

Studi kinetika fermentasi sari apel untuk pembentukan alkohol menggunakan metode bioteknologi

Salwa Nadira Aulia

Program Studi Biologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
e-mail: slwandiralia@gmail.com

Kata Kunci:

Jus apel, fermentasi, kinetika, etanol, bioteknologi, kehalalan.

Keywords:

Apple juice, fermentation, kinetics, ethanol, biotechnology, halal status.

ABSTRAK

Fermentasi sari apel yang menggunakan ragi *Saccharomyces cerevisiae* adalah salah satu penerapan bioteknologi yang memiliki potensi untuk menghasilkan alkohol, baik untuk minuman fermentasi maupun sebagai bahan baku bioetanol. Kandungan gula sederhana yang tinggi dalam jus apel membuat keberhasilan fermentasi sangat tergantung pada dinamika penggunaan substrat dan laju produksi alkohol. Salah satu tantangan utama dalam proses ini adalah kurangnya pemahaman tentang dinamika

fermentasi dan pengaruh berbagai parameter terhadap hasil alkohol yang optimal. Tujuan artikel ini adalah untuk mengevaluasi dinamika fermentasi jus apel dalam pembentukan alkohol dan mengidentifikasi faktor-faktor utama yang mempengaruhi laju dan efisiensi fermentasi. Metode yang digunakan adalah pendekatan bioteknologi dengan melakukan studi serta analisis dinamika fermentasi jus apel menggunakan ragi *Saccharomyces cerevisiae*, disertai dengan pengamatan perubahan kadar gula dan alkohol sepanjang proses fermentasi. Data tentang dinamika dianalisis untuk memahami hubungan antara waktu fermentasi, penggunaan substrat, dan produksi alkohol. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu fermentasi, jumlah inokulum, ketersediaan nutrisi, dan durasi fermentasi adalah parameter penting yang mempengaruhi kecepatan fermentasi dan kadar alkohol yang dihasilkan. Produksi alkohol meningkat seiring berkurangnya kadar gula hingga mencapai titik optimal, kemudian cenderung stabil. Sebagai kesimpulan, studi tentang dinamika fermentasi jus apel sangat berperan dalam pengoptimalan proses fermentasi, sehingga dapat meningkatkan efisiensi produksi alkohol dan mendukung perkembangan aplikasi bioteknologi dalam bidang pangan dan energi terbarukan.

ABSTRACT

The fermentation of apple juice using *Saccharomyces cerevisiae* yeast is one application of biotechnology that has the potential to produce alcohol, both for fermented beverages and as a raw material for bioethanol. The high simple sugar content in apple juice makes the success of fermentation highly dependent on substrate utilization dynamics and alcohol production rate. One of the main challenges in this process is the lack of understanding of fermentation dynamics and the influence of various parameters on optimal alcohol yield. The purpose of this article is to evaluate the fermentation dynamics of apple juice in alcohol formation and identify the main factors that affect the rate and efficiency of fermentation. The method used is a biotechnology approach by conducting studies and analyzing the fermentation dynamics of apple juice using *Saccharomyces cerevisiae* yeast, accompanied by observations of changes in sugar and alcohol levels throughout the fermentation process. The data on the dynamics were analyzed to understand the relationship between fermentation time, substrate utilization, and alcohol production. The results showed that fermentation temperature, inoculum amount, nutrient availability, and fermentation duration were important parameters that influenced the fermentation rate and alcohol content produced. Alcohol production increased as the sugar content decreased until it reached an optimal point, then tended to stabilize. In conclusion, studies on the dynamics of apple juice fermentation play a significant role in optimizing the fermentation process,



thereby increasing alcohol production efficiency and supporting the development of biotechnology applications in the fields of food and renewable energy.

