Rekayasa Ventilasi Pasif dan Frekuensi Pembalikan Terhadap Dinamika Suhu, pH, dan Padatan Terlarut Selama Fermentasi Biji Kakao (*Theobroma cacao L.*)

Nurhaya Kusmiah[1,*], Abdul Rahman[1], Sitti Inderiati[2], Is Aizat bin Samsuri[3]

[1] Teknologi Produksi Tanaman Perkebunan, Politeknik Pertanian Negeri Pangkajene Kepulauan

[2] Teknologi Produksi Tanaman Hortikultura, Politeknik Pertanian Negeri Pangkajene Kepulauan

[3] Politeknik Nilai Negeri Sembilan Malaysia

**Email: nurhayakusmiah@gmail.com*

Abstract

Fermentasi merupakan tahap kunci penentu mutu biji kakao karena membentuk prekursor cita rasa dan aroma cokelat. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh rekayasa sistem ventilasi pasif berbasis gradien aerasi dan frekuensi pembalikan massa fermentasi terhadap dinamika suhu, pH, dan kadar padatan terlarut (brix) selama fermentasi biji kakao (*Theobroma cacao L.).* Penelitian menggunakan Rancangan Acak Kelompok (RAK) Faktorial dengan dua faktor, yaitu tingkat ventilasi pasif dan frekuensi pembalikan (P1: 24 jam, P2: 48 jam), masing-masing tiga ulangan. Fermentasi berlangsung selama 120 jam dengan pengukuran suhu setiap 6 jam serta pH dan brix setiap 12 jam, dianalisis menggunakan General Linear Model Repeated Measures. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu fermentasi berpengaruh sangat nyata terhadap suhu, pH, dan Brix ($p < 0,001$), serta berinteraksi nyata dengan perlakuan aerasi terhadap ketiga parameter tersebut ($p < 0,05$). Perlakuan tanpa ventilasi (V0) dan ventilasi sedang (V1) menghasilkan suhu puncak tertinggi (>49 °C), sedangkan ventilasi tinggi (V2) menekan kenaikan suhu, tetapi mempercepat peningkatan pH. Kadar Brix menurun secara konsisten pada seluruh perlakuan seiring dengan pemanfaatan gula oleh mikroorganisme, dengan penurunan tercepat pada V2. Meskipun pembalikan setiap 24 jam (P1) menghasilkan rata-rata suhu dan pH yang lebih tinggi dibandingkan pembalikan setiap 48 jam (P2), perlakuan pembalikan tidak menunjukkan pengaruh yang nyata secara statistik ($p > 0,05$), sehingga belum dapat ditetapkan frekuensi pembalikan yang lebih unggul sesuai parameter yang diamati. Berdasarkan hasil penelitian, direkomendasikan ventilasi sedang sebagai alternatif desain sistem ventilasi pasif untuk mendukung fermentasi yang seimbang tanpa memerlukan input energi tambahan.

Keywords: Fermentasi Kakao; Ventilasi Pasif; Gradien Aerasi; Frekuensi Pembalikan; Dinamika Suhu dan pH

1. Pendahuluan

Fermentasi kakao *(Theobroma cacao L.)* merupakan tahap kunci yang menentukan kualitas biji kakao, khususnya dalam pembentukan prekursor cita rasa dan aroma cokelat. Proses ini melibatkan interaksi kompleks antara mikroorganisme, substrat, dan kondisi lingkungan seperti suhu, pH, serta ketersediaan oksigen (Muthmainah dkk., 2013). Aerasi yang tidak optimal seringkali menyebabkan fermentasi berlangsung tidak merata sehingga berdampak pada ketidakkonsistenan mutu biji kakao. Di tingkat petani, metode fermentasi masih didominasi teknik konvensional dengan keterbatasan pengaturan ventilasi dan pembalikan massa fermentasi, tanpa standar teknis frekuensi pembalikan yang efektif (Latifah dkk., 2025).

