



PENGARUH PEMANGGANGAN KOPI TERHADAP TOTAL KANDUNGAN FENOLIK PADA KOPI: KAJIAN META ANALISIS

Andra Rafi Bimasena¹, Muhammad Arpah²

(1, 2) Institut Pertanian Bogor, Indonesia.

✉ Corresponding author:

andrabimasena@apps.ipb.ac.id, arpah@apps.ipb.ac.id

Abstrak

Kopi merupakan minuman yang sangat populer di seluruh dunia, dengan konsumsi global mencapai 177,0 juta kantong pada tahun 2023, meningkat 2,2% (ICO 2023). Biji kopi hijau memerlukan proses pemanggangan pada suhu 180-240°C selama 5-15 menit untuk mengembangkan aroma dan rasa khas, dengan tingkat pemanggangan dibagi menjadi *light*, *medium*, dan *dark roasting*. Pemanggangan kopi mempengaruhi total kandungan fenolik (TPC), namun hasil penelitian menunjukkan variasi yang tidak konsisten. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan kesimpulan yang komprehensif dan kuat secara statistik mengenai pengaruh tingkat pemanggangan, jenis kopi, dan negara asal terhadap total kandungan fenolik melalui pendekatan meta-analisis. Meta-analisis ini menganalisis 15 artikel dari 815 studi yang memenuhi kriteria, mencakup 99 penelitian untuk mengevaluasi pengaruh tingkat pemanggangan, jenis kopi, dan negara asal terhadap TPC. Analisis *Standardized Mean Difference* (SMD) dengan interval kepercayaan 95% menunjukkan heterogenitas tinggi antarstudi ($I^2=87,58\%$, $p<0,001$). Hasil menunjukkan *light roast* secara signifikan meningkatkan TPC (SMD=1,708; 95% CI: 0,097-3,318), sedangkan *medium* dan *dark roast* tidak konsisten. Kopi dari Australia (SMD=12,034), Brazil (SMD=2,323), dan Meksiko (SMD=3,517) menunjukkan peningkatan TPC signifikan. Tidak ditemukan bias publikasi (*Egger's test*, $p=0,847$).

Kata kunci: Kopi, Fenolik, Pemanggangan, Meta-analisis, Asal negara

Abstract

Coffee is a very popular beverage worldwide, with global consumption reaching 177.0 million bags in 2023, a 2.2% increase (ICO 2023). Green coffee beans require roasting at 180-240°C for 5-15 minutes to develop their distinctive aroma and flavor, with roast levels categorized as light, medium, and dark. Coffee roasting affects total phenolic content (TPC), but the results showed inconsistent variations. This study aims to provide comprehensive and statistically robust conclusions regarding the effects of roasting level, coffee type, and country of origin on total phenolic content through a meta-analysis approach. This meta-analysis analyzed 15 articles from 815 eligible studies, including 99 studies to evaluate the effect of roasting level, coffee type, and country of origin on TPC. Standardized Mean Difference (SMD) analysis with 95% confidence interval showed high heterogeneity between studies ($I^2=87.58\%$, $p<0.001$). The results showed that light roast significantly increased TPC (SMD=1.708; 95% CI: 0.097-3.318), while medium and dark roast were inconsistent. Coffee from Australia (SMD=12.034), Brazil (SMD=2.323), and Mexico (SMD=3.517) showed significant increases in TPC. No publication bias was found (*Egger's test*, $p=0.847$).

Keywords: Coffee, Phenolics, Roasting, Meta-analysis, Country of origin

PENDAHULUAN

Kopi merupakan salah satu komoditas pertanian paling bernilai di dunia dan menjadi minuman yang dikonsumsi secara luas di berbagai lapisan masyarakat. Berdasarkan laporan International Coffee Organization (ICO, 2023), konsumsi kopi global mencapai 177,0 juta kantong pada tahun 2023, mengalami peningkatan sebesar 2,2% dibanding tahun sebelumnya. Angka ini menunjukkan peran penting kopi tidak hanya sebagai minuman harian, tetapi juga sebagai sektor ekonomi strategis yang mendukung jutaan petani di negara-negara penghasil kopi.

Biji kopi hijau, sebelum dapat dikonsumsi, harus melalui proses pemanggangan (roasting) yang kompleks. Proses ini umumnya dilakukan pada suhu antara 180–240°C selama 5–15 menit, tergantung pada tingkat pemanggangan yang diinginkan. Tiga tingkat pemanggangan yang umum dikenal adalah light, medium, dan dark roast. Setiap tingkat pemanggangan menghasilkan karakteristik rasa, aroma, dan warna yang berbeda, yang secara langsung dipengaruhi oleh reaksi kimia yang terjadi selama pemanasan.

Selama proses pemanggangan, terjadi berbagai reaksi kimia penting seperti reaksi Maillard, pirolisis, dan karamelisasi. Reaksi-reaksi ini berperan dalam pembentukan senyawa volatil yang menentukan aroma khas kopi, sekaligus memengaruhi stabilitas dan konsentrasi senyawa bioaktif di dalamnya. Oleh karena itu, profil kimia kopi hasil pemanggangan dapat berbeda secara signifikan dibanding biji kopi mentah, tergantung pada kondisi proses yang diterapkan.