Pendahuluan

Apel merupakan salah satu jenis buah hortikultura utama yang sering diubah menjadi sari buah, cuka, atau minuman fermentasi seperti cider. Komposisi gula sederhana seperti glukosa, fruktosa, dan sukrosa beserta asam organik serta senyawa bioaktif dalam apel menjadikannya bahan yang sangat cocok untuk proses fermentasi oleh khamir, khususnya *Saccharomyces cerevisiae*, yang bertujuan menghasilkan etanol serta komponen lain yang memengaruhi mutu minuman (Wang et al., 2004). Selain sebagai komoditas konsumsi segar, apel juga banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku industri pengolahan pangan karena ketersediaannya yang melimpah dan karakteristik rasanya yang disukai konsumen. Berbagai upaya pengolahan, termasuk fermentasi dapat meningkatkan nilai tambah apel, memperpanjang umur simpan, sekaligus mengurangi potensi pemborosan komoditas saat panen melimpah. Dalam konteks keberlanjutan, pemanfaatan apel kualitas rendah atau limbah sortiran sebagai substrat fermentasi juga sejalan dengan prinsip ekonomi dan pengurangan limbah pangan.

Dari sudut pandang bioteknologi, proses ini bukan hanya penting bagi industri minuman beralkohol, tetapi juga untuk menciptakan bioetanol sebagai sumber energi alternatif serta memanfaatkan limbah pertanian secara berkelanjutan (Savitri et al., 2022). Fermentasi terkontrol yang memanfaatkan mikroorganisme seperti *Saccharomyces cerevisiae* memungkinkan konversi gula menjadi etanol dengan efisiensi tinggi dan dapat dijadikan model proses untuk berbagai bahan baku lain, baik berupa sari buah maupun biomassa lignoselulosa.

Berbagai riset global menunjukkan bahwa keberhasilan fermentasi jus apel sangat bergantung pada pola konsumsi gula dan produksi etanol, yang dapat dianalisis melalui model kinetika fermentasi. Wang et al. (2004) mengembangkan model kinetika non-linear untuk memperkirakan penggunaan glukosa, fruktosa, dan sukrosa oleh *S. cerevisiae* dalam proses fermentasi wine apel (Wang et al., 2004). Model tersebut membantu menggambarkan bagaimana setiap jenis gula dimanfaatkan dengan laju berbeda dan bagaimana perbedaan tersebut mempengaruhi kecepatan pembentukan etanol maupun sisa gula pada produk akhir. Peng et al. (2025) melaporkan bahwa cider dari apel varietas Fuji yang difermentasi menggunakan strain khamir berbeda menunjukkan profil kinetika, karakteristik fisikokimia, serta tingkat aktivitas antioksidan yang beragam (Peng et al., 2025). Hasil ini menegaskan bahwa pemilihan strain khamir bukan sekadar pertimbangan teknis, tetapi menentukan profil fermentasi secara keseluruhan, termasuk keseimbangan antara produksi etanol, stabilitas pH, dan pelestarian senyawa bioaktif. Di sisi lain, Sukhvir dan Kocher (2019) menekankan pentingnya pengaturan suhu, jumlah inokulum, dan nutrisi agar dapat memaksimalkan produksi etanol pada wine apel Golden Delicious (Sukhvir & Kocher, 2019). Temuan-temuan ini menunjukkan bahwa penelitian kinetika fermentasi sangat penting untuk memahami hubungan antara kondisi proses dan kecepatan

pembentukan alkohol dalam jus apel, sekaligus menyediakan dasar untuk merancang fermentasi yang lebih efisien dan terkontrol.

