

maupun penanda kimia dominan dari jahe merah. Keduanya hadir dalam jumlah yang lebih kecil dibandingkan gingerol atau zingiberene. Meskipun demikian, kedua senyawa ini memiliki karakteristik struktur dan bioaktivitas yang sangat menarik sehingga potensinya layak untuk dieksplorasi lebih jauh. Zingerone dan β -sesquiphellandrene menunjukkan spektrum aktivitas biologis yang luas dan peluang aplikatif yang besar, baik sebagai kandidat bahan aktif farmasi, komponen pangan fungsional, maupun bahan baku industri kosmetik dan parfum. Oleh karena itu, optimalisasi metode ekstraksi untuk meningkatkan perolehan kedua senyawa ini menjadi langkah strategis dalam pengembangan nilai tambah jahe merah.

Zingerone merupakan senyawa fenolik yang terbentuk terutama dari degradasi gingerol selama proses pemanasan atau pengeringan. Inilah sebabnya zingerone lebih banyak ditemukan pada jahe kering dibandingkan jahe segar. Secara sensorik, zingerone memberikan aroma pedas manis yang lembut serta sensasi hangat yang khas, menjadikannya komponen penting dalam penentuan karakter rasa produk berbasis jahe. Lebih dari sekadar pembentuk aroma, zingerone memiliki aktivitas farmakologis yang menjanjikan. Senyawa ini terbukti mampu menurunkan kadar urea, albumin, dan kreatinin dalam darah, sehingga berpotensi sebagai agen terapeutik pada gangguan fungsi ginjal atau nefropati (9). Zingerone juga berperan dalam mengatur arus ion pada membran plasma, membantu menjaga homeostasis sel dan memfasilitasi komunikasi intraseluler maupun antarsel (10). Aktivitas antioksidan dan antiinflamasi zingerone juga telah banyak dilaporkan, di samping kemampuannya dalam menginduksi apoptosis pada sel kanker serta melindungi tubuh dari paparan radiasi, toksin kimia, dan agen biologis berbahaya (11).

Sementara itu, β -sesquiphellandrene merupakan senyawa seskuiterpena yang dominan dalam fraksi minyak atsiri jahe merah. Senyawa ini memberikan aroma segar khas jahe segar yang sangat dihargai dalam industri parfum dan kosmetik. Secara biologis, β -sesquiphellandrene menunjukkan aktivitas antiproliferatif yang mampu memicu proses apoptosis pada berbagai jenis sel kanker (12). Selain itu, senyawa ini memiliki aktivitas antibakteri yang kuat terhadap patogen seperti *Salmonella enterica* dan *Staphylococcus aureus*, dengan mekanisme kerja berupa penghambatan proses replikasi dan transkripsi bakteri (13). Aktivitas antijamur dan antibakteri β -sesquiphellandrene juga dilaporkan pada berbagai ekstrak tanaman lain, memperkuat posisinya sebagai kandidat senyawa bioaktif alami yang potensial (14).

Meskipun jahe merah kaya akan senyawa bioaktif, tantangan utama dalam pemanfaatannya terletak pada metode ekstraksi. Metode konvensional seperti maserasi, sokletasi, dan destilasi uap telah digunakan secara luas, namun metode-metode ini sering kali membutuhkan waktu lama, konsumsi pelarut dalam jumlah besar, serta berpotensi menyebabkan degradasi senyawa termolabil akibat pemanasan berkepanjangan. Selain itu, selektivitas metode konvensional relatif rendah, sehingga banyak senyawa non-target ikut terekstraksi dan menurunkan kemurnian fraksi yang diinginkan. Dalam konteks industri modern dan prinsip green chemistry, pendekatan ekstraksi semacam ini dinilai kurang efisien dan kurang berkelanjutan (16).

Microwave-Assisted Extraction (MAE) muncul sebagai solusi inovatif yang menjawab tantangan tersebut. Teknologi ini memanfaatkan energi gelombang mikro untuk memanaskan pelarut dan matriks sampel secara langsung melalui interaksi dipol molekul dengan medan elektromagnetik.