Di antara berbagai senyawa bioaktif dalam kopi, senyawa fenolik memiliki peran yang sangat penting. Senyawa ini diketahui memberikan kontribusi besar terhadap aktivitas antioksidan kopi dan berperan dalam berbagai manfaat kesehatan, seperti efek antiinflamasi, antibakteri, dan antivirus (Masek et al., 2020). Selain itu, senyawa fenolik turut memengaruhi rasa pahit dan astringensi yang khas pada kopi, sehingga juga menentukan kualitas sensorinya.

Komponen fenolik utama dalam kopi meliputi asam kafeat dan asam klorogenat, khususnya turunan 5-O-caffeoylquinic acid (5-CQA). Asam klorogenat merupakan salah satu antioksidan alami yang berlimpah dalam biji kopi hijau. Namun, selama proses pemanggangan, sebagian senyawa ini dapat terdegradasi atau berubah menjadi senyawa lain dengan aktivitas biologis yang berbeda. Tingkat kehilangan senyawa ini bergantung pada suhu, waktu, serta jenis kopi yang digunakan.

Pengaruh pemanggangan terhadap total kandungan fenolik (Total Phenolic Content/TPC) telah banyak diteliti, namun hasil yang diperoleh sering kali tidak konsisten. Beberapa studi melaporkan bahwa peningkatan suhu pemanggangan menurunkan kadar fenolik secara signifikan, sementara penelitian lain menemukan adanya pembentukan senyawa fenolik baru hasil degradasi asam klorogenat yang justru meningkatkan TPC pada tingkat pemanggangan tertentu.

Selain tingkat pemanggangan, asal geografis kopi juga merupakan faktor yang berpengaruh terhadap kandungan fenolik. Faktor-faktor lingkungan seperti ketinggian tempat tumbuh, varietas, kondisi tanah, dan iklim berperan penting dalam menentukan komposisi kimia biji kopi. Misalnya, kopi Arabika yang tumbuh di dataran tinggi cenderung memiliki kadar asam klorogenat yang lebih tinggi dibandingkan Robusta yang tumbuh di dataran rendah.

Variabilitas yang besar dalam hasil penelitian mengenai kandungan fenolik ini menimbulkan tantangan dalam menarik kesimpulan umum tentang hubungan antara tingkat pemanggangan, asal kopi, dan kandungan bioaktifnya. Perbedaan metodologi, seperti teknik ekstraksi, pelarut yang digunakan, serta metode analisis fenolik (misalnya Folin-Ciocalteu atau HPLC), turut memperbesar variasi hasil antar studi.

Dalam konteks ini, pendekatan meta-analisis menjadi sangat relevan. Meta-analisis memungkinkan integrasi data dari berbagai penelitian independen untuk memperoleh estimasi yang lebih akurat dan reliabel mengenai pengaruh faktor-faktor tersebut. Dengan menggabungkan data kuantitatif dari studi sebelumnya, pendekatan ini dapat mengidentifikasi pola umum, memperkecil ketidakpastian, serta memberikan dasar ilmiah yang lebih kuat untuk interpretasi hasil.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan meta-analisis terhadap pengaruh tingkat pemanggangan dan asal kopi terhadap kandungan total fenolik. Melalui pendekatan ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif tentang bagaimana proses pemanggangan dan faktor geografis memengaruhi komposisi senyawa bioaktif dalam kopi. Hasilnya diharapkan dapat menjadi referensi penting bagi industri kopi dan peneliti dalam mengoptimalkan proses produksi untuk mempertahankan nilai gizi dan kualitas sensorik kopi

METODE PENELITIAN

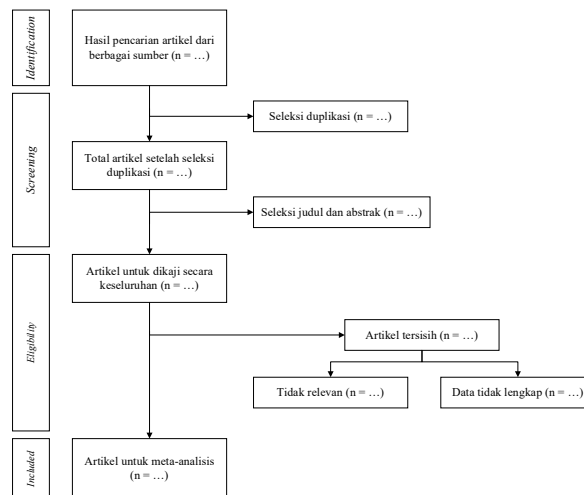
Penelitian meta-analisis ini dimulai dengan merumuskan pertanyaan penelitian menggunakan kerangka PICO (*Population, Intervention, Comparison, Outcome*). Kerangka PICO yang digunakan yaitu: populasi biji kopi, intervensi pemanggangan pada biji kopi, kontrol biji kopi tidak dipanggang, dan outcome total kandungan fenolik (Tawfik et al., 2019). Untuk memperkuat validitas kesimpulan, analisis variabel moderator dilakukan menggunakan metode analisis sub-kelompok dengan variabel yang meliputi tingkat roasting kopi, asal negara kopi, dan jenis varietas kopi (Arabika dan Robusta).

