



# SIFAT FISIK, AKTIVITAS ANTIOKSIDAN, DAN PROFIL METABOLOM SERBUK JAHE MERAH (*Zingiber officinale* var. *rubrum*) PADA BERBAGAI UKURAN PARTIKEL

SITI AMINAH



PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU PANGAN  
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI  
INSTITUT PERTANIAN BOGOR  
BOGOR  
2026



## @Hak cipta milik IPB University

### Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

## PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Saya menyatakan dengan ini bahwa disertasi dengan judul “Sifat Fisik, Aktivitas Antioksidan, dan Profil Metabolom Serbuk Jahe Merah (*Zingiber officinale* var. *rubrum*) pada Berbagai Ukuran Partikel” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

Saya dengan ini melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Juli 2026

Siti Aminah  
F2601211006



## @Hak cipta milik IPB University

### Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

## RINGKASAN

SITI AMINAH. Sifat Fisik, Aktivitas Antioksidan, dan Profil Metabolom Serbuk Jahe Merah (*Zingiber officinale* var. *rubrum*) pada Berbagai Ukuran Partikel. Dibimbing oleh PURWIYATNO HARIYADI, NANCY DEWI YULIANA, EKO HARI PURNOMO dan ETIK MARDLIYATI.

Jahe merah (*Zingiber officinale* var. *rubrum*) merupakan rempah yang kaya senyawa bioaktif dan dilaporkan memiliki berbagai bioaktivitas. Hal ini menjadikan jahe merah lebih unggul dibandingkan jenis jahe lainnya seperti jahe gajah dan jahe emprit. Pengolahan menjadi serbuk banyak diaplikasikan karena mampu memperpanjang umur simpan dan memudahkan penanganan. Pengecilan ukuran partikel hingga skala nanometer berpotensi memperluas permukaan dan meningkatkan pelepasan senyawa bioaktif sehingga dapat mengubah profil metabolom dan aktivitas antioksidan. Namun, kajian pada rentang ukuran ini masih terbatas. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh ukuran partikel pada skala milimeter hingga nanometer terhadap sifat fisik serbuk jahe merah meliputi distribusi ukuran partikel, morfologi, kemampuan alir, kadar air, kelarutan dalam air, dan warna. Profil sidik jari inframerah berbasis *attenuated total reflectance–fourier transform infrared spectroscopy* (ATR-FTIR), profil metabolom nonvolatil ekstrak metanol jahe merah berbasis *liquid chromatography–high resolution mass spectrometry* (LC-HRMS) dan profil metabolom volatil serbuk jahe merah berbasis *solid phase microextraction–gas chromatography–mass spectrometry* (SPME-GC-MS) dikaji dalam penelitian ini. Senyawa volatil dan gugus fungsi penanda aktivitas antioksidan dengan metode *2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl* (DPPH) diidentifikasi dengan analisis multivariat.

Serbuk disiapkan pada sembilan tingkat ukuran partikel (D50 2256; 2066; 636; 580; 47,38; 40,37; 39,98; 34,82; dan 0,22  $\mu\text{m}$ ) melalui kombinasi metode penggilingan *blender*, *dry food grinder* (DFG), dan *planetary ball mill* (PBM). Penelitian dilakukan dalam tiga tahap, yaitu karakterisasi sifat fisik serbuk, karakterisasi profil sidik jari inframerah menggunakan ATR-FTIR dan profil senyawa nonvolatil menggunakan LC-HRMS serta karakterisasi profil senyawa volatil dengan metode SPME-GC-MS. Hasil analisis ATR-FTIR dan SPME-GC-MS selanjutnya dipadukan dengan analisis multivariat meliputi *principal component analysis* (PCA), *orthogonal partial least squares-discriminant analysis* (OPLS-DA), dan *orthogonal partial least squares* (OPLS).