Di Indonesia, penelitian fermentasi serta kadar alkohol lebih sering menggunakan bahan lokal seperti singkong serta limbah pertanian. Hasanah et al. (2013) dari UIN Maulana Malik Ibrahim Malang menjelaskan bahwa durasi fermentasi secara signifikan memengaruhi peningkatan kadar alkohol pada tape singkong, dengan pola kenaikan yang jelas seiring waktu hingga mencapai puncak (Hasanah et al., 2013). Pola ini menggambarkan adanya fase-fase fermentasi yang dapat di analisis secara kuantitatif, mulai dari fase adaptasi, fase eksponensial dengan peningkatan etanol yang tajam, hingga fase stasioner ketika aktivitas khamir mulai menurun. Savitri et al. (2022, 2024) mengembangkan penggunaan limbah pertanian sebagai bahan baku bioetanol dan menekankan bahwa kadar karbohidrat substrat serta pengaturan proses fermentasi sangat menentukan jumlah etanol yang dihasilkan (Savitri et al., 2022). Pengalaman tersebut menunjukkan bahwa prinsip-prinsip bioproses yang diterapkan pada limbah pertanian dapat diadaptasi untuk substrat buah seperti jus apel yang secara komposisi lebih sederhana. Sementara itu, Suryanto et al. (2022) melakukan tinjauan mengenai kadar alkohol dalam makanan dan minuman menggunakan kromatografi gas, serta menekankan pentingnya data ilmiah tentang kadar etanol untuk menetapkan aturan kehalalan produk fermentasi. Pendekatan analitik yang akurat tersebut menjadi sangat relevan ketika produk fermentasi ingin dinilai status kehalalannya secara ilmiah dan dapat dipertanggung jawabkan (Suryanto et al., 2022).

Meskipun demikian, penelitian yang secara spesifik mengkaji kinetika fermentasi jus apel dan menghubungkannya dengan pandangan keislaman masih relatif sedikit, khususnya dalam konteks Indonesia. Sebagian besar penelitian tentang cider dan wine apel menitikberatkan pada optimasi kualitas sensori, stabilitas kimia, dan preferensi konsumen, sedangkan integrasi dengan kajian fiqh mengenai alkohol dalam pangan belum banyak dieksplorasi. Di sisi lain, kajian keislaman mengenai alkohol dalam makanan dan minuman sering kali menggunakan data umum tanpa mengaitkan secara rinci dengan dinamika proses fermentasi dan parameter kinetika yang menyertainya. Berdasarkan celah tersebut, artikel ini menyusun pertanyaan utama: (1) bagaimana pola perubahan kadar gula dan produksi alkohol selama fermentasi jus apel oleh *S. cerevisiae* berdasarkan hasil penelitian sebelumnya; (2) faktor-faktor proses apa yang paling dominan dalam memengaruhi kecepatan pembentukan alkohol; dan (3) bagaimana dampak temuan tersebut terhadap penilaian kehalalan produk fermentasi dari sudut pandang Islam. Untuk menjawab pertanyaan tersebut, artikel ini dibuat sebagai tinjauan pustaka yang menggabungkan hasil penelitian internasional dan nasional, termasuk repositori UIN Maulana Malik Ibrahim Malang, sehingga dapat menjadi fondasi teoretis untuk penelitian praktis di langkah selanjutnya.

Pembahasan

Fermentasi Sari Apel sebagai Proses Bioteknologi

Fermentasi sari apel merupakan proses biokonversi gula sederhana (glukosa, fruktosa, sukrosa) menjadi etanol oleh khamir, terutama *Saccharomyces cerevisiae*.

Kandungan gula dan asam organik yang tinggi menjadikan sari apel sebagai substrat yang baik untuk produksi cider dan apple wine, sekaligus model sederhana untuk proses produksi etanol skala industri (Sukhvir & Kocher, 2019; Wang et al., 2004). Dalam proses ini, gula yang terdapat pada sari apel dipecah melalui jalur glikolisis menjadi piruvat, kemudian direduksi menjadi etanol dan karbon dioksida dalam kondisi anaerob. Selain etanol, khamir juga menghasilkan metabolit sekunder seperti ester dan alkohol fusel yang turut menentukan aroma serta cita rasa produk fermentasi. Dari sisi teknologi, kombinasi komposisi substrat yang kaya gula dengan kemampuan fermentatif *Saccharomyces cerevisiae* menjadikan sari apel sebagai sistem modal yang ideal untuk mempelajari dasar-dasar bioproses.