Ketidaktepatan pengendalian aerasi dan pembalikan menyebabkan variasi suhu dan aktivitas mikroba yang tidak seragam, sehingga memengaruhi dinamika reaksi kimia dan mutu akhir biji. Biji kakao yang kurang terfermentasi cenderung memiliki rasa pahit dan sepat yang tinggi, sedangkan fermentasi berlebihan dapat menyebabkan biji membusuk atau berjamur (Setiawan dan Handoko, 2021), yang pada akhirnya menurunkan daya saing produk di pasar internasional (Sabahnur dkk., 2023). Sebagai upaya pemecahan masalah tersebut, penelitian ini mengusulkan rekayasa sistem ventilasi pasif berbasis gradien aerasi melalui modifikasi kotak fermentasi yang dilengkapi ventilasi dengan desain berjenjang, dikombinasikan dengan dua frekuensi pembalikan massa fermentasi. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi konsep gradien aerasi dalam sistem ventilasi pasif dengan pengujian kombinasi frekuensi pembalikan terhadap dinamika fermentasi, yang belum banyak diterapkan dalam studi fermentasi kakao di tingkat petani. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh rekayasa ventilasi pasif dan frekuensi pembalikan terhadap dinamika suhu, pH, dan kadar brix selama fermentasi biji kakao.

2. Kerangka Teori

2.1. Fermentasi Biji Kakao

Fermentasi kakao berlangsung melalui suksesi mikroorganisme yang melibatkan khamir, bakteri asam laktat, dan bakteri asam asetat (Senna, 2020). Pada tahap awal, khamir memanfaatkan gula pulp menghasilkan etanol dan CO2. Selanjutnya, ketika oksigen tersedia melalui pembalikan atau sistem aerasi, bakteri asam asetat mengoksidasi etanol menjadi asam asetat, menghasilkan panas yang meningkatkan suhu fermentasi hingga 45-50°C (Retno Utami, 2018). Peningkatan suhu dan penetrasi asam asetat memicu kematian embrio serta aktivasi enzim yang menghasilkan asam amino bebas dan gula pereduksi sebagai prekursor cita rasa cokelat.

2.2. Faktor yang Memengaruhi Fermentasi

Ketersediaan oksigen, suhu, pH, populasi mikroorganisme, serta desain wadah fermentasi merupakan faktor utama yang menentukan keberhasilan fermentasi (Ariyanti, 2017; Rachmatullah dkk., 2021).

Distribusi oksigen yang tidak merata menyebabkan sebagian massa fermentasi berada dalam kondisi anaerob terlalu lama sehingga aktivitas bakteri asam asetat terhambat. Desain wadah, khususnya jumlah dan posisi ventilasi, memengaruhi pola sirkulasi udara sehingga modifikasi kotak fermentasi menjadi pendekatan rekayasa yang berpotensi meningkatkan kualitas fermentasi biji kakao.

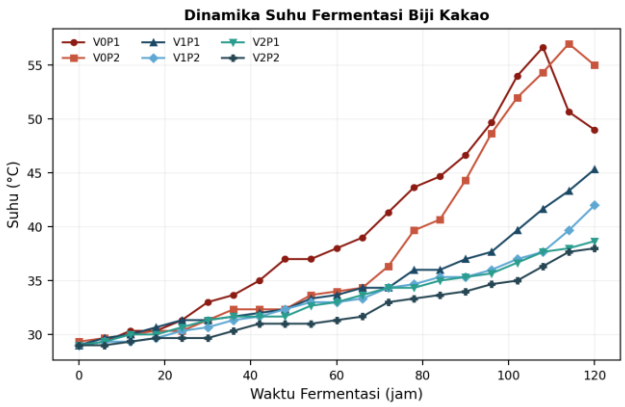
3. Metodologi

Penelitian dilaksanakan pada bulan Juni – Juli 2026 bertempat di Workshop Kakao Program Studi Teknologi Produksi Tanaman Perkebunan, Politeknik Pertanian Negeri Pangkajene Kepulauan, dan Laboratorium Bioteknologi Terpadu, Fakultas Peternakan, Universitas Hasanuddin. Bahan utama berupa buah kakao segar pada tingkat kematangan optimal. Biji kakao difermentasi dalam kotak kayu berukuran 35×35×40 cm berkapasitas 6 kg biji per kotak, ditutup daun pisang selama 120 jam (5 hari).

