurunan ini selaras dengan nilai Brix yang turun dari rata-rata 12.5°Bx menjadi sekitar 11.7°Bx.

Sebaliknya, sistem bersirkulasi dengan kadar gula awal lebih tinggi (13.2-19.2%) mengalami penurunan lebih lambat menjadi 12.6-13.2% (Tabel 8). Pola ini juga terlihat pada data Brix yang turun dari rata-rata awal 15.1°Bx menjadi sekitar 13.9°Bx. Hal ini diduga akibat tekanan osmotik dari substrat pekat yang menghambat adaptasi awal sel ragi, sebagaimana tercermin dari penurunan Brix yang kurang drastis pada fase awal dibandingkan sistem tanpa sirkulasi, meskipun nilai absolutnya lebih tinggi (Torija, 2018).

Perbedaan kinerja ini tidak hanya disebabkan oleh metode fermentasi, tetapi juga kondisi awal bahan baku. Molase pada sistem tanpa sirkulasi menunjukkan tanda fermentasi spontan sebelumnya yang menurunkan kadar gula dan Brix awal, sementara molase segar pada sistem bersirkulasi mempertahankan konsentrasi gula dan Brix yang

tinggi. Meskipun demikian, sistem bersirkulasi tetap menunjukkan keunggulan dalam homogenitas medium dan distribusi nutrisi.

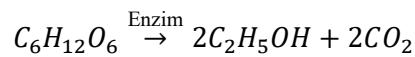
Pola konsumsi gula dan penurunan Brix pada kedua sistem sesuai dengan teori kinetika fermentasi, di mana fase logaritmik terjadi pada hari 1-3 diikuti fase stasioner. Temuan ini menggarisbawahi pentingnya kontrol kualitas bahan baku dan optimasi konsentrasi substrat dalam desain proses fermentasi, terlepas dari konfigurasi sistem yang digunakan. Nilai Brix secara konsisten mencerminkan tren penurunan kadar gula yang disebabkan oleh aktivitas metabolismik *Saccharomyces cerevisiae* (Nugroho et al., 2021).

3.5 Analisis Densitas Medium Fermentasi

Pengukuran densitas medium fermentasi menunjukkan tren yang konsisten dengan parameter lainnya. Densitas medium mengalami penurunan seiring dengan berkurangnya konsentrasi gula, yang memiliki densitas lebih rendah (0,789 g/mL) (Raditya, 2019). Pada sistem bersirkulasi, penurunan densitas terjadi lebih cepat, dari 1,04162 g/mL menjadi 1,03894 g/mL, sementara pada sistem tanpa sirkulasi penurunan lebih lambat dari 1,03255 g/mL menjadi 1,03193 g/mL. Perbedaan pola perubahan densitas ini mengonfirmasi bahwa sistem sirkulasi mempercepat proses fermentasi. Namun, perlu dicatat bahwa fluktuasi densitas pada beberapa titik pengukuran mungkin disebabkan oleh ketidakseragaman sampel atau pengaruh gelembung CO₂ yang terlarut dalam medium (Egamiati et al., 2022).

3.6 Analisis Kadar Etanol Berdasarkan Kadar Gula

Glukosa (C₆H₁₂O₆) diubah menjadi etanol (C₂H₅OH) dan karbon dioksida (Nelson & Cox, 2017).



1. Massa Molekul Relatif (Mr):

- Glukosa (C₆H₁₂O₆): 180 g/mol
 - Etanol (C₂H₅OH): 46 g/mol
- Dari stoikiometri, 1 mol glukosa (180 g) menghasilkan 2 mol etanol (92 g).

2. Faktor Konversi Teoritis

Yield etanol maksimum dari glukosa adalah:

$$\text{Yield}_{\text{massa}} = \frac{2 \times 46}{180} \times 100\% \approx 51.1\%$$

Artinya, secara teori, setiap 1 gram gula (glukosa) yang dikonsumsi dapat menghasilkan maksimal 0,511 gram etanol (Walker & Walker (2018).

3. Konversi ke Kadar Volume/Volume (% v/v):

Untuk mengonversi estimasi massa etanol ke satuan % v/v (persen volume etanol per volume total cairan), diperlukan densitas etanol ($\approx 0.789 \text{ g/mL}$ pada 20°C) dan asumsi densitas medium fermentasi mendekati air (1 g/mL).

$$\text{Etanol (\% v/v)} \approx \frac{\text{Massa Etanol (g/L)}}{0.789 \times 10}$$

Penyederhanaan untuk estimasi cepat:

$$\text{Etanol (\% v/v)} = \text{Penurunan Kadar Gula (\%)} \times 0.51 \times F$$

dimana F adalah faktor koreksi yang memperhitungkan densitas dan efisiensi. Untuk estimasi konservatif dengan efisiensi $\sim 90\%$, $F = 1.1$, sehingga rumus praktisnya:

$$\text{Etanol (\% v/v)} = \text{Penurunan Kadar Gula (\%)} \times 0.56$$

Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 9 dan Tabel 10.