Pemanasan volumetrik yang dihasilkan memungkinkan transfer energi berlangsung cepat dan merata, sehingga meningkatkan efisiensi pelepasan senyawa bioaktif dari jaringan tanaman (17). Tekanan internal yang meningkat akibat pemanasan cepat menyebabkan dinding sel tanaman pecah, mempermudah difusi senyawa target ke dalam pelarut. Proses ini secara signifikan mempercepat laju ekstraksi dan meningkatkan hasil perolehan senyawa bioaktif (18).

Keunggulan MAE tidak hanya terletak pada kecepatan proses, tetapi juga pada efisiensi penggunaan pelarut dan energi. Dibandingkan metode konvensional, MAE mampu menurunkan volume pelarut yang dibutuhkan secara drastis, sehingga lebih ramah lingkungan dan sejalan dengan prinsip green chemistry (19). Selain itu, waktu ekstraksi yang singkat meminimalkan degradasi termal, menjadikan MAE sangat cocok untuk mengekstraksi senyawa sensitif panas seperti zingerone dan β -sesquiphellandrene. Selektivitas MAE yang lebih baik juga memungkinkan peningkatan konsentrasi senyawa target dalam ekstrak akhir.

Namun, efektivitas MAE sangat dipengaruhi oleh berbagai parameter proses, seperti ukuran partikel bahan, waktu ekstraksi, dan daya microwave. Ketiga parameter ini saling berinteraksi secara kompleks, sehingga perubahan kecil pada salah satu variabel dapat berdampak signifikan terhadap hasil ekstraksi. Oleh karena itu, pendekatan optimasi yang sistematis dan berbasis statistik menjadi sangat penting. Response Surface Methodology (RSM) merupakan metode statistik yang dirancang untuk memodelkan dan menganalisis hubungan antara beberapa variabel independen terhadap satu atau lebih respons. Melalui RSM, pengaruh masing-masing parameter serta interaksi antarvariabel dapat dievaluasi secara simultan, sehingga kondisi optimum dapat ditentukan secara efisien dengan jumlah percobaan yang minimal (21–24).

Kombinasi RSM desain eksperimental Face-Centered Central Composite Design (FCCCD). FCCCD memungkinkan eksplorasi ruang variabel dalam rentang yang realistis dan aplikatif, sekaligus menghindari kondisi ekstrem yang berpotensi merusak senyawa target atau tidak relevan secara praktis (25, 26). Integrasi FCCCD dalam RSM memberikan keuntungan berupa efisiensi eksperimen, akurasi prediksi, serta kemampuan untuk memaksimalkan hasil perolehan senyawa target sekaligus meminimalkan ko-ekstraksi senyawa non-target (27-29).

Dengan mengintegrasikan MAE dan RSM berbasis FCCCD ekstraksi zingerone dan β -sesquiphellandrene dari jahe merah dapat dioptimalkan. Tiga variabel utama yang dapat dioptimasi, yaitu ukuran partikel, waktu ekstraksi, dan daya microwave. Ketiganya dievaluasi secara sistematis untuk memahami pengaruh individual maupun interaksinya terhadap perolehan kedua senyawa. Hasilnya menunjukkan bahwa ukuran partikel halus, waktu ekstraksi yang lebih lama, dan daya microwave tinggi secara signifikan meningkatkan perolehan zingerone. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui peningkatan luas permukaan kontak dan intensitas pemanasan, yang mempercepat pelepasan senyawa fenolik dari matriks tanaman.

Sebaliknya, β -sesquiphellandrene menunjukkan karakteristik yang berbeda. Senyawa ini mencapai perolehan optimal pada kondisi ekstraksi sedang, baik dari segi waktu maupun daya microwave. Pemanasan berlebih justru berpotensi menyebabkan degradasi atau penguapan