Dalam konteks bioteknologi, fermentasi ini dapat diarahkan baik untuk industri minuman maupun pengembangan bioetanol sebagai energi terbarukan dan pemanfaatan limbah pertanian (Savitri et al., 2022). Ketika diarahkan untuk industri minuman, parameter seperti rasa, aroma, kejernihan, dan stabilitas produk menjadi perhatian utama. Sebaliknya, ketika fermentasi difokuskan pada produksi bioetanol, indikator yang diprioritaskan adalah rendemen etanol, produktivitas volumetrik, dan efisiensi konversi gula. Penelitian terbaru pada cider varietas Fuji menunjukkan bahwa pemilihan strain khamir memengaruhi laju fermentasi, perubahan sifat fisikokimia, dan aktivitas antioksidan produk, sehingga kontrol kondisi fermentasi menjadi sangat penting (Peng et al., 2025). Temuan ini menegaskan bahwa pemilihan mikroorganisme dan pengaturan kondisi lingkungan (suhu, pH, dan ketersediaan nutrisi) merupakan bagian dari rekayasa bioteknologi yang tidak dapat diabaikan dalam pengembangan produk fermentasi apel. Temuan-temuan tersebut menguatkan bahwa fermentasi sari apel bukan hanya proses tradisional, tetapi dapat dioptimalkan dengan pendekatan bioteknologi modern.

Model dan Parameter Kinetika Fermentasi Etanol pada Sari Apel

Pendekatan kinetika dalam fermentasi dimanfaatkan untuk menjelaskan secara matematis bagaimana pertumbuhan mikroorganisme, pemakaian substrat, dan pembentukan produk saling berkaitan. Pada fermentasi sari apel, beberapa parameter yang sering dianalisis meliputi laju pertumbuhan spesifik maksimum (μ_{max}), nilai konstanta kejenuhan substrat (K_s), perolehan biomassa terhadap substrat ($Y_{x/s}$), perolehan produk terhadap substrat ($Y_{p/s}$), serta produktivitas etanol (Q_p). Model Monod dan variasinya umumnya dipakai untuk menggambarkan hubungan antara laju pertumbuhan khamir dan konsentrasi gula, sedangkan model logistik maupun modified Gompertz kerap digunakan untuk memodelkan kurva kenaikan etanol selama proses fermentasi berlangsung (Ariyajaroenwong et al., 2016; Kularathne et al., 2020).

Dalam penelitian fermentasi wine apel, Wang et al. (2004) mengembangkan suatu model kinetika non-linier yang dirancang untuk memperkirakan laju pemakaian glukosa, fruktosa, dan sukrosa oleh *S. cerevisiae* strain CCTCC M201022. Model ini tidak hanya mampu menggambarkan perbedaan kecepatan konsumsi masing-masing jenis gula, tetapi juga dimanfaatkan untuk memprediksi pemanfaatan gula pada berbagai kadar awal yang berbeda. Hal ini menjadi signifikan karena di dalam sari apel, fruktosa dan glukosa tidak selalu dimetabolisme dengan kecepatan yang sama, sehingga

ketidakseimbangan tersebut akan berpengaruh pada profil pembentukan etanol dan banyaknya gula tersisa (residual sugar) pada produk akhir (Wang et al., 2004).

Penelitian lain yang dilakukan pada cider apel varietas Fuji melacak perubahan kadar gula, etanol, dan sejumlah parameter kimia lainnya selama fermentasi, kemudian menghubungkan hasil pengamatan tersebut dengan model kinetika dan ukuran aktivitas antioksidan produk (Peng et al., 2025). Di sisi lain, sebuah kajian review tentang produksi wine sebagai teknologi pascapanen menegaskan bahwa pemanfaatan model kinetika bukan hanya membantu perancangan proses fermentasi yang lebih rasional, tetapi juga memungkinkan dilakukan simulasi berbagai skenario operasi seperti perubahan suhu atau lama fermentasi tanpa harus melakukan terlalu banyak uji coba di laboratorium (Yurista & Aditiawati, 2021).