Rancangan penelitian adalah RAK Faktorial dengan dua faktor: (A) tingkat ventilasi pasif — V0 (tanpa ventilasi), V1 (ventilasi sedang, 4 lubang berdiameter 1 cm pada masing-masing sisi kiri dan kanan), V2 (ventilasi besar, 5 lubang pada masing-masing sisi); dan (B) frekuensi pembalikan — P1 (setiap 24 jam) dan P2 (setiap 48 jam), sehingga diperoleh enam kombinasi perlakuan (V0P1, V0P2, V1P1, V1P2, V2P1, V2P2) dengan tiga ulangan. Suhu diukur setiap 6 jam menggunakan termometer, sedangkan pH (pH meter) dan kadar brix (refraktometer) diukur setiap 12 jam. Data dianalisis menggunakan General Linear Model Repeated Measures (uji within-subjects effects) pada taraf $\alpha = 0,05$, dilanjutkan dengan uji perbandingan berpasangan (pairwise comparison, koreksi Bonferroni) untuk melihat perbedaan antarlevel faktor aerasi dan pembalikan.

4. Hasil

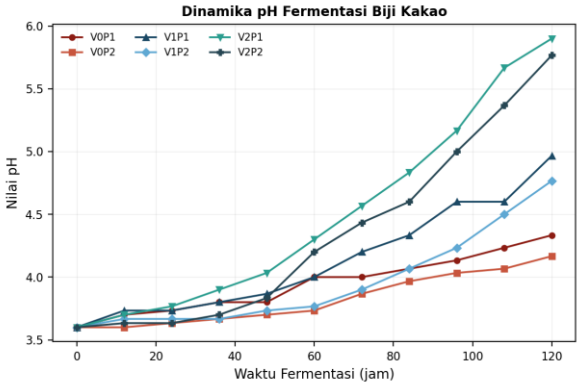
4.1. Dinamika Suhu Fermentasi



Gambar 1. Dinamika suhu rata-rata fermentasi biji kakao

Suhu seluruh perlakuan meningkat secara bertahap dari sekitar 29°C pada jam ke-0 menuju puncaknya menjelang jam ke-108-120. Perlakuan tanpa ventilasi (V0P1) mencapai suhu tertinggi (56,7°C pada jam ke-108), diikuti V0P2 (57,0°C pada jam ke-114), yang mengindikasikan kondisi mikroaerob yang lebih tertutup memungkinkan akumulasi panas metabolik dari aktivitas bakteri asam asetat berlangsung lebih intensif. Sebaliknya, ventilasi besar (V2P1 dan V2P2) menghasilkan kenaikan suhu paling landai, hanya mencapai 38-39°C pada akhir fermentasi, karena aliran udara yang lebih terbuka melepaskan panas fermentasi ke lingkungan. Pola ini konsisten dengan prinsip bahwa oksidasi etanol menjadi asam asetat bersifat eksotermik (Yuwono, 2022), ventilasi yang lebih besar mempercepat pertukaran gas namun juga mempercepat kehilangan panas, sehingga suhu puncak yang dicapai lebih rendah. Pembalikan setiap 24 jam (P1) cenderung menghasilkan suhu rata-rata yang sedikit lebih tinggi dibanding 48 jam (P2) pada level ventilasi yang sama, karena pembalikan lebih sering menyalurkan oksigen segar ke seluruh massa biji sehingga mendukung aktivitas bakteri asam asetat secara lebih merata (Muzaifa, 2017).