Ukuran partikel serbuk jahe merah pada skala milimeter hingga nanometer (D50 2256–0,22  $\mu\text{m}$ ) memberikan pengaruh yang berbeda pada tiap rentang ukuran. Pada rentang D50 2256–34,82  $\mu\text{m}$ , terjadi peningkatan kerapatan curah (0,32–0,35  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) dan kerapatan mampat (0,36–0,56  $\text{g}/\text{cm}^3$ ), disertai peningkatan rasio Hausner, indeks kompresibilitas, dan sudut curah yang mengindikasikan penurunan kemampuan alir. Kelarutan meningkat dari 19,64–31,65%, dan kecerahan  $L^*$  meningkat dari 27,9–55,4. Hal ini berkaitan dengan bertambahnya luas permukaan spesifik dan mekanisme hamburan cahaya difus. Pada skala nano (D50 0,22  $\mu\text{m}$ ), teramati pola yang khas, yaitu rasio Hausner, indeks kompresibilitas, dan sudut curah menurun kembali (1,54; 34,95%; 37,07°) disertai penurunan kadar air menjadi 10,81%. Citra SEM menunjukkan morfologi yang mengindikasikan

terjadinya aglomerasi yang diduga dapat dikategorikan menjadi dua jenis aglomerat, yaitu *soft agglomerate* akibat gaya van der Waals dan *hard agglomerate*.

*Yield* ekstraksi meningkat dari 3,36% pada D50 2256  $\mu\text{m}$  menjadi 10,31% pada D50 0,22  $\mu\text{m}$ . Aktivitas antioksidan dalam penelitian ini dianalisis dengan metode DPPH. Hasilnya menunjukkan dua pola berbeda. Jika dinyatakan per gram ekstrak aktivitas antioksidan tidak meningkat secara linier seiring pengecilan ukuran partikel. Nilai tertinggi teramati pada serbuk kasar (D50 2256–580  $\mu\text{m}$ ) sebesar 17,20–18,10 mg TE/g, menurun pada skala mikro (D50 40,37–34,82  $\mu\text{m}$ ) menjadi 14,47–14,67 mg TE/g, dan sedikit naik kembali pada skala nano (D50 0,22  $\mu\text{m}$ ) menjadi 15,88 mg TE/g. Sebaliknya, jika dinyatakan per gram serbuk, nilai tersebut meningkat signifikan dari 0,61 mg TE/g pada D50 2256  $\mu\text{m}$  menjadi 1,64 mg TE/g pada D50 0,22  $\mu\text{m}$ . Pola ini mengindikasikan bahwa penggilingan intensif meningkatkan *yield* ekstraksi, tetapi turut mengekstrak senyawa nontarget sehingga konsentrasi senyawa aktif per gram ekstrak menurun, meskipun per gram serbuk tetap meningkat. Analisis ATR-FTIR yang dikombinasikan dengan PCA dan OPLS-DA mengelompokkan ekstrak menjadi dua kelompok, yaitu ekstrak dari serbuk berukuran kasar (D50  $\geq$  580  $\mu\text{m}$ ) dan ekstrak dari serbuk berukuran halus - nano (D50  $\leq$  47,38  $\mu\text{m}$ ). Model OPLS mengidentifikasi tujuh bilangan gelombang yang berkorelasi positif dan berpotensi menjadi penanda aktivitas antioksidan ekstrak, yaitu 3750,6; 1715,44; 1514,59; 1457,2; 1268,65; 1151,82; dan 1121,08  $\text{cm}^{-1}$ . Bilangan-bilangan gelombang tersebut mencirikan vibrasi ulur O-H, vibrasi ulur C=O, vibrasi ulur C=C pada cincin fenil, vibrasi tekuk asimetris C-CH<sub>3</sub>, asimetris C-O-C, vibrasi ulur C-O. Pita-pita tersebut merepresentasikan gugus fungsi yang umum dijumpai pada senyawa fenolik, termasuk kandidat struktur keton fenolik. LC-HRMS mengidentifikasi sementara 65 metabolit yang didominasi oleh 24 senyawa fenolik.