Penentuan Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria	Keterangan
Inklusi	1. Artikel berupa artikel penelitian 2. Artikel penelitian yang membahas tentang pengaruh pemanggangan terhadap total kandungan fenolik pada kopi memiliki nilai statistik yang cukup 3. Artikel ilmiah berasal dari jurnal internasional dan/atau nasional dengan reputasi yang baik 4. Tidak ada batasan negara 5. Tahun publikasi dibatasi 20 tahun terakhir
Eksklusi	1. Artikel <i>review</i> 2. Artikel penelitian dengan data yang tidak lengkap 3. Artikel tidak tersedia <i>full text</i> 4. Artikel penelitian berasal dari jurnal yang tidak bereputasi baik

Pencarian Sumber Ilmiah

Proses pencarian literatur dilakukan dengan memanfaatkan berbagai mesin pencari akademik meliputi Wiley Online Library, MDPI, Science Direct, Springer, ACS Publisher, PubMed, Taylor & Francis, Sage Journal, ProQuest, dan Research Gate. Kata kunci yang digunakan untuk mencari literatur relevan yaitu "*coffee*", "*roasting coffee*", "*origin of coffee*", "*total phenolic content*", dan "*degree of roasting coffee*". Pencarian literatur menggunakan boolean operator dengan kata "AND" dan "OR" untuk mempermudah pencarian. Penyusunan dan pengelolaan artikel yang telah dikumpulkan menggunakan aplikasi Mendeley, dan pemilihan akhir artikel mengikuti diagram PRISMA (*Priority Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis*).



Gambar 1 Diagram alir PRISMA

Analisis Data

Data diolah menggunakan software OpenMEE untuk menghitung *effect size* melalui analisis *Standardized Mean Difference (SMD)* dengan interval kepercayaan 95%. Penghitungan ukuran efek menggunakan metode Hedges'd dengan biji kopi yang tidak dipanggang sebagai kelompok kontrol dan biji kopi yang dipanggang sebagai kelompok eksperimen (Gurevitch et al., 2018).

Heterogenitas antar studi diukur menggunakan statistik I^2 . Heterogenitas tinggi ($I^2 > 75\%$ dan $p < 0.001$) mengindikasikan perbedaan substansial yang memerlukan analisis subgroup (Buck et al., 2022). mengidentifikasi bias publikasi, dilakukan analisis menggunakan *funnel plot* dan *Egger's test* dengan software StatsDirect 4. Hasil *Egger's test* dengan p -value $> 0,05$ mengindikasikan tidak ada bukti signifikan bias publikasi.

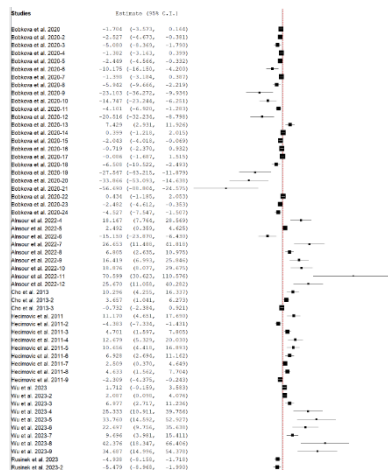
HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Sumber Studi

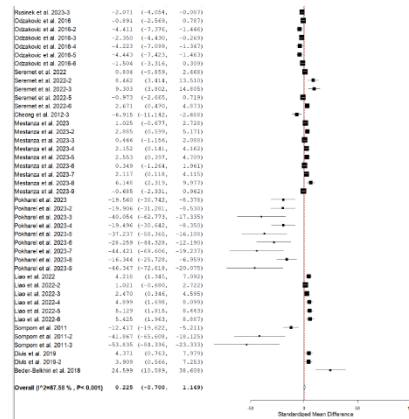
Pencarian dan penyeleksian artikel ilmiah dilakukan dengan melakukan pencarian pada sepuluh pangkalan data jurnal internasional yang menghasilkan 815 artikel. Artikel-artikel yang terkumpul kemudian diseleksi untuk menyaring duplikasi dan dipilih berdasarkan judul dan abstrak. Proses seleksi tersebut menghasilkan 84 artikel yang akan dianalisis secara menyeluruh. Selanjutnya, artikel-artikel yang telah dikaji akan disaring lagi berdasarkan relevansi dan kelengkapan data. Berdasarkan pencarian dan penyeleksian artikel ilmiah tersebut, lima belas artikel akan dilakukan meta-analisis. Artikel-artikel yang digunakan merupakan artikel-artikel yang ditulis oleh Alnsour et al. (2022), Beder-Belkhiri et al. (2018), Bobková et al. (2020), Cheong et al. (2013), Cho et al. (2014), Diviš et al. (2019), Hečimović et al. (2011), Liao et al. (2022), Mestanza et al. (2023), Odžakovic et al. (2016), Pokharel et al. (2023), Rusinek et al. (2024), Šeremet et al. (2022), Somporn et al. (2011), dan Wu et al. (2023). Artikel-artikel hasil seleksi secara menyeluruh tersebut, kemudian diekstrak dan didapatkan 99 studi yang akan dianalisis untuk menghitung *effect size*.