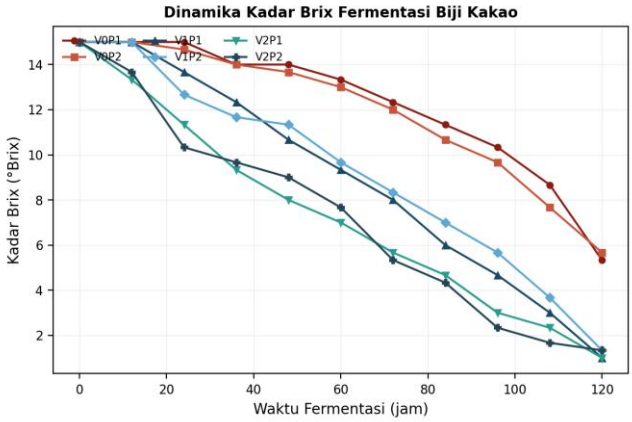
4.2. Dinamika pH Fermentasi



Gambar 2. Dinamika pH rata-rata fermentasi biji kakao

Nilai pH pada seluruh perlakuan meningkat dari sekitar 3,6 pada awal fermentasi menuju kisaran 4,2-5,9 pada jam ke-120, mencerminkan pergeseran dari dominasi asam organik (asam sitrat dan asam laktat) menuju penetrasi asam asetat serta pelepasan basa hasil degradasi protein. Pola paling menonjol terlihat pada perlakuan ventilasi besar (V2P1 dan V2P2), yang menunjukkan kenaikan pH tercepat dan tertinggi (5,90 dan 5,77) sejak jam ke-60, jauh melampaui perlakuan tanpa ventilasi dan ventilasi sedang. Hal ini menunjukkan bahwa pasokan oksigen yang lebih besar pada V2 mempercepat oksidasi asam-asam organik dan aktivitas bakteri asam asetat, sehingga pH jaringan biji naik lebih cepat (Rachmatullah dkk., 2021). Sebaliknya, perlakuan tanpa ventilasi (V0) menahan laju kenaikan pH karena keterbatasan oksigen yang memperlambat oksidasi etanol. Pola ini melengkapi temuan pada suhu: ventilasi besar mempercepat transformasi kimia (pH naik cepat) meski suhu puncak yang dicapai lebih rendah, sedangkan ventilasi tertutup menahan panas namun memperlambat perubahan pH.

4.3. Dinamika Kadar Brix



Gambar 3. Dinamika kadar brix rata-rata fermentasi biji kakao

Kadar brix pada seluruh perlakuan menurun secara konsisten dari 15°Brix pada awal fermentasi hingga mendekati 1-5,7°Brix pada jam ke-120, mencerminkan konsumsi gula pulp oleh khamir dan bakteri selama proses fermentasi berlangsung. Penurunan paling cepat terjadi pada perlakuan ventilasi besar (V2P1 dan V2P2), yang mencapai brix terendah (1,0 dan 1,3°Brix) di akhir fermentasi, sejalan dengan aktivitas mikroorganisme aerobik yang lebih tinggi akibat pasokan oksigen yang lebih baik. Sebaliknya, perlakuan tanpa ventilasi (V0P1 dan V0P2) mempertahankan kadar brix relatif lebih tinggi (5,3-5,7°Brix) hingga akhir fermentasi, menunjukkan laju konsumsi gula yang lebih lambat pada kondisi oksigen terbatas. Pola penurunan brix yang konsisten dan monotonik pada seluruh perlakuan memperkuat gambaran bahwa gula pulp merupakan substrat utama yang terus terkonsumsi sepanjang fermentasi, dengan laju yang dipercepat oleh ketersediaan oksigen yang lebih besar (Nurcholis, 2025), dan selama fermentasi, padatan terlarut pada pulp menurun sekitar 50–70% selama dua hari pertama fermentasi, setelah itu nilainya relatif konstan sampai akhir fermentasi (Setiawan & Handoko, 2021).

4.4. Analisis Ragam Repeated Measures (Tests of Within-Subjects Effects)

Untuk menguji signifikansi pengaruh waktu fermentasi serta interaksinya dengan perlakuan aerasi dan pembalikan, dilakukan analisis General Linear Model Repeated Measures. Ringkasan nilai signifikansi (Sig.) pada bagian Sphericity Assumed untuk ketiga parameter disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan Tests of Within-Subjects Effects (Sphericity Assumed) untuk parameter suhu, pH, dan brix

Sumber Variasi	Suhu	pH	Brix
Waktu	0,000*	0,000*	0,000*
Waktu × Aerasi	0,001*	0,000*	0,000*
Waktu × Pembalikan	0,464	0,444	0,271
Waktu × Aerasi × Pembalikan	0,998	0,982	0,343