Dalam konteks Indonesia, pendekatan kinetika yang serupa telah diterapkan pada fermentasi bahan baku lokal. Huda (2017), misalnya, mengkaji pengaruh lama fermentasi terhadap konsentrasi glukosa dan alkohol pada suatu minuman tradisional, dan menemukan bahwa kadar etanol mencapai nilai puncak pada waktu tertentu, kemudian menurun seiring berkurangnya substrat yang tersedia dan kemungkinan terjadinya oksidasi etanol menjadi asam organik. Meskipun jenis bahan yang diteliti berbeda dengan sari apel, pola kinetika yang dihasilkan tetap konsisten dengan teori fermentasi secara umum dan dapat dijadikan rujukan ketika merancang ataupun memprediksi dinamika fermentasi pada sari apel (Huda et al., 2017).

Kinetika Fermentasi dan Faktor Proses yang Memengaruhi Alkohol

Kinetika digunakan untuk menjelaskan hubungan antara konsumsi gula, pertumbuhan khamir, dan pembentukan etanol. Parameter seperti laju pertumbuhan spesifik maksimum (μ_{max}), konstanta jenuh (K_s), dan yield etanol terhadap substrat (Y_p/s) sering digunakan dalam model Monod atau modified Gompertz untuk menggambarkan dinamika fermentasi (Kularathne et al., 2020). Melalui pemodelan kinetika, peneliti dapat mengestimasi bagaimana populasi khamir berkembang dari waktu ke waktu, seberapa cepat gula dikonsumsi, dan kapan proses mencapai titik optimum produksi etanol. Pendekatan ini memungkinkan simulasi berbagai skenario proses, misalnya perubahan suhu atau konsentrasi inokulum, tanpa harus melakukan terlalu banyak percobaan yang memakan waktu dan biaya.

Wang et al. (2004) menunjukkan bahwa glukosa, fruktosa, dan sukrosa dalam sari apel dikonsumsi dengan laju berbeda oleh *S. cerevisiae*, dan hal ini mempengaruhi pola pembentukan etanol dan gula sisa. Perbedaan preferensi khamir terhadap jenis gula tertentu dapat menyebabkan perubahan kemanisan, tingkat kekeringan (dryness) dan kadar alkohol akhir dari minuman fermentasi (Wang et al., 2004). Peng et al. (2025) melaporkan bahwa strain khamir yang berbeda menghasilkan profil konsumsi gula dan etanol yang tidak sama, disertai perubahan pH dan total asam selama fermentasi. Hal ini berarti parameter kinetika tidak bersifat universal, melainkan perlu ditentukan secara spesifik untuk setiap kombinasi strain dan kondisi proses (Peng et al., 2025). Sukhvir dan Kocher (2019) menambahkan bahwa suhu fermentasi sekitar 20 °C, konsentrasi inokulum yang memadai, dan penambahan nutrisi nitrogen dapat meningkatkan kadar etanol sekaligus menjaga mutu sensoris wine apel. Dengan

demikian, faktor-faktor proses seperti suhu, pH, kadar oksigen terlarut, ketersediaan nutrisi, dan jumlah inokulum harus dirancang secara terpadu apabila fermentasi sari apel ingin dioptimalkan (Sukhvir & Kocher, 2019).

Di tingkat nasional, penelitian dosen UIN Maulana Malik Ibrahim Malang memberikan gambaran pola kinetika yang sejalan pada substrat lain. Hasanah (2013) menunjukkan bahwa kadar alkohol tape singkong meningkat seiring bertambahnya lama fermentasi hingga titik tertentu sebelum cenderung stabil. Ini menggambarkan adanya fase-fase fermentasi yang dapat dijelaskan secara kinetik. Temuan ini memperlihatkan bahwa lamanya fermentasi merupakan variabel yang sangat menentukan, sehingga dalam perancangan proses fermentasi sari apel diperlukan penentuan titik panen yang tepat untuk mencapai kadar alkohol yang diinginkan (Hasanah et al., 2013). (Savitri et al., 2022) menegaskan bahwa komposisi substrat, pretreatment, dan pengaturan kondisi fermentasi sangat menentukan rendemen etanol pada produksi bioetanol dari limbah pertanian. Prinsip-prinsip ini dapat diaplikasikan pada fermentasi sari apel untuk merancang waktu fermentasi optimum dan memprediksi kadar alkohol maksimum yang terbentuk, serta untuk menilai seberapa efisien gula dalam sari apel dikonversi menjadi etanol. Dengan kata lain, pendekatan kinetika tidak hanya bermanfaat secara teoritis, tetapi juga menjadi alat praktis dalam pengambilan keputusan proses fermentasi di laboratorium maupun industri kecil.

