

INAKTIVASI MIKROBA PADA JUS ASAM (*ACIDIFIED JUICE*) DENGAN *HIGH PRESSURE PROCESSING* (HPP): KAJIAN META-ANALISIS**Ananda Ardiansyah¹, Muhammad Arpah²**

Departemen Ilmu dan Teknologi Pangan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Jawa Barat, Indonesia

Email: 1ardianananda@apps.ipb.ac.id, 2arpah@apps.ipb.ac.id**Abstract (English)**

High Pressure Processing (HPP) is a non-thermal food processing method utilized in the treatment of various food products, including acidified juices. This technique effectively inactivates target microorganisms in food. This study aims to delve deeper into the involvement of HPP in microbial inactivation in acidified juices and to determine the most efficient parameters for its application. A meta-analysis was conducted, comparing initial microbial counts as the control group and log reductions as the experimental group. The findings indicate an overall effect size of -3.382 with a heterogeneity value of 99.92%, suggesting high and significant heterogeneity ($p < 0.001$). Yeasts and molds were identified as the most resistant microorganisms to HPP treatment, followed by Total Plate Counts (TPC) at Gram-negative and Gram-positive bacteria. Additionally, the study revealed that applying pressures of 400-600 MPa at temperatures $\leq 25^{\circ}\text{C}$ for durations of 5-15 minutes yielded the highest microbial inactivation response in acidic juices. Meta-regression analysis also showed that there was no difference between the results and the theory. Publication bias analysis indicated a low publication bias, as $Nfs > 5N + 10$.

Article History

Submitted: 9 Mei 2025

Accepted: 12 Mei 2025

Published: 13 Mei 2025

Key Words

acidified fruit juice, high pressure processing, meta-analysis, microbial inactivation

Abstrak (Indonesia)

High Pressure Processing (HPP) merupakan salah satu metode pemrosesan tanpa melibatkan panas yang digunakan dalam proses pengolahan pangan. Salah satu jenis pangan yang dapat diberi perlakuan HPP adalah jus asam. Penggunaan metode ini akan mampu menginaktivasi mikroba target dalam pangan. Tujuan penelitian ini adalah mempelajari lebih dalam terkait keterlibatan metode HPP dalam inaktivasi mikroba pada jus asam serta mengetahui hasil parameter yang paling efisien untuk digunakan dalam keterlibatan HPP. Penelitian ini dilakukan dengan metode meta-analisis untuk melihat mikroba awal sebagai kelompok kontrol dan log reduksi sebagai kelompok eksperimen. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai keseluruhan efek menunjukkan nilai -3.382 dengan nilai heterogenitas 99.92% yang berarti pengujian memiliki heterogenitas tinggi dan signifikan dengan nilai p sebesar < 0.001 . Kapang dan Khamir merupakan mikroba paling tahan terhadap perlakuan HPP diikuti oleh TPC pada Gram negatif, dan Gram positif. Hasil lainnya juga menunjukkan bahwa pada tekanan 400-600 MPa, suhu sebesar $\leq 25^{\circ}\text{C}$ waktu selama 5-15 menit merupakan parameter yang memberikan respon tertinggi terhadap perlakuan HPP untuk inaktivasi mikroba pada jus asam. Analisis meta-regresi juga menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan terhadap hasil dan teori yang ada. Analisis bias publikasi menunjukkan hasil bahwa penelitian memiliki bias publikasi rendah karena $Nfs > 5N + 10$.

Sejarah Artikel

Submitted: 9 Mei 2025

Accepted: 12 Mei 2025

Published: 13 Mei 2025

Kata Kunciinaktivasi mikroba, jus buah asam, meta-analisis, *high pressure processing*.**Pendahuluan**

Teknologi pemrosesan termal menjadi salah satu metode yang digunakan dalam proses pengolahan pangan. Metode ini banyak digunakan untuk memperpanjang umur simpan dan mengawetkan pangan, tetapi metode ini memiliki dampak terhadap kualitas pangan, seperti mampu mengubah tekstur, warna, dan kandungan nutrisi pangan (Awuah et al., 2007; Khongphakdee et al., 2025; Rampurwala et al., 2025). Menurut Usaga et al., (2021), aspek-aspek seperti distribusi suhu yang tidak merata dan penurunan perpindahan panas dapat menghasilkan produk akhir dengan kualitas yang lebih rendah dan lebih bervariasi, tergantung pada proses termal (retorting, pemrosesan aseptik, dan pengisian panas). Mengingat permintaan konsumen akan pangan aman dengan kualitas tinggi semakin meningkat, keterlibatan teknologi *non-thermal* juga memiliki pengaruh dalam memperpanjang umur

simpan tanpa mengurangi kualitas produk pangan (Vignali et al., 2022). Beberapa contoh teknologi *non-thermal*, yaitu antara lain HPP (*High Pressure Processing*), *ultrasound*, PEF (*Pulsed Electric Field*), dan *cold plasma*.

High Pressure Processing (HPP) merupakan proses tanpa melibatkan panas yang mampu menghancurkan membran sel dengan penerapan tekanan tinggi (100-1000 MPa) dengan suhu dibawah 45°C sehingga memiliki dampak yang sangat minim akan perubahan rasa, tekstur, penampilan, serta gizi pangan yang diuji (Muntean et al., 2016; Kateh et al., 2024). Mikroba akan mengalami efek simultan pada permeabilitas membran sel, aktivitas metabolisme, struktur sel, dan gangguan genetik (Yordanov & Angelova, 2010). Efek mematikan tersebut terjadi karena beberapa faktor, seperti tekanan, suhu, waktu, dan jenis mikroba (Koutsoumanis et al., 2022a).

Jus buah menjadi salah satu produk pangan yang memiliki aw tinggi, berkisar antara 0.95 hingga 0.99 dengan pH dibawah 4,5. Meskipun memiliki pH rendah, pada tahun 1990-an terjadi kejadian luar biasa yang disebabkan oleh adanya *Salmonella*, *Escherichia coli* O157:H7, dan *Clostridium parvum* yang membuat FDA membuat peraturan bahwa jus buah yang tersebar secara komersial wajib menggunakan HACCP (*Hazard Analysis Critical Control Point*) (Usaga et al., 2021). Adanya mikroba pada jus buah dapat disebabkan adanya kontaminasi dari lingkungan, pembuatan jus tidak sesuai dengan prosedur sanitasi, dan tidak diterapkannya HACCP..

Penelitian oleh Katsaros et al., (2010) menunjukkan bahwa pada tekanan 200-350 MPa dan suhu 25-40°C mampu menurunkan mikroba *L. Brevis* dan *L. Plantarum*. Sejalan juga dengan penelitian Bayindirli et al., (2006) yang menegaskan bahwa pada tekanan 350 MPa, 40°C, selama 5 menit mampu menginaktivasi *E. Coli* O157:H7, *Salmonella*, dan *S. aureus*. Selain itu, penelitian oleh Erkmen dan Dogan (2004) juga menunjukkan bahwa pada tekanan 200-700 MPa, 25°C, 1-20 menit mampu menurunkan jumlah mikroba *L. Monocytogenes* pada jus jeruk. (Rendueles et al., 2011) juga membuktikan bahwa dengan tekanan 350 MPa selama 30 menit atau 400 MPa selama 5 menit mampu menurunkan bakteri, kapang dan khamir hingga 10 kali. Syed et al., (2014) juga menunjukkan dengan 700 MPa, 5 menit, 4°C mampu mereduksi adanya mikroba *S. aureus*.

Implementasi HPP pada dunia pangan tentu memiliki hasil akhir yang berbeda meskipun menggunakan parameter pengujian yang sama. Variabilitas hasil pengujian dari permasalahan tersebut dapat diselesaikan dengan menggunakan metode meta analisis guna memberikan hasil pengujian yang lebih akurat dan tervalidasi. Metode meta-analisis dalam dunia pangan juga berguna dalam dunia *food labeling* (Shangguan et al., 2018), *food safety* (Insfran-rivarola et al., 2020), serta *food engineering*. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan guna menghimpun perbedaan hasil pengujian terkait inaktivasi mikroba pada jus asam dengan menggunakan *High Pressure Processing* (HPP).