**berbeda nyata pada taraf 5% (p<0,05).*

Nilai Sig. pada baris "Waktu" untuk ketiga parameter jauh di bawah 0,05 (p<0,001), yang berarti suhu, pH, dan kadar brix berubah secara sangat nyata sepanjang 120 jam fermentasi — konsisten dengan pola dinamis yang tervisualisasi pada Gambar 1-3. Interaksi Waktu × Aerasi juga sangat nyata pada ketiga parameter (p<0,001), yang menunjukkan bahwa pola perubahan suhu, pH, dan brix dari waktu ke waktu berbeda secara nyata antarlevel ventilasi (V0, V1, V2) — dengan kata lain, tingkat ventilasi tidak hanya mengubah rata-rata nilai, tetapi juga mengubah bentuk kurva/laju perubahan selama fermentasi. Sebaliknya, interaksi Waktu × Pembalikan tidak nyata pada ketiga parameter (p>0,05), yang mengindikasikan bahwa frekuensi pembalikan (24 jam vs 48 jam) tidak mengubah pola dinamika perubahan dari waktu ke waktu secara signifikan, meskipun tetap dapat memengaruhi nilai rata-rata secara keseluruhan. Interaksi tiga arah Waktu × Aerasi × Pembalikan juga tidak nyata pada ketiga parameter (p>0,05), menunjukkan bahwa efek gabungan aerasi dan pembalikan terhadap dinamika waktu bersifat aditif (independen) dan tidak membentuk pola interaksi kompleks yang saling memperkuat atau melemahkan.

4.5. Uji Perbandingan Berpasangan (Pairwise Comparisons)

Karena faktor aerasi menunjukkan interaksi nyata dengan waktu, dilakukan uji pairwise comparison (koreksi Bonferroni) berdasarkan estimated marginal means untuk mengetahui level mana yang berbeda nyata satu sama lain, disajikan pada Tabel 2 (suhu) dan Tabel 3 (pH).

Tabel 2. Estimated marginal means dan pairwise comparison suhu (°C) antarlevel aerasi dan pembalikan

Perlakuan	Rerata ± SE	Perbandingan	Sig.
V0	39,22 ± 0,41	V0 vs V1	0,000*
V1	34,18 ± 0,41	V0 vs V2	0,000*
V2	32,57 ± 0,41	V1 vs V2	0,053
P1	35,86 ± 0,34	P1 vs P2	0,043*
P2	34,78 ± 0,34		

**berbeda nyata pada taraf 5% (p<0,05).*

Tabel 3. Estimated marginal means dan pairwise comparison pH antarlevel aerasi dan pembalikan

Perlakuan	Rerata ± SE	Perbandingan	Sig.
V0	3,88 ± 0,06	V0 vs V1	0,245
V1	4,05 ± 0,06	V0 vs V2	0,000*
V2	4,42 ± 0,06	V1 vs V2	0,003*
P1	4,19 ± 0,05	P1 vs P2	0,054
P2	4,04 ± 0,05		

**berbeda nyata pada taraf 5% (p<0,05).*

Pada parameter suhu, rerata V0 (39,22°C) berbeda sangat nyata dengan V1 (34,18°C) dan V2 (32,57°C) ($p<0,001$), sedangkan V1 dan V2 tidak berbeda nyata ($p=0,053$) meski secara numerik V1 lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa penutupan ventilasi (V0) adalah faktor yang paling menentukan tingginya suhu fermentasi, sementara perbedaan antara ventilasi sedang dan besar relatif kecil. Pada faktor pembalikan, P1 (35,86°C) berbeda nyata dengan P2 (34,78°C) ($p=0,043$), menegaskan bahwa pembalikan lebih sering menghasilkan suhu rata-rata yang lebih tinggi.

Pada parameter pH, pola berbeda: V0 (3,88) tidak berbeda nyata dengan V1 (4,05) ($p=0,245$), namun keduanya berbeda sangat nyata dengan V2 (4,42) ($p\leq0,003$). Hal ini mengindikasikan bahwa hanya ventilasi besar yang secara nyata mempercepat kenaikan pH, sedangkan penambahan ventilasi dari tanpa ventilasi ke ventilasi sedang belum cukup mengubah dinamika pH secara nyata. Pada faktor pembalikan, perbedaan pH antara P1 (4,19) dan P2 (4,04) mendekati namun belum mencapai taraf nyata ($p=0,054$), sehingga frekuensi pembalikan berpengaruh lemah terhadap pH dibanding pengaruhnya terhadap suhu. Pola pada parameter brix tidak dilanjutkan dengan pairwise comparison karena interaksi Waktu × Pembalikan dan Waktu × Aerasi × Pembalikan tidak nyata, namun pengaruh utama Waktu × Aerasi yang sangat nyata (Tabel 1) menegaskan bahwa ventilasi besar tetap menjadi faktor dominan yang mempercepat penurunan brix sebagaimana terlihat pada Gambar 3.