senyawa seskuiterpena yang relatif volatil. Temuan ini menegaskan bahwa setiap senyawa memiliki karakteristik fisikokimia unik, sehingga strategi ekstraksi yang diterapkan harus disesuaikan dengan sifat molekul target. Di sinilah keunggulan RSM menjadi sangat nyata, karena mampu memetakan kondisi optimum yang berbeda bagi setiap respons secara simultan. Analisis statistik mengonfirmasi bahwa seluruh parameter ekstraksi memberikan pengaruh signifikan terhadap hasil, sekaligus memperlihatkan adanya interaksi kompleks di antara ketiganya. Pendekatan ini memungkinkan penentuan kondisi ekstraksi yang tidak hanya menghasilkan perolehan maksimal, tetapi juga efisien secara energi, waktu, dan pelarut. Dengan demikian, kombinasi MAE dan RSM berbasis FCCCD tidak hanya meningkatkan efisiensi proses, tetapi juga memberikan landasan ilmiah yang kuat bagi pengembangan teknologi ekstraksi berkelanjutan.

Dari sudut pandang industri, temuan ini memiliki implikasi strategis. Optimalisasi ekstraksi zingerone dan β -sesquiphellandrene membuka peluang untuk menghasilkan ekstrak jahe merah dengan nilai tambah tinggi dan kualitas terstandar. Industri farmasi dapat memanfaatkan ekstrak ini sebagai sumber bahan aktif alami, sementara industri pangan fungsional dan kosmetik dapat menggunakannya sebagai komponen utama produk berbasis bahan alam. Di sisi lain, efisiensi energi dan minimnya penggunaan pelarut menjadikan proses ini lebih ramah lingkungan dan ekonomis, sejalan dengan tuntutan industri modern yang berorientasi pada keberlanjutan.

Lebih jauh lagi, pendekatan optimasi berbasis statistik dan teknologi gelombang mikro ini dapat diadaptasi untuk berbagai tanaman obat Indonesia lainnya. Dengan kekayaan biodiversitas yang dimiliki, Indonesia memiliki potensi besar untuk mengembangkan industri bahan baku farmasi dan kosmetik berbasis sumber daya lokal. Integrasi sains modern dengan kearifan lokal dalam pemanfaatan tanaman obat dapat menjadi fondasi kuat bagi kemandirian industri nasional.

Ke depan, pengembangan teknologi ekstraksi diperkirakan akan semakin mengarah pada sistem cerdas berbasis kecerdasan buatan, pemodelan molekuler, dan kendali proses real-time. Proses ekstraksi tidak lagi dipandang sebagai operasi fisik semata, melainkan sebagai sistem adaptif yang mampu menyesuaikan parameter secara dinamis untuk mencapai hasil optimal. Dalam konteks ini, penelitian tentang optimasi ekstraksi zingerone dan β -sesquiphellandrene dari jahe merah menjadi salah satu langkah awal menuju era ekstraksi cerdas dan berkelanjutan.

Pada akhirnya, jahe merah tidak lagi sekadar rempah tradisional, melainkan komoditas strategis bernilai tinggi. Melalui pendekatan ilmiah yang tepat, potensi molekuler jahe merah dapat diungkap dan dimanfaatkan secara maksimal. Integrasi teknologi Microwave-Assisted Extraction dengan Response Surface Methodology berbasis Face-Centered Central Composite Design membuktikan bahwa sains modern mampu mengangkat warisan lokal menjadi produk unggulan berdaya saing global, sekaligus menjawab tantangan efisiensi, kualitas, dan keberlanjutan di era industri hijau.

Referensi:

- [1] C. F. Yanti, A. N. Usman, M. Ahmad, I. Ilhamudin, A. Ariyandi, B. Budiaman. *BIO Web Conf.*, 96 (2024)
- [2] S. Zhang, X. Kou, H. Zhao, K. K. Mak, M. K. Balijepalli, M. R. Pichika. *Molecules*, 27, 775. (2022)
- [3] J. Wang, Y. M. Liu, J. Hu, C. Chen. *Biomed. Pharmacother.*, 162 (2023).
- [4] D. Wang, V. Hiebl, T. Xu, A. Ladurner, A. G. Atanasov, E. H. Heiss, V. M. Dirsch. *J. Ethnopharmacol.*, 249 (2020).
- [5] K. S. Alharbi, O. Afzal, W. H. Almalki, I. Kazmi, M. A. J. Shaikh, L. Thangavelu, M. Gulati, S. K. Singh, N. K. Jha, P. K. Gupta, D. K. Chellappan, B. G. Oliver, K. Dua, G. Gupta. *Chem.-Biol. Interact.*, 354 (2022)
- [6] G. Brahmachari In *Natural Product Drug Discovery*, 283–295. (2019).
- [7] A. A. Alfuraydi, I. M. Aziz, F. N. Almajhdi *J. King Saud Univ. - Sci.*, 36, 103112. (2024).
- [8] A. Diakos, M. L. Silva, J. Brito, M. Moncada, M. F. De Mesquita, M. A. Bernardo *Foods*, 12, 5 (2022).
- [9] S. Habtemariam *Medicinal Foods as Potential Therapies for Type-2 Diabetes and Associated Diseases*, 639–687 (2019)
- [10] C. G. Garza-Cadena, D. M. Ortega-Rivera, G. Machorro-García, E. M. Gonzalez-Zermeno, D. Homma-Duenas, M. Plata-Gryl, R. Castro-Munoz *Food Chem.*, 413, (2023)
- [11] S. Shamsabadi, Y. Nazer, J. Ghasemi, E. Mahzoon, V. B. Rahimi, B. O. Ajiboye, V. R. Askari *Toxicol.*, 233 (2023)
- [12] K. Calvopina, O. Malagon, F. Capetti, B. Sgorbini, V. Verdugo, G. Gilardoni *Plants*, 10, 10 (2021)
- [13] S. Akermi, S. Smaoui, M. Fourati, K. Elhadef, M. Chaari, A. Chakchouk-Mtibaa, L. Mellouli *Biomed. Res. Int.*, 2 (2022)
- [14] L. Pasayeva, H. Karadeli, D. Ulukus, H. Fatullayev, O. Tugay *J. Essent. Oil Bear. Plants*, 26,4 (2023)
- [15] T. Pheko-Ofitlhile, A. Makhzoum *J. Essent. Oil Res.*, 36, 2 (2024).
- [16] F. M. Hammouda, M. A. Saleh, N. S. Abdel-Azim, K. A. Shams, S. I. Ismail, A. A. Shahat, I. A. Saleh *Afr. J. Tradit. Complement. Altern. Med.*, 11, 2 (2014).
- [17] F. Alchera, M. Ginepro, G. Giacalone *LWT*, 192, (2024)
- [18] X. Xiao, W. Song, J. Wang, G. Li *Anal. Chim. Acta*, 712 (2012).
- [19] A. V. B. Reddy, M. Moniruzzaman, V. Madhavi, J. Jaafar In *Studies in Natural Products Chemistry*, 66, (2020)
- [20] Q. Zhang, J. Yu, Y. Wang, W. Su *Molecules*, 21, 8 (2016)
- [21] K. A. M. Said, M. A. M. Amin *J. Appl. Sci. Process Eng.*, 2, 1 (2015)
- [22] Y. Peng, U. Khaled, A. A. A. Al-Rashed, R. Meer, M. Goodarzi, M. M. Sarafraz *Phys. A*, 554, (2020)
- [23] M. A. Bezerra, R. E. Santelli, E. P. Oliveira, L. S. Villar, L. A. Escaleira *Talanta*, 76, 5 (2008)
- [24] M. Manzoor, U. R. Kamboh, S. Gulshan, S. Tomforde, I. Gul, A. Siddiqui, M. Arshad *Sustainability*, 15, 14 (2023)
- [25] N. Messadi, M. Mechmeche, K. Setti *Sugar Tech.*, 25 (2023)