Metode Penelitian

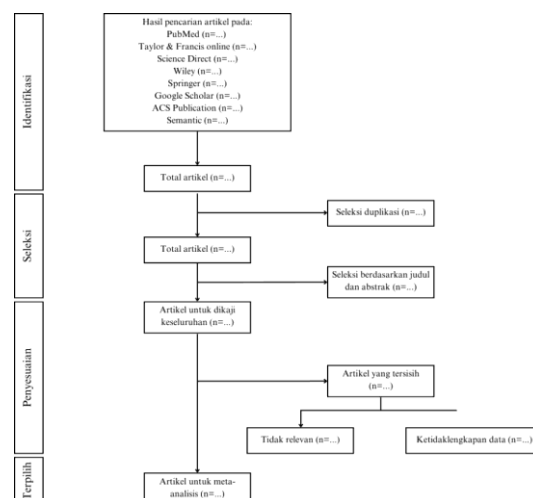
Penelitian ini mengacu pada tahap-tahap yang dilakukan oleh Tawfik et al., (2019) yang terlihat pada Gambar 1. Tahap awal dalam penyusunan kajian meta-analisis adalah dimulai dari perumusan pertanyaan penelitian yang akan mengerucutkan dengan metode PICO (*Population, Intervention, Comparison, Outcome*) sebagai salah satu metode untuk perumusan pertanyaan penelitian. *Population* merupakan permasalahan atau populasi yang menjadi topik utama permasalahan dalam penelitian. *Intervention* diartikan sebagai perlakuan yang diberikan dalam penelitian. *Comparison* merupakan referensi yang dijadikan sebagai bahan perbandingan. *Outcome* merupakan hasil akhir yang dicapai dalam penelitian (Roever, 2018). Pada penelitian ini, *Population*: jus asam, *Intervention*: HPP (*High Pressure Processing*), *Comparison*: jus asam tanpa perlakuan HPP, dan *Outcome*: *log reduction* mikroba. Tahap selanjutnya adalah penelitian pendahuluan dan validasi ide sehingga mampu meminimalisasi adanya duplikasi

pada pertanyaan yang diajukan, memastikan validitas ide yang dibahas, dan identifikasi artikel yang relevan. Tahap selanjutnya adalah penentuan kriteria inklusi dan eksklusi. Kriteria inklusi menjadi penentu suatu artikel ilmiah yang akan digunakan dalam penelitian ini. Berbeda dengan artikel ilmiah dengan kriteria eksklusi yang tidak akan digunakan dalam penelitian ini. Penentuan kriteria inklusi dan eksklusi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Penentuan kriteria inklusi dan eksklusi

Kriteria	Keterangan
Inklusi	1. Artikel ilmiah berupa hasil penelitian 2. Artikel ilmiah membahas topik penelitian yang sedang diuji 3. Harus bersifat menjawab pertanyaan atas informasi yang diberikan, baik positif atau negatif 4. Artikel ilmiah berasal dari jurnal internasional dan/atau nasional dengan reputasi yang baik 5. Tidak terdapat batasan negara
Eksklusi	1. Artikel ilmiah hanya memperlihatkan abstrak 2. Artikel ilmiah tidak memiliki hubungan dengan penelitian yang sedang diujikan 3. Artikel ilmiah tidak tersedia secara <i>full teks</i> 4. Artikel ilmiah dengan data yang tidak lengkap

Pencarian sumber ilmiah digunakan untuk menemukan artikel yang akan digunakan dalam pengujian meta-analisis ini. Pada penelitian ini, pencarian sumber ilmiah dibantu dengan server *database*, seperti Google Scholar, PubMed, Semantic, Science Direct, ACS Publication, Wiley, Taylor and Francis, dan Springer. Selain itu, kata kunci juga digunakan untuk memudahkan dalam pencarian sumber ilmiah, seperti *Fruit juice*, *Acidified fruit juice*, *Acidified juice*, *HPP*, *High Pressure Processing*, *Microbial inactivation*, *Bacterial inactivation*, *Microorganism inactivation* serta dengan bantuan *Boolean Operators* (OR/AND/NOT) sehingga kata kunci dasar yang digunakan pada penelitian ini adalah (*fruit juice* OR *acidified fruit juice* OR *acidified juice*) AND (HPP OR "*High Pressure Processing*" OR "*High Pressure*") AND ("*Microbial inactivation*" OR "*Bacterial inactivation*" OR "*microorganism inactivation*"). Pencarian dan analisis data juga memanfaatkan metode PRISMA (*Priority Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) guna menyeleksi artikel yang digunakan. Metode ini dapat dilihat pada Gambar 1.



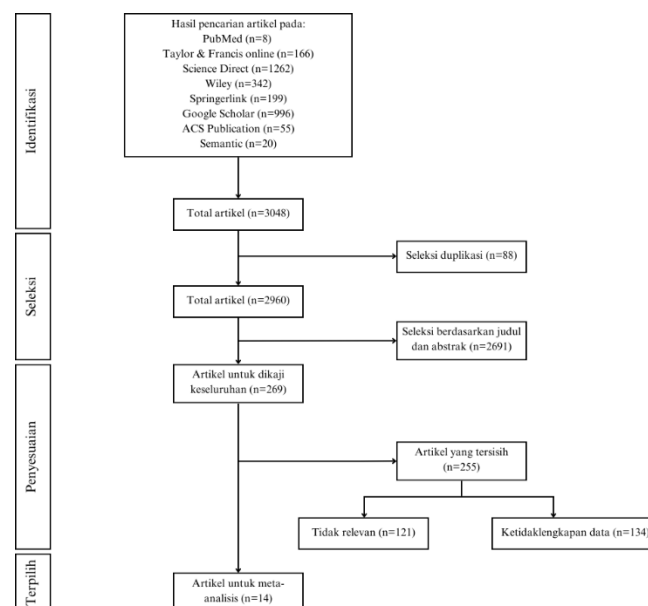
Gambar 1. Diagram Metode PRISMA

Artikel ilmiah akan disaring melalui identitas artikel. Selain itu juga, melalui tahap ini, artikel yang memiliki judul yang sama (duplikat) akan dihilangkan salah satu, selain itu judul yang sesuai dengan kata kunci yang telah dicari juga harus mampu disesuaikan oleh penulis. Judul yang telah terkumpul kemudian abstraknya akan dibaca untuk melihat ringkasan singkat terkait artikel ilmiah yang digunakan. Oleh karena itu, ketika terdapat keraguan dalam penentuan artikel, maka harus mengusung asas inklusivitas daripada eksklusivitas (Tawfik et al., 2019). Data yang telah terkumpul dan terekstraksi kemudian diolah menggunakan OpenMEE. Data akan dianalisis *Raw Mean Difference* (RMD) dengan interval kepercayaan 95%. Analisis tersebut akan menghasilkan ukuran efek atau *effect size* guna mengetahui pengaruh terhadap penelitian tunggal. Analisis data yang dilakukan adalah perhitungan *effect size* atau ukuran efek yang digunakan untuk menilai seberapa besar pengaruh dari sebuah penelitian. *Effect size* digunakan dalam meta-analisis yang mengagregasi beberapa penelitian menjadi satu penelitian.

Funnel plot sering digunakan untuk analisis bias publikasi. *Funnel plot* dengan bentuk simetri tidak menunjukkan indikasi adanya bias publikasi. Metode angka Rosenthal's *fail-safe number* (Nfs) juga diterapkan pada penghitungan bias publikasi. Jika nilai *fail-safe number* (Nft) melebihi $5N+10$, maka model analisis dianggap kuat dan tidak bias (Palupi et al., 2012). Analisis meta regresi juga dilakukan untuk melihat heterogenitas studi (>50%) untuk melihat pengaruh variabel moderator dengan mikrobiologi.