Analisis SPME-GC-MS mengidentifikasi sementara 150 senyawa volatil yang dikelompokkan ke dalam sembilan kelas, dengan dominasi golongan terpen (79,50–94,57%). Seiring pengecilan ukuran partikel, kontribusi area relatif monoterpen terhadap keseluruhan profil volatil menurun dari 26,31% pada serbuk kasar (D50 2256  $\mu\text{m}$ ) menjadi 4,52% pada serbuk nano (D50 0,22  $\mu\text{m}$ ), disertai peningkatan relatif kontribusi monoterpenoid, aldehida, dan keton. Analisis PCA dan OPLS-DA menghasilkan tiga kelompok, yaitu kelompok serbuk jahe merah berukuran kasar (D50 2256  $\mu\text{m}$ ), halus (D50 2066–34,82  $\mu\text{m}$ ), dan nano (D50 0,22  $\mu\text{m}$ ). Model OPLS mengidentifikasi sementara delapan senyawa volatil yang berkorelasi positif dengan aktivitas antioksidan, berdasarkan VIP  $>$  1 dan koefisien regresi positif, yaitu *2-nonyl acetate*,  *$\alpha$ -trans-bergamotenol*, *eucalyptol*, *neral*, *(E)-DMNT*, *sulcatone*,  *$\alpha$ -phellandrene*, dan *(1S)- $\beta$ -pinene*.

Ukuran partikel serbuk jahe merah pada rentang skala milimeter hingga nanometer berpengaruh terhadap sifat fisik, profil kimia, dan aktivitas antioksidan. Pendekatan metabolomik untargeted berbasis ATR-FTIR, LC-HRMS, dan SPME-GC-MS yang dipadukan dengan analisis multivariat menunjukkan bahwa pengendalian ukuran partikel merupakan faktor penting dalam mengoptimalkan mutu fungsional serbuk jahe merah sebagai bahan baku maupun bahan tambahan pada berbagai produk pangan.

Kata kunci: aktivitas antioksidan, jahe merah, metabolomik *untargeted*, profil metabolom, serbuk nano

## SUMMARY

SITI AMINAH. Physical Properties, Antioxidant Activity, and Metabolome Profile of Red Ginger Powder (*Zingiber officinale* var. *rubrum*) at Various Particle Sizes. Supervised by PURWIYATNO HARIYADI, NANCY DEWI YULIANA, EKO HARI PURNOMO and ETIK MARDLIYATI.

Red ginger (*Zingiber officinale* var. *rubrum*) is a spice rich in bioactive compounds with a wide range of reported biological activities. This makes red ginger superior to other types of ginger such as elephant ginger and emprit ginger. Processing into powder form is widely practiced as it extends shelf life and facilitates handling. Particle size reduction to the nanometer scale may expand the surface area and enhance the release of bioactive compounds, thereby potentially altering the metabolomic profile and antioxidant activity. However, studies covering this size range remain limited. This study aimed to investigate the effect of particle size, from millimeter to nanometer scale, on the physical properties of red ginger powder, including particle size distribution, morphology, flowability, moisture content, water solubility, and color. The infrared fingerprint profile based on attenuated total reflectance–Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR), the nonvolatile metabolome profile of red ginger methanol extract based on liquid chromatography–high resolution mass spectrometry (LC-HRMS), and the volatile metabolome profile of red ginger powder based on solid phase microextraction–gas chromatography–mass spectrometry (SPME-GC-MS) were also characterized. Volatile compounds and functional group markers associated with antioxidant activity, as determined by the 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) method, were identified using multivariate analysis.

Powders were prepared at nine particle size levels (D50: 2256, 2066, 636, 580, 47.38, 40.37, 39.98, 34.82, and 0.22  $\mu\text{m}$ ) using a combination of blender, dry food grinder (DFG), and planetary ball mill (PBM) milling methods. The study was conducted in three stages: characterization of the physical properties of the powder, characterization of the infrared fingerprint profile using ATR-FTIR and the nonvolatile compound profile using LC-HRMS, and characterization of the volatile compound profile using SPME-GC-MS. The ATR-FTIR and SPME-GC-MS datasets were subsequently subjected to multivariate analysis, including principal component analysis (PCA), orthogonal partial least squares–discriminant analysis (OPLS-DA), and orthogonal partial least squares (OPLS).