Tabel 9. Kadar Etanol pada Sistem Tanpa Sirkulasi

Waktu (hari)	Rata-rata Penurunan Kadar Gula (%)	Akumulasi Etanol (% v/v)
0	0.0	0.0
1	0.8	0.4
2	1.7	1.0
3	2.9	1.6
4	3.0	1.7

Tabel 10. Kadar Etanol pada Sistem Dengan Sirkulasi

Waktu (hari)	Rata-rata Penurunan Kadar Gula (%)	Akumulasi Etanol (% v/v)
0	0.0	0.0
1	3.4	1.9
2	4.0	2.2
3	4.8	2.7
4	5.0	2.8

Berdasarkan ini menunjukkan bahwa sistem sirkulasi berpotensi menghasilkan akumulasi etanol yang lebih tinggi (3,3% v/v) dibandingkan sistem tanpa sirkulasi (2,0% v/v) dalam waktu 4 hari. Data ini selaras dengan pola penurunan Brix dan kadar gula yang lebih signifikan pada sistem bersirkulasi. Namun, penting untuk dicatat bahwa angka ini adalah estimasi teoretis maksimum. Dalam praktiknya, hasil pengukuran langsung dengan alkohol meter atau gas kromatografi akan lebih rendah karena faktor seperti efisiensi konversi mikroba yang tidak mencapai 100%, penggunaan gula untuk pertumbuhan biomassa, dan penguapan etanol. Oleh karena itu, integrasi pengukuran kadar etanol langsung sangat disarankan dalam penelitian lanjut untuk validasi data, perhitungan yield (Yp/s) yang akurat, dan analisis efisiensi proses fermentasi yang lebih komprehensif.

Pengukuran densitas medium fermentasi menunjukkan tren yang konsisten dengan parameter lainnya. Densitas medium mengalami penurunan seiring dengan berkurangnya konsentrasi gula, yang memiliki densitas lebih rendah ($0,789 \text{ g/mL}$) (Raditya, 2019). Pada sistem bersirkulasi, penurunan densitas terjadi lebih cepat, dari $1,04162 \text{ g/mL}$ menjadi $1,03894 \text{ g/mL}$, sementara pada sistem tanpa sirkulasi penurunan lebih lambat dari $1,03255 \text{ g/mL}$ menjadi $1,03193 \text{ g/mL}$.

Perbedaan pola perubahan densitas ini mengonfirmasi bahwa sistem sirkulasi mempercepat proses fermentasi. Namun, perlu dicatat bahwa fluktuasi densitas pada beberapa titik pengukuran mungkin disebabkan oleh ketidakseragaman sampel atau pengaruh gelembung CO_2 yang terlarut dalam medium (Egamiati et al., 2022).

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa fermentor berbahan akrilik berkapasitas 7 liter dengan sistem sirkulasi pompa peristaltik telah berhasil dirancang dan dibangun untuk produksi bioetanol dari molase. Sistem sirkulasi terbukti efektif dalam menjaga homogenitas medium, stabilitas suhu ($30\text{-}31^\circ\text{C}$), dan pH yang optimal bagi pertumbuhan *Saccharomyces cerevisiae*. Fermentasi dengan sirkulasi menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan tanpa sirkulasi, ditandai dengan penurunan nilai Brix yang lebih signifikan (hingga 9,4%) serta percepatan fase eksponensial pertumbuhan ragi, meskipun dengan durasi yang lebih singkat akibat konsumsi

substrat yang lebih cepat. Estimasi teoritis menunjukkan sistem sirkulasi berpotensi menghasilkan etanol hingga ~3,3% v/v, lebih tinggi dari sistem tanpa sirkulasi (~2,0% v/v). Namun, untuk evaluasi kinerja yang komprehensif, pengukuran langsung kadar etanol sangat direkomendasikan. Secara keseluruhan, integrasi sistem sirkulasi pompa peristaltik pada fermentor akrilik berpotensi meningkatkan efisiensi produksi bioetanol skala laboratorium, meskipun masih diperlukan pengembangan lebih lanjut pada aspek kontrol otomatis, pengukuran produk akhir, dan ketahanan material untuk aplikasi jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Białas, W., Szymanowska-Powałowska, D., & Lewandowicz, G. (2010). Technical Aspects of Ethanol Production. *Biotechnology and Food Science*, 74(1), 45-52.
- Dewan Energi Nasional. (2023). *Outlook Energi Indonesia*. DEN.
- Egamiati, D., Nugraha, A., & Pratama, F. (2022). Pemanfaatan Molase sebagai Substrat Fermentasi dalam Produksi Bioetanol. *International Journal of Renewable Energy Research*, 12(3), 1456–1465.
- Kementerian ESDM. (2022). *Laporan Statistik EBTKE*. Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi.
- Nelson, D. L. dan Cox, M. M. (2017). *Lehninger Principles of Biochemistry*, 7th edition. New York: W. H. Freeman.
- Nugroho, H.W., Rachman, N., & Adi, W.A. (2021). Aplikasi Peristaltic Pump dalam Sistem Bioreaktor Fermentasi Etanol Skala Laboratorium. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*, 32(2), 135–142.
- Raditya, A. (2019). Pengaruh Suhu dan pH terhadap Proses Fermentasi Bioetanol Menggunakan Ragi *Saccharomyces cerevisiae*. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 8(1), 45–52.
- Shaikh, T., Salunkhe, R., & Gondkar, P. (2020). Thermal and Mechanical Behavior of PMMA Composites Reinforced with Nano-TiO₂. *InTechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89920>
- Torija, M.J. (2018). Effects of Temperature on Yeast Metabolism in Ethanol Production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(5), 2119–2130.
- Walker, G.M., & Walker, R.S.K. (2018). *Bioethanol: Science and Technology of Fuel Alcohol*. Bridgwater, UK: Bio-Ethanol.
- Yadav, D., Khobragade, A., & Saini, R. (2020). Comparative Study of Acrylic and Glass for Lab-scale Bioprocess Equipment. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 9(4), 51–54.