Hasil dan Pembahasan

Analisis Sumber Studi



Gambar 2. Skema Pencarian dan Penyeleksian Sumber Studi

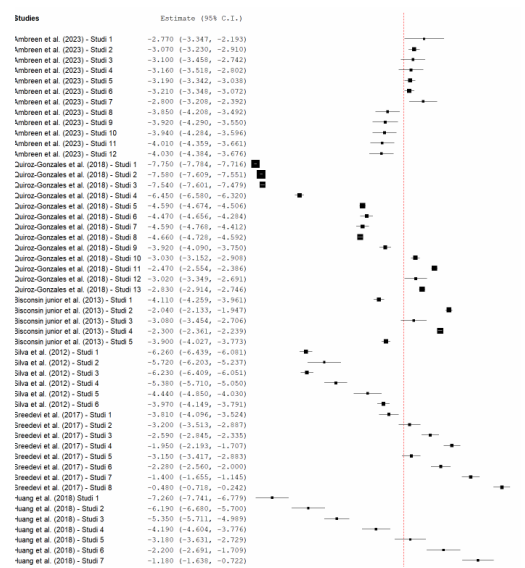
Pencarian sumber studi ilmiah dilakukan dengan melibatkan 8 *database* jurnal internasional dengan jumlah kalkulasi artikel adalah sebanyak 3048 jurnal. Artikel yang telah terkumpul kemudian akan diseleksi duplikasi dan diseleksi berdasarkan judul dan abstrak. Melalui filtrasi tersebut, didapat 269 artikel yang akan dikaji secara keseluruhan. Artikel yang telah dikaji akan disaring kembali berdasarkan relevansi dan data. Hal tersebut berguna untuk memastikan bahwa artikel yang akan digunakan untuk meta-analisis merupakan artikel yang relevan dan memiliki data yang lengkap.

Berdasarkan tinjauan tersebut, diperoleh artikel sebanyak 14 yang akan digunakan untuk pengujian meta-analisis. Artikel-artikel tersebut dipublikasikan dari tahun 2012 hingga

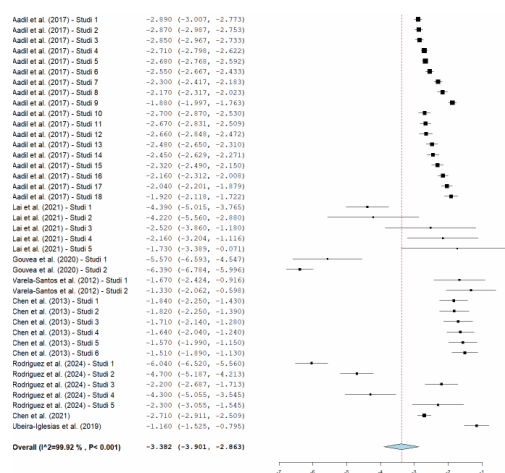
2024. Artikel-artikel yang akan digunakan untuk meta-analisis merupakan studi-studi yang dilakukan oleh Silva et al., (2012), Varela-Santos et al., (2012), Chen et al., (2013), Bisconsin-Junior et al., (2014), Aadil et al., (2017), Huang et al., (2018); Quiroz-González et al., (2018); Sreedevi dan Rao (2018), Ubeira-Iglesias et al., (2019), Gouvea et al., (2020), Chen et al., (2022), Lai et al., (2022), Ambreen et al., (2023), Rodríguez-Cortina dan Hernández-Carrión (2025). Berdasarkan 14 artikel yang digunakan, didapatkan studi sebanyak 91 studi dan terdapat diagram PRISMA yang digunakan untuk alur pencarian dan sortasi artikel pada Gambar 2.

Analisis Overall Effect Size

Data yang telah diekstrak dan ditabulasikan kemudian akan dianalisis dengan OpenMEE untuk menghitung *effect size* (nilai keseluruhan efek) yang memiliki luaran *forest plot*. Selain itu, diagram pada Gambar 5 juga menunjukkan terdapat selang kepercayaan (CI), *p-value* hingga ukuran heterogenitas studi (I^2). Nilai overall *effect size* inaktivasi mikroba pada jus asam dengan HPP ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 3. Forest plot overall effect size



Gambar 4. Forest plot overall effect size (lanjutan)

Berdasarkan Gambar 3 dan Gambar 4 diatas, nilai *overall effect size* pada grafik *forest plot* diatas menunjukkan sebesar -3.382 dengan selang kepercayaan (95% CI) -3.901 hingga -2.863 serta *p-value* < 0.001. Nilai overall *effect size* negatif menunjukkan bahwa adanya

pengaruh HPP terhadap jus asam yang memberikan penurunan pada jumlah mikroba. Selain itu, hasil juga menunjukkan bahwa terdapat hasil yang sangat signifikan karena selang kepercayaan yang tidak menyentuh angka nol dan nilai *p-value* yang memiliki nilai <0.005 . Hasil pengujian memiliki heterogenitas (I^2) tinggi dengan nilai 99.92%, karena nilai tersebut memiliki nilai lebih dari 75%. Oleh karena itu, dapat dilakukan uji lanjutan berupa analisis *subgroup* untuk melihat pengaruh faktor-faktor yang ada. Faktor-faktor tersebut meliputi jenis mikroba, tekanan HPP, waktu HPP, dan suhu HPP.

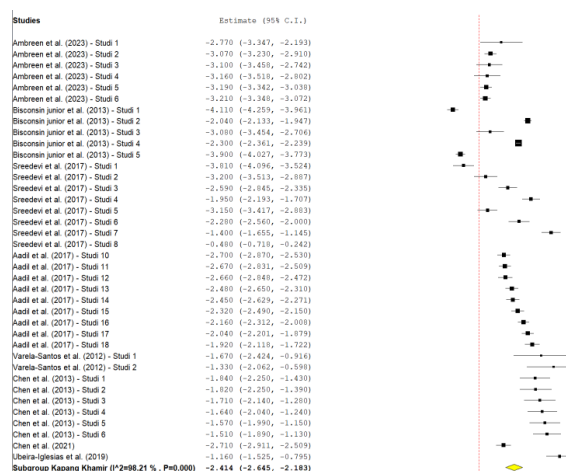
Analisis Subgroup Mikroba

Struktur seluler dan proses penting yang berjalan pada sel mikroba akan dipengaruhi oleh adanya HPP. Menurut Sehwat et al., (2021), efek mematikan dari HPP terhadap populasi mikroba diakibatkan adanya efek simultan terhadap permeabilitas membran sel, perubahan morfologi, perubahan reaksi biokimia, dan gangguan pada sistem genetik yang terjadi di dalam sel mikroba yang pada akhirnya akan membuat mikroba mati. Pengaruh HPP terhadap mikroba pada jus asam dapat dilihat pada Tabel 2.