Particle size of red ginger powder across the millimeter-to-nanometer range (D50 2256–0.22  $\mu\text{m}$ ) exerted distinct effects depending on the size range. In the range of D50 2256–34.82  $\mu\text{m}$ , bulk density (0.32–0.35  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) and tapped density (0.36–0.56  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) increased progressively, accompanied by increases in the Hausner ratio, compressibility index, and angle of repose, indicating a decrease in powder flowability. Water solubility increased from 19.64% to 31.65%, and lightness ( $L^*$ ) increased from 27.9 to 55.4, both of which were attributed to an increase in specific surface area and the diffuse light scattering mechanism. At the nanoscale (D50 0.22  $\mu\text{m}$ ), a distinctive pattern was observed: the Hausner ratio, compressibility index, and angle of repose decreased (1.54; 34.95%; 37.07°), accompanied by a reduction in moisture content to 10.81%. SEM analysis

confirmed the formation of two types of agglomerates, namely soft agglomerates driven by van der Waals forces and hard agglomerates.

Extraction yield increased from 3.36% at D50 2256  $\mu\text{m}$  to 10.31% at D50 0.22  $\mu\text{m}$ . Antioxidant activity was assessed using the DPPH method, yielding two contrasting patterns. When expressed per gram of extract, antioxidant activity did not increase linearly with decreasing particle size: the highest value was observed in coarse powder (D50 2256–580  $\mu\text{m}$ ) at 17.20–18.10 mg TE/g extract, which declined at the microscale (D50 40.37–34.82  $\mu\text{m}$ ) to 14.47–14.67 mg TE/g extract, before partially recovering at the nanoscale (D50 0.22  $\mu\text{m}$ ) to 15.88 mg TE/g extract. Conversely, when expressed per gram of powder, the value increased significantly from 0.61 mg TE/g at D50 2256  $\mu\text{m}$  to 1.64 mg TE/g at D50 0.22  $\mu\text{m}$ . This pattern suggests that intensive milling enhances extraction yield while co-extracting non-target compounds, thereby diluting the concentration of active compounds per gram of extract, even as the total per gram of powder continues to increase. ATR-FTIR analysis combined with PCA and OPLS-DA classified the extracts into two groups: coarse powder extracts (D50  $\geq$  580  $\mu\text{m}$ ) and fine-to-nano powder extracts (D50  $\leq$  47.38  $\mu\text{m}$ ). The OPLS model identified seven positively correlated wavenumbers that had the potential to be markers of the extract's antioxidant activity, namely 3750.6; 1715.44; 1514.59; 1457.2; 1268.65; 1151.82; and 1121.08  $\text{cm}^{-1}$ . These wave numbers characterize O-H stretching vibration, C=O stretching vibration, C=C aromatic ring stretching, C-CH<sub>3</sub> asymmetric bending, C-O-C asymmetric bending, C-O stretching vibration. These bands represent functional groups commonly found in phenolic compounds, including phenolic ketone structure candidates. LC-HRMS tentatively identified 65 metabolites, dominated by 24 phenolic compounds.

SPME-GC-MS analysis tentatively identified 150 volatile compounds grouped into nine classes, with terpenes as the dominant group (79.50–94.57%). As the particle size decreased, the relative area contribution of monoterpenes to the overall volatile profile decreased from 26.31% in coarse powder (D50 2256  $\mu\text{m}$ ) to 4.52% in nanopowder (D50 0.22  $\mu\text{m}$ ), accompanied by a relative increase in the contribution of monoterpenoids, aldehydes, and ketones. PCA and OPLS-DA yielded three distinct clusters: coarse (D50 2256  $\mu\text{m}$ ), fine (D50 2066–34.82  $\mu\text{m}$ ), and nano (D50 0.22  $\mu\text{m}$ ) red ginger powder groups. The OPLS model tentatively identified eight volatile compounds positively correlated with antioxidant activity based on VIP > 1 and positive regression coefficients: 2-nonyl acetate,  $\alpha$ -transbergamotenol, eucalyptol, neral, (E)-DMNT, sulcatone,  $\alpha$ -phellandrene, and (1S)- $\beta$ -pinene.

Particle size of red ginger powder across the millimeter-to-nanometer range influenced physical properties, chemical profiles, and antioxidant activity. An untargeted metabolomics approach based on ATR-FTIR, LC-HRMS, and SPME-GC-MS, integrated with multivariate analysis, confirmed that particle size control is a critical factor in optimizing the functional quality of red ginger powder as both a raw material and an ingredient in various food products.