- [26] S. S. Hassan, A. S. El-Shafie, N. Zaher, M. El-Azazy *Molecules*, 25 16 (2020)
- [27] N. E. El-Naggar, S. R. Dalal, A. M. Zweil, M. Eltarahony *Sci. Rep.*, 13, 1 (2023).
- [28] F. A. Riyadi, M. Z. Alam, M. N. Salleh, H. M. Salleh *3 Biotech.*, 5, 300. (2017).
- [29] N. E. El-Naggar, S. R. Dalal, A. M. Zweil, M. Eltarahony *Sci. Rep.*, 13, 1 (2023)
- [30] Reyes, X. Minitab 19.1 (19.1.1.0) Ontecnia Media Networks S.L. (2019)
- [31] S. Nurjanah, S. Rosalinda, D. P. Andina *J. Teknik Pertanian Lampung*, 13, 2 (2024)
- [32] A. S. Nasori, B. Wiguna, A. Sulaswaty, P. Atmaji, E. Mardliyati, W. Purwanto, I. B. Susetyo, J. Kahfi, D. Rachman, R.G. Sativa, Muhamaludin, A. Mufti, D. Ni'Maturohmah, A. Bachtiar, S. Harini. *IOP Conf. Ser. Earth Env. Sci.* 1116 (2022)
- [33] F. M. Said, J. Y. Gan, J. Sulaiman *Eng. Sci. Technol.*, 23, 4 (2020)
- [34] A. P. Cacique, E. S. Barbosa, G. P. Pinho, F. O. Silve *rio Cie nc. Agrotecnol.*, 44 (2020)
- [35] M. A. Ashraf, W. Peng, Y. Zare *Nanoscale Res. Lett.*, 13 (2018)
- [36] M. B. Soquetta, L. M. Terra, C. P. Bastos *CyTA J. Food*, 16 (2018)
- [37] D. Y. Hoo, Z. L. Low, D. Y. S. Low, S. Y. Tang, S. Manickam, K. W. Tan, Z. H. Ban *Ultrason. Sonochem.*, 90 (2022)
- [38] M. M. A. N. Ranjha, S. Irfan, J. M. Lorenzo, B. Shafique, R. Kanwal, M. Pateiro, R. N. Arshad, L. Wang, G. A. Nayik, U. Roobab, R. M. Aadil. *Processes*, 9, 8 (2021)
- [39] T. Varghese, A. Pare. *J. Food Eng.*, 262 (2019)
- [40] Y. O. Alifaki, O. Şakiyan, A. Isci. *J. Food Meas. Charact.*, 16, 5 (2022)
- [41] M. Fahrurrozi, S. K. Wirawan *J. Appl. Biomater. Funct. Mater.*, 17, 1–8 (2019)
- [42] S. Sida, P. Wanachantararak *Sci. Rep.*, 11, 1 (2021)
- [43] G. J. Manuhara, G. P. Mentari, L. U. Khasanah, R. Utami. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 333 (2018)
- [44] J. Zago rska, L. Czernicka-Bos , W. Kukula-Koch, R. Szalak, W. Koch. *Foods*, 11, 21 (2022)
- [45] B. Ahmad, M. U. Rehman, I. Amin, A. Arif, S. Rasool, S. A. Bhat, I. Afzal, I. Hussain, S. Bilal, M. Mu *Sci. World J.*, 2015 (2015).
- [46] A. B. D. Nandiyanto *J. Eng. Sci. Technol.*, 15, 5 (2020).
- [47] S. Ok, W. S. Jeong *Prev. Nutr. Food Sci.*, 17, 2 (2012).
- [48] A. Spyrou, M. G. F. Batista, M. L. Corazza, M. Papadaki, M. Antonopoulou *Molecules*, 29, 4 (2024).
- [49] M. Z. Rizano, T. Nugraha, V. Narita *Liaison J. Eng.*, 2, 1–10. (2022).
- [50] A. Ghasemzadeh, H. Z. Jaafar, A. Rahmat *BMC Complement. Altern. Med.*, 15, 258. (2015).
- [51] L. Shen, S. Pang, M. Zhong, Y. Sun, A. Qayum, Y. Liu, A. Rashid, B. Xu, Q. Liang, H. Ma, X. Ren *Ultrason. Sonochem.*, 101 (2023).
- [52] T. Rinandaa, R. P. Isnandaa, Zulfitri *Nat. Prod. Commun.*, 13, 12 (2018).
- [53] I. Batubara, B. Badrunanto, W. T. Wahyuni, M. Farid *Int. J. Adv. Sci. Eng. Technol.*, 13, 2 (2023).