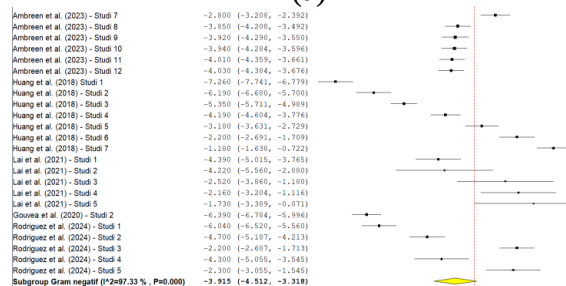
Tabel 2. Analisis *subgroup* mikroba terhadap perlakuan HPP

Jenis mikroba	N	RMD (95% CI)	<i>p-value</i>
Kapang Khamir	38	-2.414 (-2.645, -2.183)	0.000
Gram negatif	24	-3.915 (-4.512, -3.318)	0.000
Gram positif	20	-5.022 (-5.889, -4.155)	0.000
Total Plate Count	9	-3.382 (-3.901, -2.863)	0.000
Kombinasi (overall)	91	-3.382 (-3.901, -2.863)	0.000

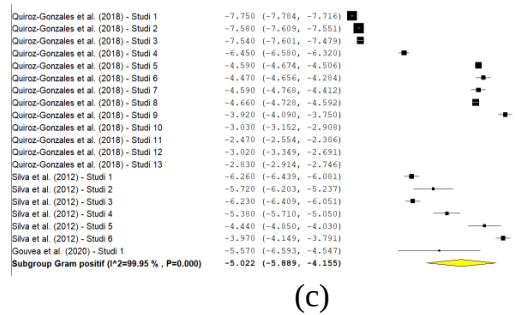
N (Jumlah studi), RMD (*Raw Mean Difference*), 95 CI% (Selang kepercayaan)



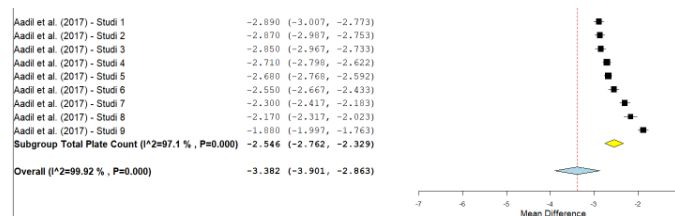
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 5. Forest plot analisis subgroup mikroba kapang khamir (a), Gram negatif (b), Gram positif (c), dan TPC (d)

Berdasarkan tabel tersebut, perlakuan HPP memberikan jumlah penurunan yang signifikan secara keseluruhan (*overall*) yang dapat dilihat pada semua nilai RMD yang bernilai negatif. Nilai RMD gabungan sebesar -3.382 menegaskan bahwa HPP sangat efektif untuk mengurangi jumlah mikroba dalam jus asam secara keseluruhan. Selain itu, nilai heterogenitas sebesar 99.92% memberikan arti bahwa data studi yang digunakan beragam (heterogen).

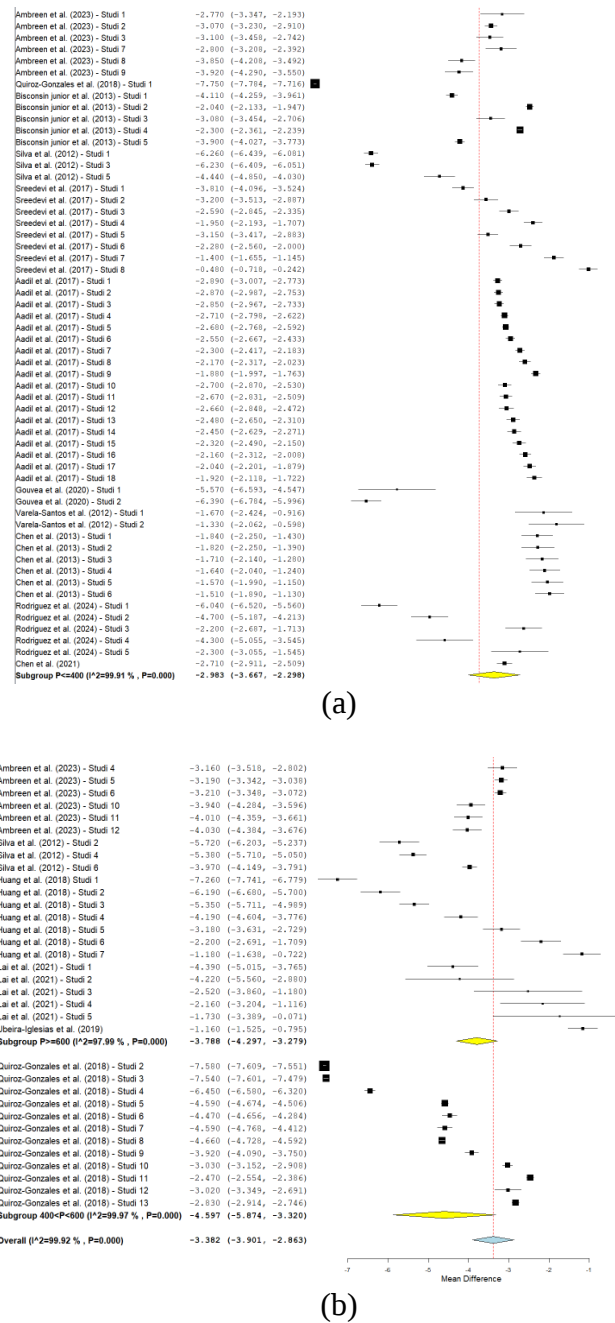
Berdasarkan pengujian, nilai *effect size* untuk analisis *subgroup* mikroba dari terkecil hingga terbesar adalah sebagai berikut: Kapang khamir: -2.414 (-2.645, -2.183), Total Plate Count: -3.382 (-3.901, -2.863), Gram negatif: -3.915 (-4.512, -3.318), dan Gram positif: -5.022 (-5.889, -4.155). Semakin rendah nilai *effect size*, maka semakin mikroba akan memiliki pertahanan tinggi (*resistant*) terhadap tekanan. Oleh karena itu, kapang khamir menjadi mikroba yang tahan terhadap adanya perlakuan HPP. Hal tersebut dikarenakan adanya dinding sel yang tebal dan kompleks (kitin, glukukan, dan mannoprotein) serta kemampuan adaptasi terhadap stres lingkungan (Balasubramaniam et al., 2016).

Analisis Subgroup Tekanan

Tabel 3. Analisis *subgroup* tekanan terhadap perlakuan HPP

Tekanan (MPa)	N	RMD (95% CI)	p-value
$P \leq 400$	57	-2.983 (-3.667, -2.298)	0.000
$400 < P < 600$	12	-4.597 (-5.874, -3.320)	0.000
$P \geq 600$	22	-3.788 (-4.297, -3.279)	0.000
Kombinasi (<i>overall</i>)	91	-3.382 (-3.901, -2.863)	0.000

N (Jumlah studi), RMD (*Raw Mean Difference*), 95 CI% (Selang kepercayaan)



Gambar 6. Forest plot analisis subgroup tekanan $P \leq 400$ MPa (a), $P \geq 600$ MPa dan $400 < P < 600$ MPa (b)

HPP merupakan salah satu metode pengawetan pangan yang melibatkan tekanan sebesar 400-600 MPa pada suhu ruang (Kateh et al., 2024b). Analisis subgroup untuk variabel tekanan dibagi menjadi 3 bagian: $P \leq 400$ MPa, $400 < P < 600$ MPa, dan $P \geq 600$ MPa. Hasil *effect size* dari yang terkecil hingga terbesar yaitu $P \leq 400$ MPa (RMD = -2.983), $P \geq 600$ MPa (RMD = -3.788), dan $400 < P < 600$ MPa (RMD = -4.597). Berdasarkan tinjauan tersebut, hasil menunjukkan bahwa pada tekanan $400 < P < 600$ MPa memiliki nilai *effect size* terbesar yang berarti bahwa pada tekanan tersebut sangat optimal untuk dilakukan perlakuan HPP di jus pH rendah. Hal tersebut sejalan dengan penelitian (Verma et al., 2020) yang menyatakan bahwa pada tekanan 400 hingga 600 MPa telah diamati terjadi penghambatan mikroba tertinggi. (Huang et al., 2014) juga sejalan bahwa pada tekanan hingga 600 MPa dapat meningkatkan hasil