Implikasi Keislaman dan Relevansi Penelitian

Bagi masyarakat Muslim, isu utama dalam proses fermentasi sari apel adalah status kehalalan produk yang mengandung alkohol. Hasanah (2013) menyebutkan bahwa hasil pengukuran kadar alkohol pada tape singkong harus dibandingkan dengan batasan kadar alkohol dalam pangan menurut fatwa MUI, sehingga durasi fermentasi tidak hanya berpengaruh secara teknis, tetapi juga memiliki implikasi dalam penentuan hukum. Hal ini menunjukkan bahwa informasi ilmiah mengenai kadar alkohol dan dinamika pembentukannya dari waktu ke waktu menjadi sangat penting dalam diskusi fiqh makanan dan minuman. Jika kadar alkohol melampaui batas tertentu dan produk dikonsumsi sebagai minuman memabukkan, maka ia dapat dikategorikan sebagai khamr dan diharamkan, sedangkan dalam kadar sangat kecil dan tidak dimaksudkan untuk memabukkan, terdapat perbedaan pandangan ulama yang memerlukan penjelasan ilmiah yang lebih rinci (Hasanah et al., 2013).

Suryanto et al. (2022) menjelaskan bahwa kadar alkohol dalam pangan dan minuman menekankan kepada penilaian halal-haram produk fermentasi harus didukung oleh data ilmiah yang akurat mengenai kadar etanol dan metode analisis yang valid, seperti kromatografi gas (Suryanto et al., 2022). Hal ini relevan dalam fermentasi sari apel, di mana studi kinetika tidak hanya menjelaskan μ_{max} atau Y_p/s , tetapi juga harus melaporkan kapan dan pada level berapa kadar alkohol maksimum tercapai, serta apakah ada skenario proses yang dapat menurunkan kadar alkohol hingga di bawah batas tertentu. Data tersebut dapat menjadi dasar bagi perumusan panduan teknis, misalnya anjuran lamanya fermentasi untuk tujuan tertentu atau perlunya proses lanjutan untuk menurunkan kadar etanol jika produk ditujukan bagi konsumen Muslim.

Dengan demikian, literatur internasional mengenai cider dan apple wine dapat diintegrasikan dengan penelitian dosen UIN Maulana Malik Ibrahim Malang mengenai fermentasi pangan, bioetanol, dan analisis kadar alkohol, sehingga membangun kajian yang integratif. Secara bioteknologi, penelitian ini menjelaskan dinamika pembentukan etanol pada sari apel, sedangkan secara keislaman memberikan dasar ilmiah untuk penilaian kehalalan produk fermentasi tersebut.

Pembahasan tambahan ini bertujuan untuk memperdalam analisis tentang proses fermentasi sari apel dari sudut pandang bioteknologi dan penelitian ilmiah terkini. Fermentasi yang terjadi pada sari apel dipengaruhi oleh berbagai faktor, tidak hanya jenis ragi dan konsentrasi bahan dasar, tetapi juga kondisi lingkungan seperti suhu, nutrisi yang tersedia, tingkat oksigen terlarut, dan pH. Interaksi kompleks antara faktor-faktor tersebut berpengaruh pada kecepatan konsumsi gula, pertumbuhan biomassa ragi, serta jumlah etanol yang dihasilkan.

Secara umum, *Saccharomyces cerevisiae* menunjukkan performa fermentasi terbaik pada suhu antara 20 hingga 30 derajat Celsius, di mana aktivitas enzim dalam jalur glikolisis berjalan dengan cepat dan stabil. Namun, jika suhunya terlalu tinggi, meskipun metabolisme bisa meningkat, ada risiko stres panas yang dapat mengurangi kelangsungan hidup sel. Sementara itu, suhu yang terlalu rendah dapat memperlambat proses pembentukan etanol. Di samping itu, konsentrasi awal gula dalam sari apel dapat memengaruhi potensi maksimal pembentukan alkohol. Tingkat gula yang terlalu tinggi dapat menyebabkan tekanan osmotik yang menghambat pertumbuhan ragi, sedangkan tingkat yang terlalu rendah bisa membuat produksi etanol tidak mencapai angka yang ideal.