Analisis Overall Effect Size

Data yang telah diekstrak dan disusun dalam tabel selanjutnya akan dianalisis untuk menentukan *effect size* (nilai efek keseluruhan), dengan temuan yang disajikan dalam *forest plot*. Diagram yang disajikan dalam Gambar 4 menggambarkan interval kepercayaan (CI), p -value, dan ukuran heterogenitas studi (I^2). Gambar 4 mengilustrasikan nilai *overall effect size* mengenai dampak pemanggang kopi terhadap total kandungan fenolik pada kopi.



Gambar 2 Forest plot overall effect size



Gambar 3 Forest plot overall effect size (lanjutan)

plot overall effect size (lanjutan)

Berdasarkan data yang diperoleh, Nilai *Standardize Mean Difference* (SMD) sebesar 0,225 dengan interval kepercayaan 95% (-0,700 hingga 1,149) menunjukkan peningkatan kandungan fenolik kopi yang dipanggang dibandingkan tidak dipanggang. Namun, interval kepercayaan yang mencakup nilai 0 mengindikasikan ketidakpastian, di mana efek pemanggang bisa positif, negatif, atau netral. Nilai *p-value* <0,001 dan heterogenitas tinggi ($I^2 = 87,58\%$) menunjukkan perbedaan signifikan dan variasi besar antar studi, mengindikasikan adanya faktor-faktor lain yang mempengaruhi hasil. Oleh karena itu, analisis *subgroup* diperlukan untuk menyelidiki faktor-faktor yang mempengaruhi hubungan antara pemanggang dan kandungan fenolik kopi.

Analisis Subgroup Tingkat Pemanggang Kopi

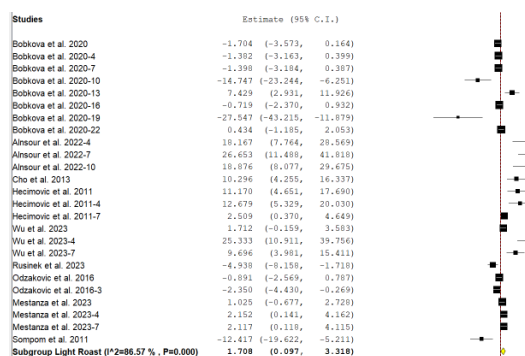
Nilai *overall* SMD sebesar 0,225 menunjukkan pemanggang kopi cenderung meningkatkan kandungan fenolik, meskipun efeknya kecil. Interval kepercayaan (-0,700; 1,149) yang lebar mengindikasikan peningkatan kandungan fenolik tidak terjadi secara konsisten (Rusinek et al., 2024 ; Kučera, et al., 2016).

Tabel 1 Analisis *subgroup* tingkat pemanggang kopi

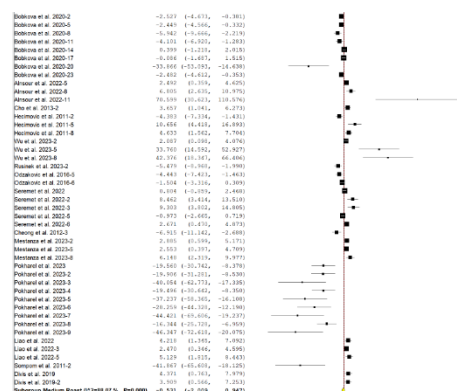
Tingkat Pemanggang Kopi	n	SMD (95% CI)	p-value
Light Roast	25	1,708 (0,097; 3,318)	0,000
Medium Roast	45	-0,531 (-2,009; 0,947)	0,000
Dark Roast	29	-0,315 (-2,125; 1,495)	0,000
Overall	99	0,225 (-0,700; 1,149)	0,000

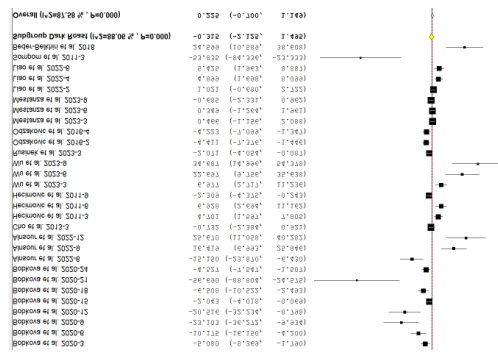
n (jumlah studi), SMD (*Standardize Mean Difference*), 95% CI (Interval kepercayaan)

(a)



(b)





(c)

Gambar 4 Forest plot analisis subgroup light roast (a), medium roast (b), dan dark roast (c)

Light roast menunjukkan nilai SMD positif sebesar 1,708, mengindikasikan peningkatan kandungan fenolik yang signifikan. Medium roast dengan nilai SMD negatif (-0,531) dan interval kepercayaan (-2,009; 0,947) menunjukkan kecenderungan penurunan kandungan fenolik dengan efek yang bervariasi. Dark roast dengan SMD -0,315 dan interval kepercayaan (-2,125; 1,495) yang mencakup nol menunjukkan pengaruh yang tidak signifikan dan tidak konsisten terhadap kandungan fenolik.