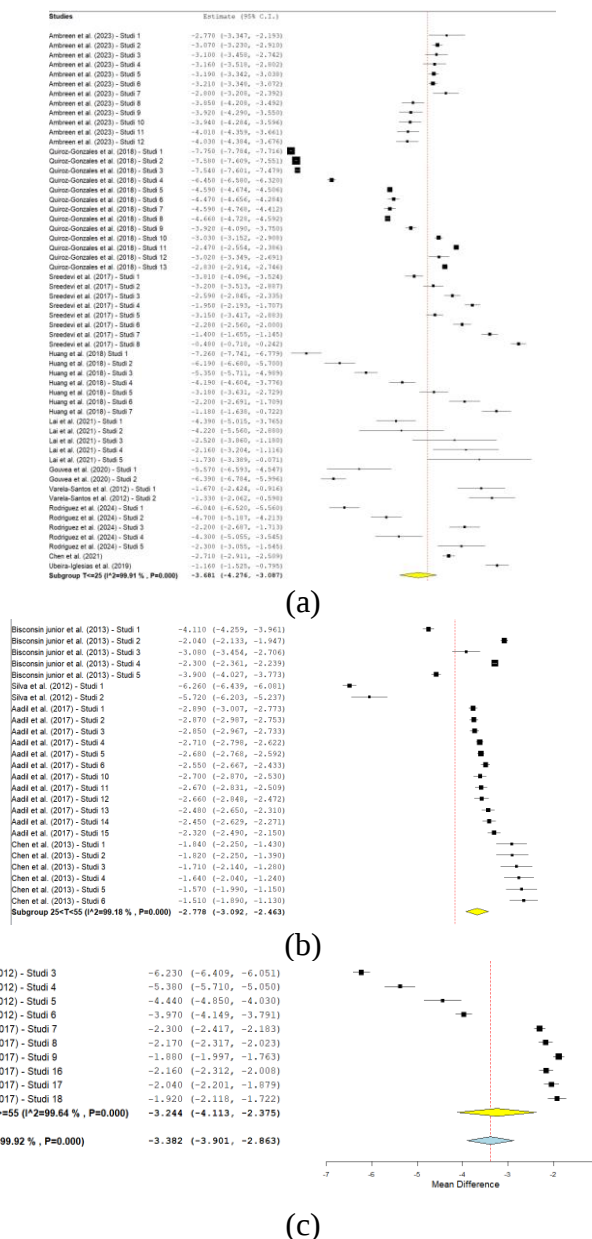
penghambatan pertumbuhan mikroba. Tetapi, kombinasi dengan panas (suhu lebih dari 40°C) pada tekanan 500 MPa dapat juga dipertimbangkan untuk mengeliminasi *Bacillus endospora* (Zhang & Mittal, 2008).

Analisis Subgroup Suhu

Tabel 4. Analisis *subgroup* suhu terhadap perlakuan HPP

Suhu (°C)	N	RMD (95 % CI)	p-value
Psikrofil ($T \leq 25$)	56	-3.681 (-4.276, -3.087)	0.000
Mesofil ($25 < T < 50$)	25	-2.778 (-3.092, -2.463)	0.000
Termofil ($T \geq 55$)	10	-3.244 (-4.113, -2.375)	0.000
Kombinasi (<i>overall</i>)	91	-3.382 (-3.901, -2.863)	0.000

N (Jumlah studi), RMD (*Raw Mean Difference*), 95 CI% (Selang kepercayaan)



Gambar 7. Forest plot analisis *subgroup* suhu $T \leq 25^\circ\text{C}$ (a), $25^\circ\text{C} < T < 50^\circ\text{C}$ (b), dan $T \geq 55^\circ\text{C}$

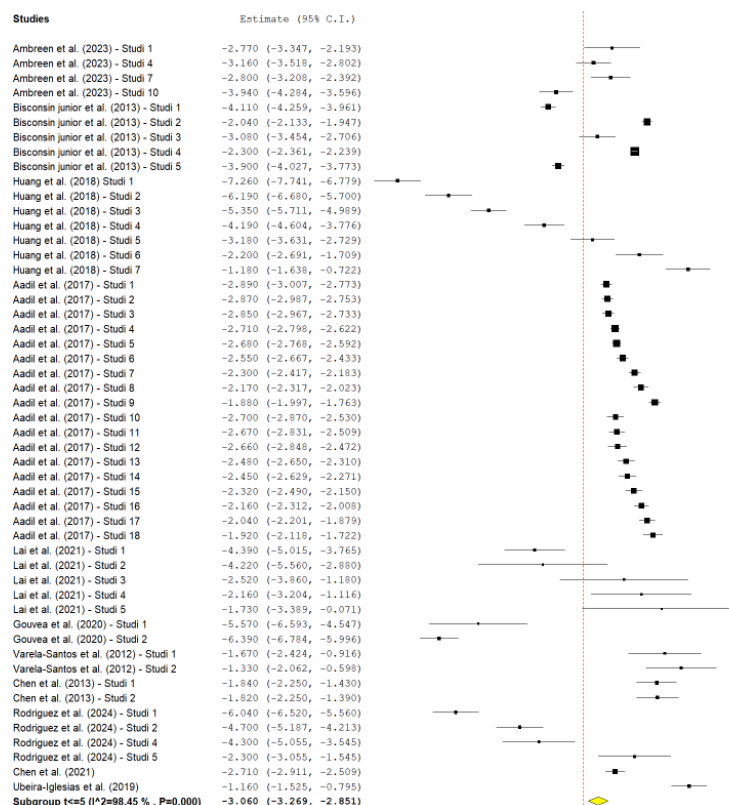
Berdasarkan penelitian oleh Galazka dan Ledward (2007), peningkatan inaktivasi mikroba akan meningkat ketika sejalan dengan peningkatan kombinasi antara suhu dan tekanan. Ketika suhu naik, proses inaktivasi akan semakin berjalan dengan baik (*log reduction*) semakin tinggi. Berdasarkan rentang suhu mikroba tumbuh, studi ini dibagi menjadi tiga bagian: Psikrofil ($T \leq 25^\circ\text{C}$), Mesofil ($25 < T < 50^\circ\text{C}$), dan Termofil ($T \geq 55^\circ\text{C}$). Nilai *effect size* dari terkecil hingga terbesar: $25 < T < 50^\circ\text{C}$ (RMD = -2.778), $T \geq 55^\circ\text{C}$ (RMD = -3.244), dan $T \leq 25^\circ\text{C}$ (RMD = -3.681). Berdasarkan tinjauan tersebut, $T \leq 25^\circ\text{C}$ menunjukkan inaktivasi yang tinggi pada variabel suhu. Sejalan dengan penelitian oleh (Koutsoumanis et al., 2022b; Sehwat et al., 2021), bahwa pada suhu tersebut, mikroba pada umumnya dapat mati karena pada suhu rendah, mekanisme perbaikan seluler mikroba dapat dihambat melalui kombinasi dari tekanan, sehingga kerusakan struktural dapat bersifat irreversibel. Selain itu juga pada suhu $\leq 25^\circ\text{C}$, membran akan mengalami permeabilisasi dan kebocoran sitoplasma sehingga mempercepat inaktivasi.