Analisis lanjutan menunjukkan bahwa penambahan nutrisi, khususnya nitrogen, sangat penting untuk menjaga kesehatan sel ragi selama proses fermentasi. Kekurangan nitrogen dapat menyebabkan terjadinya fermentasi terhenti, yaitu saat ragi tidak lagi memproduksi etanol walaupun gula masih ada. Oleh karena itu, pemantauan akan nutrisi menjadi langkah yang sangat penting untuk mengoptimalkan proses fermentasi. Selain itu, pH ideal berada di kisaran 3 hingga 4 yang berfungsi untuk menghambat mikroorganisme pengontaminasi, sambil menjaga stabilitas metabolisme ragi selama proses berlangsung.

Dari sudut pandang bioteknologi terapan, pemahaman tentang setiap parameter kinetika fermentasi bisa digunakan untuk merancang proses yang lebih efisien dan terkontrol. Dengan memanfaatkan model kinetika seperti Monod atau Gompertz, para peneliti dapat memprediksi pola produksi etanol, waktu fermentasi yang optimal, serta potensi pembentukan metabolit samping. Model-model prediktif ini memungkinkan pengurangan jumlah percobaan laboratorium yang bisa menghabiskan waktu dan biaya, serta mempercepat proses perancangan fermentasi yang sesuai baik untuk skala industri maupun penelitian.

Secara keseluruhan, menguatkan pemahaman bahwa fermentasi sari apel adalah proses yang kompleks dan memerlukan pengawasan terhadap variabel-variabel penting untuk mencapai hasil yang optimal. Pemahaman yang mendalam mengenai faktor-faktor tersebut sangatlah penting tidak hanya untuk pengembangan produk

pangan fermentasi, tetapi juga relevan dalam produksi bioetanol serta penilaian status kehalalan produk yang mengandung alkohol.

Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan analisis literatur terkait penelitian kinetika fermentasi jus apel untuk produksi alkohol, dapat disimpulkan bahwa jus apel merupakan bahan baku yang sangat potensial dalam proses fermentasi oleh *Saccharomyces cerevisiae* karena kandungan gula sederhana yang tinggi, sehingga sering digunakan dalam pembuatan cider atau wine apel serta sebagai contoh proses etanol dalam skala kecil (Sukhvir & Kocher, 2019; Wang et al., 2004).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pemilihan strain khamir, suhu operasi, durasi fermentasi, kandungan nutrisi, serta sifat kimia jus apel secara signifikan memengaruhi kecepatan penggunaan gula, pola produksi etanol, serta karakteristik fisikokimia dan sensorik hasil akhir (Kularathne et al., 2020; Peng et al., 2025). Kajian dalam negeri, khususnya dari dosen UIN Maulana Malik Ibrahim Malang, memperkuat bahwa tahap fermentasi berkaitan erat dengan kadar alkohol pada produk fermentasi (Hasanah et al., 2013), serta bahwa komposisi bahan baku serta pengaturan proses sangat penting dalam mencapai hasil etanol maksimal dalam pembuatan bioetanol dari limbah pertanian (Savitri et al., 2022). Tinjauan mengenai kadar alkohol dalam makanan dan minuman juga menegaskan pentingnya data ilmiah yang akurat untuk mendukung pembentukan aturan kehalalan produk fermentasi dari perspektif Islam (Suryanto et al., 2022). Oleh karena itu, penelitian kinetika fermentasi jus apel memiliki nilai ganda: sebagai dasar untuk kemajuan bioteknologi dan produksi bioetanol, sekaligus sebagai dasar ilmiah untuk mengevaluasi status halal produk fermentasi bagi masyarakat Muslim.