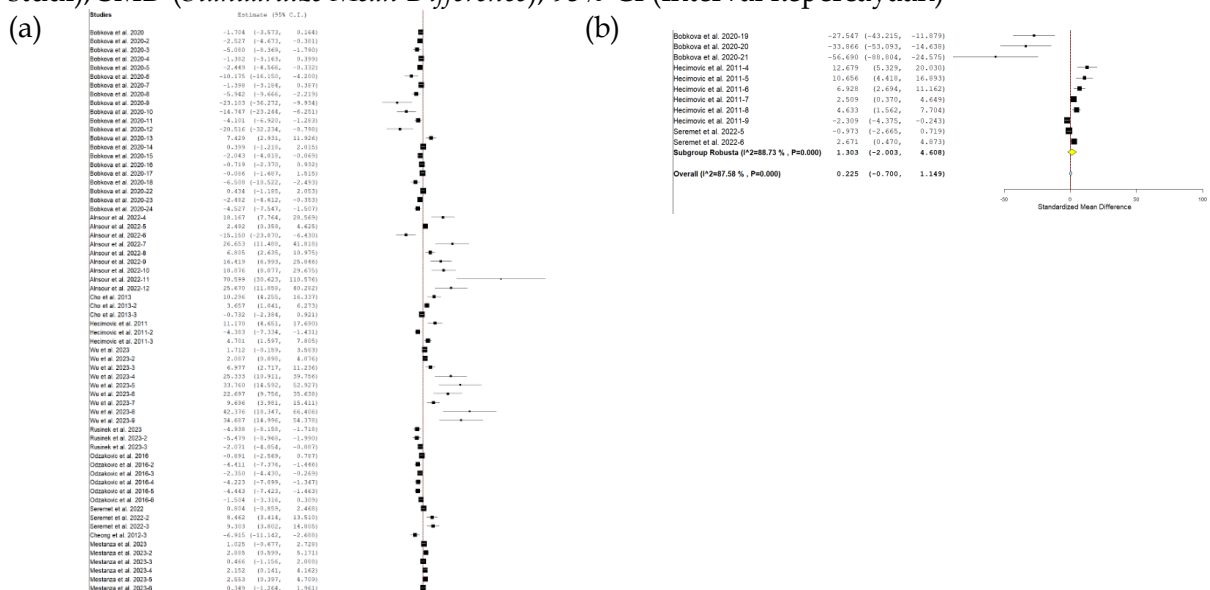
Analisis Subgroup Jenis Kopi

Arabika (*Coffea arabica*) dan Robusta (*Coffea canephora*) adalah dua spesies kopi yang dominan di pasar global, masing-masing menampilkan karakteristik sensori dan komposisi kimia yang unik (Zhang et al., 2020). Analisis subgroup variabel jenis kopi bertujuan untuk melihat pengaruh jenis kopi arabika dan robusta terhadap kandungan fenolik pada biji kopi.

Tabel 2 Analisis subgroup jenis kopi

Tingkat Pemanggangan Kopi	n	SMD (95% CI)	p-value
Arabika	88	0,060 (-0,907; 1,027)	0,000
Robusta	11	1,303 (-2,003; 4,608)	0,000
Overall	99	0,225 (-0,700; 1,149)	0,000

n (jumlah studi), SMD (Standardize Mean Difference), 95% CI (Interval kepercayaan) studi, SMD (Standardize Mean Difference), 95% CI (Interval kepercayaan)



Gambar 5 Forest plot analisis subgroup arabika (a) dan robusta (b)