Analisis Subgroup Waktu

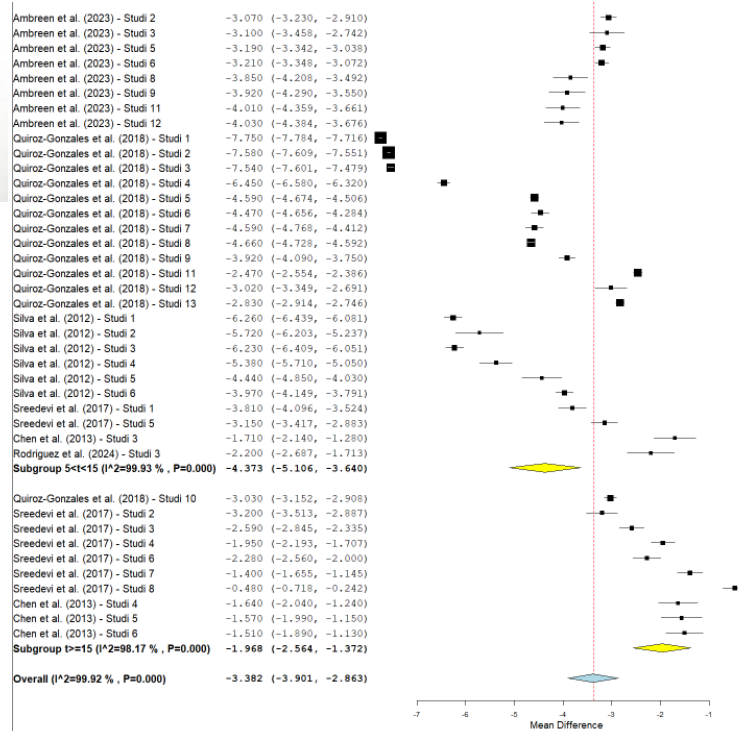
Tabel 5. Analisis *subgroup* waktu terhadap perlakuan HPP

Waktu (menit)	N	RMD (95 % CI)	p-value
$t \leq 5$	51	-3.060 (-3.269, -2.851)	0.000
$5 < t < 15$	30	-4.373 (-5.106, -3.640)	0.000
$t \geq 15$	10	-1.968 (-2.564, -1.372)	0.000
Kombinasi (<i>overall</i>)	91	-3.382 (-3.901, -2.863)	0.000

N (Jumlah studi), RMD (*Raw Mean Difference*), 95 CI% (Selang kepercayaan)



(a)



(b)

Gambar 8. Forest plot analisis subgroup waktu $t \leq 5$ menit (a), $5 \text{ menit} < t < 15$ menit dan $t \geq 15$ menit (b)

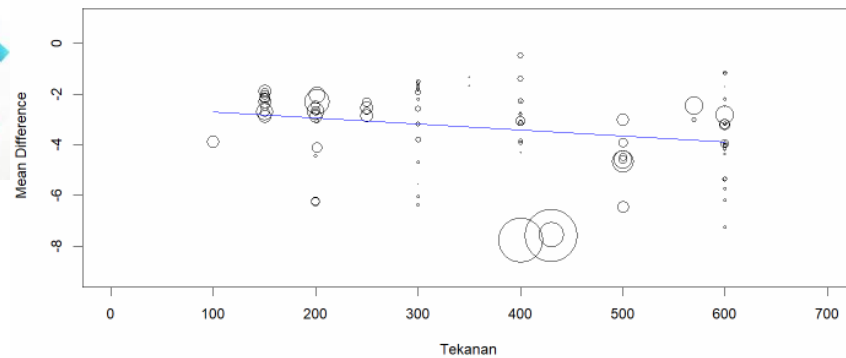
Berdasarkan Tabel 5, kelompok waktu dibagi menjadi 3 bagian, yaitu $t \leq 5$ menit, $5 < t < 15$ menit, $t \geq 15$ menit. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada kelompok $t \leq 5$ menit (RMD = -3.060), $5 < t < 15$ menit (RMD = -4.373), dan $t \geq 15$ menit (RMD = -1.968). Berdasarkan pernyataan tersebut, respon mikroba tertinggi berada pada rentang waktu $5 < t < 15$ menit, sehingga dapat disimpulkan bahwa pada rentang waktu tersebut, mikroba dapat efektif untuk diinaktivasi. Hal ini diperkuat dengan penelitian oleh (Garre et al., 2019) yang menegaskan bahwa pada rentang waktu 5-15 menit merupakan waktu yang ideal untuk menginaktivasi mikroba dengan perlakuan HPP. Selain itu Black et al., (2007), juga menegaskan bahwa pada waktu yang terlalu lama, mikroba dapat mengalami kerusakan *sublethal* sehingga dapat memberikan kesempatan mikroba untuk beradaptasi dan pulih kembali.

Analisis Meta-regresi

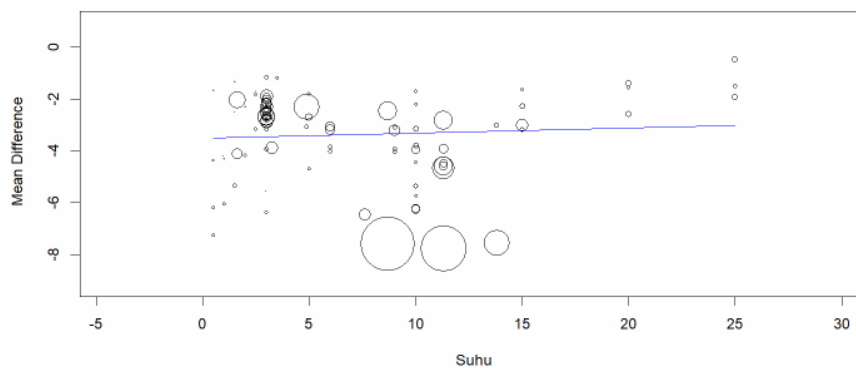
Variabel moderator merupakan variabel yang mempengaruhi hasil suatu penelitian. Tekanan, suhu, dan waktu merupakan faktor utama yang mempengaruhi metode HPP. Pengujian meta-regresi bertujuan untuk melihat hubungan variabel moderator tekanan, suhu, dan waktu dengan effect size mikroba. Plot meta-regresi disajikan pada Gambar 18 dimana sumbu X merupakan variabel moderator sedangkan sumbu Y merupakan effect size mikroba. Nilai intercept, slope, dan p-value untuk masing-masing hasil meta-regresi disajikan di Tabel 6.

Tabel 6. Analisis meta-regresi pada seluruh variabel moderator

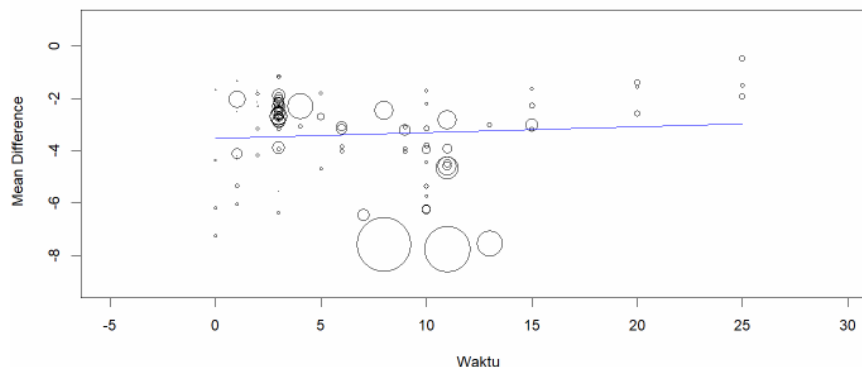
Parameter	Intercept	Slope
Tekanan	-2.487	-0.002
Suhu	-3.516	0.019
Waktu	-3.530	0.022



(a)



(b)



(c)

Gambar 9. Plot meta-regresi untuk variabel tekanan (a), suhu (b), dan waktu (c)

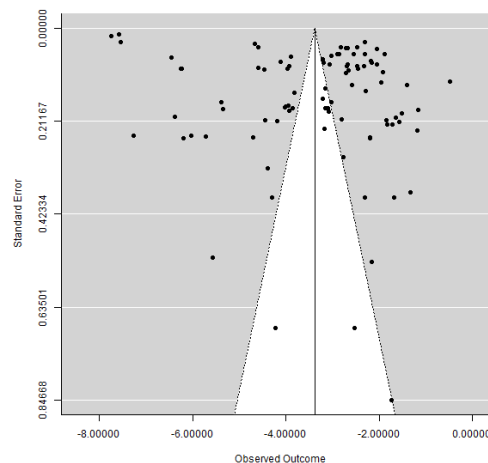
Suyono (2015) menegaskan bahwa pengujian meta-regresi akan menyajikan nilai intercept dan slope yang dasarnya diambil dari dasar uji regresi linear. Jika variabel X sama dengan nol, maka *intercept*-nya adalah nilai rata-rata dari variabel Y. Namun, karena variabel X dalam uji meta-regresi ini tidak 0, maka hasil intersep tidak berarti dan tidak perlu ditafsirkan. *Slope* adalah kemiringan garis yang dihasilkan. Jika garis grafik meningkat atau nilai *slope* yang dihasilkan positif, maka hal tersebut menunjukkan bahwa variabel X memiliki pengaruh positif terhadap variabel Y. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai rata-rata X, maka semakin tinggi pula nilai rata-rata Y, dan sebaliknya.