5. Kesimpulan

Waktu fermentasi berpengaruh sangat nyata terhadap dinamika suhu, pH, dan kadar padatan terlarut (Brix) selama fermentasi biji kakao (Theobroma cacao L.), aerasi dengan ventilasi tinggi (V2) menekan kenaikan suhu, tetapi mempercepat peningkatan pH dan penurunan Brix. Penurunan Brix pada seluruh perlakuan mengindikasikan pemanfaatan gula selama proses fermentasi. Frekuensi pembalikan setiap 24 jam (P1) menghasilkan suhu dan pH yang lebih tinggi dibandingkan pembalikan setiap 48 jam (P2), tetapi pengaruh pembalikan tidak nyata secara statistik ($p>0,05$), sehingga belum dapat ditetapkan frekuensi pembalikan yang lebih unggul berdasarkan parameter yang diamati. Ventilasi sedang (V1) berpotensi dikembangkan sebagai alternatif desain sistem ventilasi pasif untuk mendukung proses fermentasi biji kakao tanpa input energi tambahan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (P3M) Politeknik Pertanian Negeri Pangkajene Kepulauan atas pendanaan penelitian melalui skema PNBP Tahun 2026, serta anggota tim peneelitian dan rekan jurusan yang telah membantu dalam penyelesaian penelitian ini.

Daftar Pustaka

Ariyanti, M., 2017. Karakteristik Mutu Biji Kakao (Theobroma cacao L.) dengan Perlakuan Waktu Fermentasi Berdasar SNI 2323-2008. Jurnal Industri Hasil Perkebunan 12(1), 34-42.

Arya Bima Senna, 2020. Pengolahan Pascapanen pada Tanaman Kakao untuk Meningkatkan Mutu Biji Kakao: Review. Jurnal Triton 11(2), 51-57.

Gonibala, M., Rawung, H., dan Ludong, M. M. (2019). Kajian Fermentasi Biji Kakao (*Theobroma cacao* L.) Menggunakan Fermentor Tipe Kotak Dinding Ganda dengan Aerasi. *COCOS*, 10(3).

Muzaifa, Murna, Yusya Abubakar, and Faitzal Haris. 2017. Profil pertumbuhan mikroorganisme pada fermentasi biji kakao Aceh." *Jurnal Teknologi dan Industri Pertanian Indonesia* 9.2: 50-54.

Nes, R. R., Setiawan, A. W., dan Handoko, Y. A. 2021. Perbandingan Kualitas Fermentasi Biji Kakao dengan Penambahan Kultur Campur dan Kultur Tunggal *Lactobacillus brevis. Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, 10(4), 537–547.

Nurcholis, M., Maligan, J. M., Sunarharum, W. B., Mahatmanto, T., Mulyadi, A. F., & Sriherfyna, F. H. . 2025. *Fermentasi kopi: Dinamika perubahan karakteristik selama proses*. Media Nusa Creative (MNC Publishing).

Rachmatullah, D., Putri, D.N., Herianto, F., Harini, N., 2021. Karakteristik Biji Kakao (Theobroma cacao L.) Hasil Fermentasi dengan Ukuran Wadah Berbeda. Jurnal Viabel Pertanian 15, 32-44.

Retno Utami, R., 2018. Cocoa Antioxidant: Effect of Fermentation and Roasting on Antioxidant Change (Review). Jurnal Industri Hasil Perkebunan 2, 75-85.

Sabahannur, S., Syam, N., dan Ervina, E. 2023. Mutu Fisik dan Kimia Biji Kakao (*Theobroma cacao* L.) pada Beberapa Jenis Klon. *AGROTEK: Jurnal Ilmiah Ilmu Pertanian*, 7(2), 99–107.

Tulnafsi, L., Alimuddin, S., dan Sabahannur, S. (2025). Karakterisasi Mutu Biji Kakao (*Theobroma cacao* L.) Hasil Fermentasi pada Berbagai Konsentrasi Ragi dan Waktu Pengadukan. *AGROTEK: Jurnal Ilmiah Ilmu Pertanian*, 9(2), 124–131.

Yuwono, S. S., Istianah, N., & Mubarok, A. Z. 2022. *Kinetika Reaksi pada Bahan Pangan dan Produk Fermentasi*. Universitas Brawijaya Pres