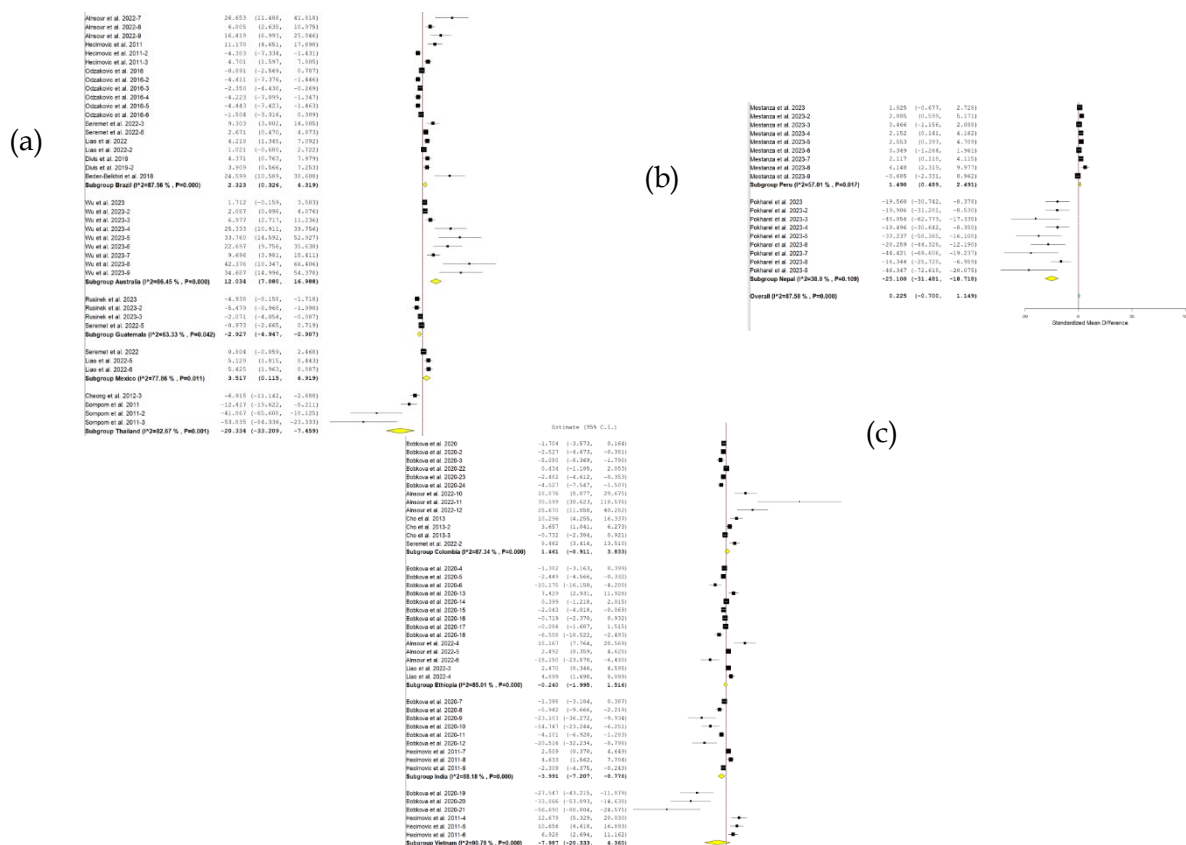
Berdasarkan tabel 4, Kopi Arabika memiliki nilai SMD sebesar 0,060 (95% CI: -0,907; 1,027), menunjukkan dampak pemangangan yang tidak signifikan terhadap kandungan fenolik dengan variasi yang besar. Kopi Robusta menunjukkan nilai SMD sebesar 1,303 (95% CI: -2,003; 4,608), mengindikasikan peningkatan kandungan fenolik namun dengan ketidakpastian tinggi.

Analisis Subgroup Asal Negara

Tabel 3 Analisis *subgroup* asal negara

Asal Negara	n	SMD (95% CI)	p-value
Kolombia	13	1,461 (-0,911; 3,833)	0,000
Ethiopia	14	-0,240 (-1,995; 1,516)	0,000
India	9	-3,991 (-7,207; 0,776)	0,000
Vietnam	6	-7,987 (-20,333; 4,360)	0,000
Brazil	19	2,323 (0,326; 4,319)	0,000
Australia	9	12,034 (7,080; 16,988)	0,000
Guatemala	4	-2,927 (-4,947; -0,907)	0,042
Meksiko	3	3,517 (0,115; 6,919)	0,011
Thailand	4	-20,334 (-33,209; -7,459)	0,001
Peru	9	1,490 (0,489; 2,491)	0,017
Nepal	9	-25,100 (-31,481; -18,718)	0,109
Overall	99	0,225 (-0,700; 1,149)	0,000

n (jumlah studi), SMD (Standardize Mean Difference), 95% CI (Interval kepercayaan)



Gambar 6 Forest plot analisis *subgroup* Kolombia, Ethiopia, India, dan Vietnam (a), Brazil, Australia, Guatemala, Meksiko, dan Thailand (b), dan Peru dan Nepal (c)

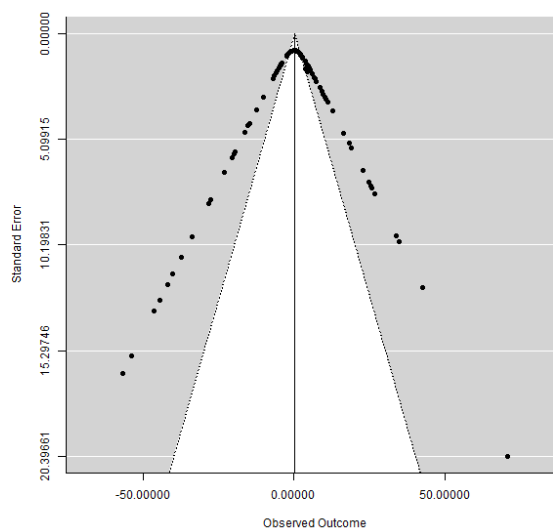
Berdasarkan tabel 5, Analisis berdasarkan asal negara mengungkap variasi geografis yang signifikan. Kopi dari Australia menunjukkan peningkatan kandungan fenolik paling dramatis (SMD = 12,034), diikuti Brazil (SMD = 2,323), Meksiko (SMD = 3,517), Peru (SMD = 1,490), dan

Kolombia (SMD = 1,461). Sebaliknya, kopi dari Nepal menunjukkan penurunan paling signifikan (SMD = -25,100), diikuti Thailand (SMD = -20,334), Vietnam (SMD = -7,987), India (SMD = -3,991), dan Guatemala (SMD = -2,927). Ethiopia menunjukkan efek minimal (SMD = -0,240). Variasi ini mencerminkan perbedaan varietas lokal, kondisi agroklimat, dan praktik budidaya yang mempengaruhi komposisi kimia awal dan stabilitas senyawa fenolik selama pemanggangan.