Berdasarkan Tabel 6, nilai *slope* yang dihasilkan menunjukkan nilai negatif pada variabel tekanan. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar tekanan yang diberikan maka nilai dari mikroba akan turun. Berbeda dengan nilai *slope* yang bernilai positif yang ditunjukkan pada variabel suhu dan waktu. Hal tersebut menunjukkan bahwa nilai masing-masing variabel akan meningkat ketika mikroba yang terdapat memiliki kuantitas yang banyak. Hasil dari nilai *slope*

pada semua variabel yang dianalisis sejalan dengan hasil pengujian dan teori yang ada.

Analisis Bias Publikasi

Hasil analisis bias publikasi dapat dilihat dari *funnel plot* yang terdapat pada Gambar 10. Pada gambar tersebut terlihat bentuk asimetris dimana apabila hasil *funnel plot* simetris tidak terdapat bias publikasi (Haidich, 2010). Bias publikasi merupakan ada tidaknya informasi yang disebabkan oleh tidak dipublikasikannya seluruh studi karena alasan tertentu, seperti hasil statistik yang tidak signifikan (Fagerland, 2015). Penilaian terhadap *funnel plot* tersebut cenderung lebih subjektif sehingga perlu dilakukan uji tambahan *Fail-safe number* (Nfs). Berdasarkan pengujian, hasil Nfs menunjukkan nilai sebesar 5394316 dan $5N + 10 = 465$. Oleh karena itu, karena Nfs menunjukkan lebih besar daripada $5N + 10$, maka hasil menunjukkan bias publikasi yang rendah.



Gambar 10. Hasil *funnel plot* analisis bias publikasi

Kesimpulan

Hasil meta-analisis dari 47 artikel terpilih dan 91 studi memiliki topik terkait inaktivasi mikroba pada jus asam (*acidified juice*) dengan perlakuan HPP. Analisis menunjukkan bahwa adanya dampak yang signifikan terhadap inaktivasi mikroba pada jus asam dengan perlakuan HPP. Hasil pengujian meta-analisis menunjukkan bahwa mikroba jenis kapang khamir memiliki resistensi tinggi terhadap perlakuan HPP, diikuti oleh TPC pada Gram negatif dan Gram positif. Selain itu, pada tekanan 400 – 600 MPa, suhu sebesar $\leq 25^\circ\text{C}$, dan waktu dengan rentang 5-10 menit merupakan hasil variabel yang signifikan untuk meningkatkan efisiensi inaktivasi mikroba pada jus asam. Studi yang dilakukan pada penelitian ini merupakan studi kuantitatif dengan membandingkan parameter tertentu dengan perlakuan HPP dalam satu penelitian.

Referensi

- Aadil, R. M., Zeng, X.-A., Jabbar, S., Nazir, A., Mann, A. A., Khan, M. K. I., Abdullah, A., & Ramzan, A. (2017). Quality Evaluation of Grapefruit Juice by Thermal and High Pressure Processing Treatment. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 30(3). <https://doi.org/10.17582/journal.pjar/2017.30.3.249.257>
- Ambreen, S., Arshad, M. U., Imran, A., Afzaal, M., & Madilo, F. K. (2023). A comparative study of high-pressure processing and thermal processing techniques on characteristics and microbial evaluation of orange juice. *International Journal of Food Properties*, 26(2), 3214–3225. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2271678>
- Awuah, G. B., Ramaswamy, H. S., & Economides, A. (2007). Thermal processing and quality: Principles and overview. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(6), 584–602. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.08.004>

- Balasubramaniam, V. M., Barbosa, G. V., Huub, -Cánovas, & Lelieveld Editors, L. M. (2015). *Food Engineering Series High Pressure Processing of Food Principles, Technology and Applications*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3234-4>
- Bayindirli, A., Alpas, H., Bozoglu, F., & Hizal, M. (2006). Efficiency of high pressure treatment on inactivation of pathogenic microorganisms and enzymes in apple, orange, apricot and sour cherry juices. *Food Control*, 17(1), 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2004.09.002>
- Bisconsin-Junior, A., Rosenthal, A., & Monteiro, M. (2014). Optimisation of High Hydrostatic Pressure Processing of Pêra Rio Orange Juice. *Food and Bioprocess Technology*, 7(6), 1670–1677. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1176-7>
- Black, E. P., Setlow, P., Hocking, A. D., Stewart, C. M., Kelly, A. L., & Hoover, D. G. (2007). *Response of spores to High-Pressure Processing*. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2007.00021.x>
- Chen, D., Xi, H., Guo, X., Qin, Z., Pang, X., Hu, X., Liao, X., & Wu, J. (2013). Comparative study of quality of cloudy pomegranate juice treated by high hydrostatic pressure and high temperature short time. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 19, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.03.003>
- Chen, T., Li, B., Shu, C., Tian, J., Zhang, Y., Gao, N., Cheng, Z., Xie, X., & Wang, J. (2022). Combined effect of thermosonication and high hydrostatic pressure on bioactive compounds, microbial load, and enzyme activities of blueberry juice. *Food Science and Technology International*, 28(2), 169–179. <https://doi.org/10.1177/10820132211004316>
- Erkmen, O., & Dogan, C. (2004). Effects of ultra high hydrostatic pressure on *Listeria monocytogenes* and natural flora in broth, milk and fruit juices. *International Journal of Food Science and Technology*, 39(1), 91–97. <https://doi.org/10.1046/j.0950-5423.2003.00754.x>
- Fagerland, M. W. (2015). Evidence-Based Medicine and Systematic Reviews. Dalam *Research in Medical and Biological Sciences: From Planning and Preparation to Grant Application and Publication* (hlm. 431–461). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799943-2.00012-4>
- Garre, A., González-Tejedor, G. A., Aznar, A., Fernández, P. S., & Egea, J. A. (2019). Mathematical modelling of the stress resistance induced in *Listeria monocytogenes* during dynamic, mild heat treatments. *Food Microbiology*, 84. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2019.06.002>
- Gouvea, F. S., Padilla-Zakour, O. I., Worobo, R. W., Xavier, B. M., Walter, E. H. M., & Rosenthal, A. (2020). Effect of high-pressure processing on bacterial inactivation in açai juices with varying pH and soluble solids content. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 66. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102490>
- Huang, H. W., Chen, B. Y., & Wang, C. Y. (2018). Comparison of high pressure and high temperature short time processing on quality of carambola juice during cold storage. *Journal of Food Science and Technology*, 55(5), 1716–1725. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3084-3>
- Huang, H. W., Lung, H. M., Yang, B. B., & Wang, C. Y. (2014). Responses of microorganisms to high hydrostatic pressure processing. Dalam *Food Control* (Vol. 40, Nomor 1, hlm. 250–259). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.12.007>
- Insfran-rivarola, A., Tlapa, D., Limon-romero, J., & Ontiveros, S. (2020). foods A Systematic Review and Meta-Analysis of the Effects. *journal MDPI*, 9, 1169.
- Kateh, S. aibah, Purnomo, E. H., & Hasanah, U. (2024a). Meta-analysis: Microbial inactivation in milk using high-pressure processing (HPP). *International Journal of Food Science and Technology*, 59(6), 4185–4193. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16758>