Berdasarkan hasil tersebut, disarankan agar riset mendatang tidak hanya berupa tinjauan literatur, tetapi diperluas dengan uji coba laboratorium yang fokus mengukur kinetika fermentasi jus apel melalui variasi suhu, jumlah inokulum, dan durasi fermentasi. Selain itu, perlu dilakukan penghitungan indikator seperti μ_{max} , Y_p/s , dan kadar etanol tertinggi menggunakan teknik analisis yang dapat diandalkan, seperti kromatografi gas (Hasanah et al., 2013; Suryanto et al., 2022). Penelitian juga sebaiknya diperkuat dengan pendekatan lintas disiplin yang melibatkan bidang bioteknologi, ilmu pangan, dan studi Islam, sehingga aspek teknis fermentasi serta penilaian halal-haram dapat diintegrasikan secara menyeluruh (Savitri et al., 2022).

Daftar Pustaka

Ariyajaroenwong, P., Laopaiboon, P., Salakkam, A., Srinophakun, P., & Laopaiboon, L. (2016). Kinetic models for batch and continuous ethanol fermentation from sweet sorghum juice by yeast immobilized on sweet sorghum stalks. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 66, 210–216. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.06.023>

- Hasanah, H., Jannah, A., & Fasya, A. G. (2013). Pengaruh Lama Fermentasi Terhadap Kadar Alkohol Tape Singkong (*Manihot utilissima* Pohl). *Alchemy*, 2(1), 68–79. <https://repository.uin-malang.ac.id/6865/>
- Huda, M. K., Dewi, R. R., Prakas, M. Y., & Cahyanti, A. N. (2017). Kajian Lama Fermentasi Terhadap Konsentrasi Glukosa Dan Alkohol Pada Pembuatan Tape Onggok. *Jurnal Teknologi Pangan Dan Hasil Pertanian*, 12(2), 59–63. <https://doi.org/10.26623/jtphp.v12i2.1812>
- Kularathne, I. W., Ratnaweera, A. C., Kalpage, C. S., Rajapakse, S., & Gunathilaka, C. A. (2020). Optimization and kinetic parameter estimation of bioethanol production from freely available Sri Lankan fruits in batch fermentation. *Ceylon Journal of Science*, 49(3), 283–291. <https://doi.org/10.4038/cjs.v49i3.7779>
- Peng, X., Li, Y., Li, N., Liu, Q., Zhou, L., & Zhao, K. (2025). Fermentation kinetics, physicochemical properties, and antioxidant activity of Fuji apple cider fermented with different yeast strains. *Food Research International*, 218(June), 116889. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116889>
- Savitri, E. S., Rahmah, A., & Daryono, R. N. H. (2022). Pengembangan teknologi smart energy melalui pemanfaatan limbah pertanian sebagai bioethanol/renewable energy. <https://repository.uin-malang.ac.id/16870/>
- Sukhvir, S., & Kocher, G. S. (2019). Development of apple wine from Golden Delicious cultivar using a local yeast isolate. *Journal of Food Science and Technology*, 56(6), 2959–2969. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03771-0>
- Suryanto, S., Muslikh, F. A., Purwitasari, N., & Ma'arif, B. (2022). Scoping Review: Analysis of Alcohol Levels in Food and Beverages Using Gas Chromatography. *Proceedings of International Pharmacy Ulul Albab Conference and Seminar (PLANAR)*, 2(33), 45. <https://repository.uin-malang.ac.id/13424/>
- Wang, D., Xu, Y., Hu, J., & Zhao, G. (2004). Fermentation kinetics of different sugars by apple wine yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Journal of the Institute of Brewing*, 110(4), 340–346. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2004.tb00630.x>
- Yurista, S., & Aditiawati, P. (2021). Review on The Production of Fermented Beverage as a Post-Harvest Processing Alternative For Mango, Banana and Purple Sweet Potato. *3BIO: Journal of Biological Science, Technology and Management*, 3(2), 22–29. <https://doi.org/10.5614/3bio.2021.3.2.3>