Analisis Bias Publikasi

Funnel plot adalah diagram yang menggambarkan hubungan antara efek intervensi (sumbu x) dan presisi studi (sumbu y) (Afonso et al., 2024). Pada penelitian ini, sumbu x merepresentasikan pengaruh pemanggangan terhadap kandungan fenolik, dengan garis nol menandakan tidak ada efek, sedangkan sumbu y menunjukkan presisi studi.

Hasil *funnel plot* menunjukkan sebaran titik studi yang relatif simetris dengan keseimbangan antara penelitian yang melaporkan efek positif (peningkatan fenolik) dan negatif (penurunan fenolik). Hal ini mengindikasikan tidak adanya bias publikasi, karena penelitian dengan temuan tidak signifikan memiliki peluang publikasi yang sama dengan penelitian signifikan. Data yang sangat dekat dengan nol menunjukkan bahwa efek gabungan dari meta-analisis ini kemungkinan besar tidak signifikan secara statistik.



Gambar 7 *Funnel plot* analisis bias publikasi

Penilaian secara visual pada *funnel plot* merupakan analisis yang subjektif dan berpotensi menyesatkan, dengan demikian perlu dilakukan uji tambahan yang lebih objektif (Afonso et al., 2024). *Egger's test* dilakukan sebagai bentuk uji kuantitatif untuk memperkuat hasil analisis *funnel plot*. Hasil *Egger's test* menggunakan *software* StatsDirect 4 dapat dilihat pada tabel 6. Berdasarkan *Egger's test* tersebut, *p-value* yang jauh di atas ambang batas signifikansi ($0.847 > 0.05$) menunjukkan hasil yang menguatkan analisis *funnel plot*, yaitu tidak ada bukti secara statistik yang signifikan untuk asimetri pada *funnel plot*.

Tabel 4 Hasil *Egger's test* untuk asimetri *funnel plot*

Koefisien	95% Confidence Interval	<i>p-value</i>
-0,100	-1,128 – 0,927	0,847

SIMPULAN

Berdasarkan hasil meta-analisis 15 artikel dan 99 studi tentang pengaruh pemanggangan kopi terhadap total kandungan fenolik. Pengaruh pemanggangan kopi secara keseluruhan terhadap total kandungan fenolik menunjukkan hasil yang tidak signifikan secara statistik dengan tingkat heterogenitas tinggi ($I^2=87,58\%$) yang menunjukkan bahwa terdapat faktor-faktor

lain yang secara signifikan dapat mempengaruhi variabel tersebut, sehingga perlu dilakukan analisis subgroup. Analisis subgroup dilakukan dengan membagi menjadi tiga bagian, tingkat pemanggangan, jenis kopi, dan asal negara. Berdasarkan analisis subgroup tersebut, ditemukan bahwa pada pemanggangan *light roast* secara signifikan meningkatkan total kandungan fenolik pada biji kopi. Sebaliknya, *medium roast* dan *dark roast* tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan dan konsisten secara statistik. Pada kopi jenis Arabika, pemanggangan tidak memberikan dampak yang signifikan secara statistik terhadap kandungan fenoliknya, sementara pada kopi Robusta, terdapat kecenderungan peningkatan fenolik meskipun hasilnya tidak dapat disimpulkan secara pasti karena variasi yang besar. Sementara itu, kopi dari Australia, Brazil, dan Meksiko menunjukkan peningkatan fenolik yang signifikan, sedangkan kopi dari Nepal, Thailand, dan Guatemala mengalami penurunan yang signifikan. Hasil ini diperkuat oleh tidak adanya bukti bias publikasi yang signifikan dalam analisis, berdasarkan analisis *funnel plot* yang relatif simetris dan hasil *Egger's test* yang mengonfirmasi hasil analisis *funnel plot* ($p\text{-value} > 0,05$).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pembimbing atas bimbingan dan dukungan dalam melakukan penelitian ini. Terima kasih juga disampaikan kepada rekan-rekan seperjuangan atas dukungan dan diskusi yang bermanfaat. Akhir kata, penulis berharap penelitian ini dapat menjadi referensi yang bermanfaat dan mendorong adanya penelitian lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- Afonso, J., Ramirez-Campillo, R., Clemente, F. M., Büttner, F. C., & Andrade, R. (2024). The perils of misinterpreting and misusing 'publication bias' in meta-analyses: An education review on funnel plot-based methods. *Sports Medicine*, 54(2), 257–269. <https://doi.org/10.1007/s40279-023-01927-9>
- Alnsour, L., Issa, R., Awwad, S., Albals, D., & Al-Momani, I. (2022). Quantification of total phenols and antioxidants in coffee samples of different origins and evaluation of the effect of degree of roasting on their levels. *Molecules*, 27(5). <https://doi.org/10.3390/molecules27051591>
- Beder-Belkhir, W., Zeghichi-Hamri, S., Kadri, N., Boulekbache-Makhlouf, L., Cardoso, S., Oukhmanou-Bensidhoum, S., & Madani, K. (2018). Hydroxycinnamic acids profiling, in vitro evaluation of total phenolic compounds, caffeine and antioxidant properties of coffee imported, roasted and consumed in Algeria. *Mediterranean Journal of Nutrition and Metabolism*, 11(1), 51–63. <https://doi.org/10.3233/MNM-17181>
- Bobková, A., Hudáček, M., Jakabová, S., Belej, L., Capcarová, M., Čurlej, J., Bobko, M., Árvay, J., Jakab, I., Čapla, J., et al. (2020). The effect of roasting on the total polyphenols and antioxidant activity of coffee. *Journal of Environmental Science and Health, Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 55(5), 495–500. <https://doi.org/10.1080/03601234.2020.1724660>
- Buck, R. J., Fieberg, J., & Larkin, D. J. (2022). The use of weighted averages of Hedges' d in meta-analysis: Is it worth it? *Methods in Ecology and Evolution*, 13(5), 1093–1105. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13818>
- Cheong, M. W., Tong, K. H., Ong, J. J. M., Liu, S. Q., Curran, P., & Yu, B. (2013). Volatile composition and antioxidant capacity of Arabica coffee. *Food Research International*, 51(1), 388–396. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.12.058>
- Cho, A. R., Park, K. W., Kim, K. M., Kim, S. Y., & Han, J. (2014). Influence of roasting conditions on the antioxidant characteristics of Colombian coffee (*Coffea arabica* L.) beans. *Journal of Food Biochemistry*, 38(3), 271–280. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12045>
- Diviš, P., Pořízka, J., & Kříkala, J. (2019). The effect of coffee beans roasting on its chemical composition. *Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 13(1), 344–350. <https://doi.org/10.5219/1062>