- Kateh, S. aibah, Purnomo, E. H., & Hasanah, U. (2024b). Meta-analysis: Microbial inactivation in milk using high-pressure processing (HPP). Dalam *International Journal of Food Science and Technology* (Vol. 59, Nomor 6, hlm. 4185–4193). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16758>
- Katsaros, G. I., Tsevdou, M., Panagiotou, T., & Taoukis, P. S. (2010). Kinetic study of high pressure microbial and enzyme inactivation and selection of pasteurisation conditions for Valencia orange juice. *International Journal of Food Science and Technology*, 45(6), 1119–1129. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02238.x>
- Khongphakdee, P., Peanparkdee, M., & Sae-tan, S. (2025). Dual effects of thermal processing and polyphenol incorporation on bioaccessibility and functionality of soy and whey proteins. *Food Chemistry Advances*, 6, 100905. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.100905>
- Koutsoumanis, K., Alvarez-Ordóñez, A., Bolton, D., Bover-Cid, S., Chemaly, M., Davies, R., De Cesare, A., Herman, L., Hilbert, F., Lindqvist, R., Nauta, M., Peixe, L., Ru, G., Simmons, M., Skandamis, P., Suffredini, E., Castle, L., Crotta, M., Grob, K., ... Allende, A. (2022a). The efficacy and safety of high-pressure processing of food. *EFSA Journal*, 20(3). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2022.7128>
- Koutsoumanis, K., Alvarez-Ordóñez, A., Bolton, D., Bover-Cid, S., Chemaly, M., Davies, R., De Cesare, A., Herman, L., Hilbert, F., Lindqvist, R., Nauta, M., Peixe, L., Ru, G., Simmons, M., Skandamis, P., Suffredini, E., Castle, L., Crotta, M., Grob, K., ... Allende, A. (2022b). The efficacy and safety of high-pressure processing of food. *EFSA Journal*, 20(3). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2022.7128>
- Lai, Y. Y., Chen, J. H., Liu, Y. C., Hsiao, Y. T., & Wang, C. Y. (2022). Evaluation of microbiological safety, physicochemical and aromatic qualities of shiikuwasha (Citrus depressa Hayata) juice after high pressure processing. *Journal of Food Science and Technology*, 59(3), 990–1000. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05103-7>
- Muntean, M.-V., Marian, O., Barbieru, V., Cătușescu, G. M., Ranta, O., Drocas, I., & Terhes, S. (2016). High Pressure Processing in Food Industry – Characteristics and Applications. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 10, 377–383. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.09.077>
- Quiroz-González, B., Rodríguez-Martínez, V., del Rosario García-Mateos, M., Torres, J. A., & Welte-Chanes, J. (2018). High hydrostatic pressure inactivation and recovery study of *Listeria innocua* and *Saccharomyces cerevisiae* in pitaya (*Stenocereus pruinosus*) juice. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 50, 169–173. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.10.003>
- Rampurwala, A. A., Taharian, A. R., & Ramaswamy, H. S. (2025). Comparison of acidified and conventional low acid thermal processing of white mushroom in glass jars as influenced by reciprocating agitation. *Journal of Food Engineering*, 388. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112342>
- Rendueles, E., Omer, M. K., Alvseike, O., Alonso-Calleja, C., Capita, R., & Prieto, M. (2011). Microbiological food safety assessment of high hydrostatic pressure processing: A review. *Lwt*, 44(5), 1251–1260. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.11.001>
- Rodríguez-Cortina, A., & Hernández-Carrión, M. (2025). Amazonian fruits in Colombia: Exploring bioactive compounds and their promising role in functional food innovation. *Journal of Food Composition and Analysis*, 137, 106878. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106878>
- Roever, L. (2018). PICO: Model for clinical questions. *Evidence-Based Medicine*, 3(2), 1–2. <https://doi.org/10.4172/2471-9919.1000115>
- Sehrawat, R., Kaur, B. P., Nema, P. K., Tewari, S., & Kumar, L. (2021). Microbial inactivation by high pressure processing: principle, mechanism and factors responsible. Dalam

- Food Science and Biotechnology* (Vol. 30, Nomor 1, hlm. 19–35). The Korean Society of Food Science and Technology. <https://doi.org/10.1007/s10068-020-00831-6>
- Shangguan, S., Afshin, A., Shulkin, M., Ma, W., Marsden, D., Smith, J., Saheb-Kashaf, M., Shi, P., Micha, R., Imamura, F., & Mozaffarian, D. (2018). A Meta-Analysis of Food Labeling Effects on Consumer Diet Behaviors and Industry Practices. *American Journal of Preventive Medicine*, 56(2), 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2018.09.024>
- Silva, F. V. M., Tan, E. K., & Farid, M. (2012). Bacterial spore inactivation at 45–65 °C using high pressure processing: Study of *Alicyclobacillus acidoterrestris* in orange juice. *Food Microbiology*, 32(1), 206–211. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2012.04.019>
- Sreedevi, P., & Rao, P. S. (2018). Microbial destruction kinetics of high-pressure-processed sugarcane juice (*Saccharum officinarum*). *Journal of Food Process Engineering*, 41(7). <https://doi.org/10.1111/jfpe.12850>
- Syed, Q. A., Buffa, M., Guamis, B., & Saldo, J. (2014). Effect of Compression and Decompression Rates of High Hydrostatic Pressure on Inactivation of *Staphylococcus aureus* in Different Matrices. *Food and Bioprocess Technology*, 7(4), 1202–1207. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1146-0>
- Tawfik, G. M., Dila, K. A. S., Mohamed, M. Y. F., Tam, D. N. H., Kien, N. D., Ahmed, A. M., & Huy, N. T. (2019). A step by step guide for conducting a systematic review and meta-analysis with simulation data. *Tropical Medicine and Health*, 47(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/s41182-019-0165-6>
- Ubeira-Iglesias, M., Wilches-Pérez, D., Cavia, M. M., Alonso-Torre, S., & Carrillo, C. (2019). High hydrostatic pressure processing of beetroot juice: effects on nutritional, sensory and microbiological quality. *High Pressure Research*, 39(4), 691–706. <https://doi.org/10.1080/08957959.2019.1666842>
- Usaga, J., Acosta, Ó., Churey, J. J., Padilla-Zakour, O. I., & Worobo, R. W. (2021). Evaluation of high pressure processing (HPP) inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica*, and *Listeria monocytogenes* in acid and acidified juices and beverages. *International Journal of Food Microbiology*, 339, 109034. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.109034>
- Varela-Santos, E., Ochoa-Martinez, A., Tabilo-Munizaga, G., Reyes, J. E., Pérez-Won, M., Briones-Labarca, V., & Morales-Castro, J. (2012). Effect of high hydrostatic pressure (HHP) processing on physicochemical properties, bioactive compounds and shelf-life of pomegranate juice. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 13, 13–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.10.009>
- Verma, D. K., Thakur, M., Kumar, J., Srivastav, P. P., Al-Hilphy, A. R. S., Patel, A. R., & Suleria, H. A. R. (2020). High Pressure Processing (HPP): Fundamental Concepts, Emerging Scope, and Food Application. Dalam *Emerging Thermal and Nonthermal Technologies in Food Processing* (hlm. 225–257). Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/9780429297335-9>
- Vignali, G., Gozzi, M., Pelacci, M., & Stefanini, R. (2022). Non-conventional Stabilization for Fruit and Vegetable Juices: Overview, Technological Constraints, and Energy Cost Comparison. Dalam *Food and Bioprocess Technology* (Vol. 15, Nomor 8, hlm. 1729–1747). Springer. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02772-w>
- Yordanov, D. G., & Angelova, G. V. (2010). High pressure processing for foods preserving. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, 24(3), 1940–1945. <https://doi.org/10.2478/V10133-010-0057-8>
- Zhang, H., & Mittal, G. S. (2008). Effects of High-pressure Processing (HPP) on bacterial spores: An overview. *Food Reviews International*, 24(3), 330–351. <https://doi.org/10.1080/87559120802089290>