- Gurevitch, J., Koricheva, J., Nakagawa, S., & Stewart, G. (2018). Meta-analysis and the science of research synthesis. *Nature*, 555(7695), 175–182. <https://doi.org/10.1038/nature25753>
- International Coffee Organization. (n.d.). *Coffee report and outlook*. <https://www.ico.org/>
- Kučera, L., Papoušek, R., Kurka, O., Barták, P., & Bednář, P. (2016). Study of composition of espresso coffee prepared from various roast degrees of *Coffea arabica* L. coffee beans. *Food Chemistry*, 199, 727–735. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.080>
- Masek, A., Latos-Brozio, M., Kałużna-Czaplińska, J., Rosiak, A., & Chrzescijanska, E. (2020). Antioxidant properties of green coffee extract. *Forests*, 11(5), 557. <https://doi.org/10.3390/f11050557>
- Pokharel, S., Pandey, G. R., Shrestha, A., Shrestha, R., Tiwari, D., Khanal, B. C., & Silwal, S. (2023). Molecular identification and antioxidant activity determination among coffee varieties cultivated in Nepal. *The Scientific World Journal*, 2023(1), 7744647. <https://doi.org/10.1155/2023/7744647>
- Rusinek, R., Dobrzański, B., Gawrysiak-Witulska, M., Siger, A., Żytek, A., Karami, H., Umar, A., Lipa, T., & Gancarz, M. (2024). Effect of the roasting level on the content of bioactive and aromatic compounds in Arabica coffee beans. *International Agrophysics*, 38(1), 31–42. <https://doi.org/10.31545/INTAGR/176300>
- Šeremet, D., Fabečić, P., Vojvodić Cebin, A., Mandura Jarić, A., Pudić, R., & Komes, D. (2022). Antioxidant and sensory assessment of innovative coffee blends of reduced caffeine content. *Molecules*, 27(2). <https://doi.org/10.3390/molecules27020448>
- Somporn, C., Kamtuo, A., Theerakulpisut, P., & Siriamornpun, S. (2011). Effects of roasting degree on radical scavenging activity, phenolics and volatile compounds of Arabica coffee beans (*Coffea arabica* L. cv. Catimor). *International Journal of Food Science and Technology*, 46(11), 2287–2296. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02748.x>
- Tawfik, G. M., Dila, K. A., Mohamed, M. Y. F., Tam, D. N. H., Kien, N. D., Huy, N. T., ... & Hien, T. T. (2019). A step by step guide for conducting a systematic review and meta-analysis with simulation data. *Tropical Medicine and Health*, 47(1), 46. <https://doi.org/10.1186/s41182-019-0165-6>
- Wu, H., Barrow, C., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. R. (2023). Phenolic bioaccessibility, antioxidant, and antidiabetic effects of indigenous fermented coffee beans after simulated gastrointestinal digestion and colonic fermentation. *Food Bioscience*, 54, 102920. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102920>
- Zhang, D., Vega, F. E., Infante, F., Solano, W., Johnson, E. S., & Meinhardt, L. W. (2020). Accurate differentiation of green beans of Arabica and Robusta coffee using nanofluidic array of single nucleotide polymorphism (SNP) markers. *Journal of AOAC International*, 103(2), 315–324. <https://doi.org/10.1093/jaoacint/qsq002>