**Keywords:** antioxidant activity, metabolomics profile, nano powder, red ginger, untargeted metabolomics



## @Hak cipta milik IPB University

### Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026  
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

*Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.*

*Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.*



# **SIFAT FISIK, AKTIVITAS ANTIOKSIDAN, DAN PROFIL METABOLOM SERBUK JAHE MERAH (*Zingiber officinale* var. *rubrum*) PADA BERBAGAI UKURAN PARTIKEL**

**SITI AMINAH**

Disertasi  
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar  
Doktor pada  
Program Studi Doktor Ilmu Pangan

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU PANGAN  
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI  
INSTITUT PERTANIAN BOGOR  
BOGOR  
2026**

**Hak Cipta Dilindungi Undang-undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

**Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:**

- 1 Dr. Lia Amalia, S.T., S.S., M.T.
- 2 Dr. Dias Indrasti, S.T.P., M.Sc.

**Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:**

- 1 Dr. Lia Amalia, S.T., S.S., M.T.
- 2 Dr. Dias Indrasti, S.T.P., M.Sc.

Judul Disertasi : Sifat Fisik, Aktivitas Antioksidan, dan Profil Metabolom Serbuk Jahe Merah (*Zingiber officinale* var. *rubrum*) pada Berbagai Ukuran Partikel

Nama : Siti Aminah  
NIM : F2601211006

Disetujui oleh

Pembimbing 1:  
Prof. Dr. Ir. Purwiyatno Hariyadi, M.Sc.

Pembimbing 2:  
Prof. Dr. Nancy Dewi Yuliana, S.T.P., M.Sc.

Pembimbing 3:  
Prof. Dr. Eko Hari Purnomo, S.T.P., M.Sc.

Pembimbing 4:  
Dr. Etik Mardiyati, M.Eng.

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:  
Dr. Nur Wulandari, S.T.P., M.Si.  
NIP 19741003 200003 2 001

Dekan Fakultas Teknik dan Teknologi:  
Prof. Dr. Ir. Slamet Budjianto, M.Agr.  
NIP 19610502 198603 1 002

Tanggal Ujian  
Ujian Tertutup : 6 Juli 2026  
Ujian Terbuka : 16 Juli 2026

Tanggal Pengesahan: 6 Agustus 2026

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :  
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.  
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



## @Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

## PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan disertasi yang berjudul “Sifat Fisik, Aktivitas Antioksidan, dan Profil Metabolom Serbuk Jahe Merah (*Zingiber officinale* var. *rubrum*) pada Berbagai Ukuran Partikel”. Disertasi ini dibuat guna memenuhi persyaratan dalam memperoleh gelar doktor pada Program Studi Ilmu Pangan, Fakultas Teknik dan Teknologi, Institut Pertanian Bogor. Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan disertasi ini, antara lain kepada:

- 1 Prof. Dr. Ir. Purwiyatno Hariyadi, M.Sc. selaku dosen pembimbing utama, atas arahan konseptual, bimbingan ilmiah, koreksi substansi, serta pendampingan secara berkelanjutan dalam perumusan ide, pelaksanaan penelitian, hingga penyusunan dan penyempurnaan disertasi ini.
- 2 Prof. Dr. Nancy Dewi Yuliana, S.T.P., M.Sc. selaku dosen pembimbing, atas bimbingan metodologis, arahan konseptual, analisis data penelitian dan penyusunan disertasi khususnya terkait konsep riset metabolomik yang sangat menunjang penelitian ini.
- 3 Prof. Dr. Eko Hari Purnomo, S.T.P., M.Sc. selaku dosen pembimbing, atas bimbingan ilmiah, serta arahan dan masukan terkait pengujian, analisis data, dan interpretasi hasil penelitian.
- 4 Dr. Etik Mardiyati, M.Eng. selaku dosen pembimbing, atas dukungan fasilitas laboratorium Nano Center Indonesia, serta saran kritis yang memperkaya analisis dan pembahasan hasil penelitian dalam disertasi ini.
- 5 Pusat Pelayanan Pembiayaan dan Asesmen Pendidikan Tinggi (PPAPT) Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains dan Teknologi Republik Indonesia dan Lembaga Pengelola Dana Pendidikan Tinggi (LPDP) Kementerian Keuangan Republik Indonesia atas Beasiswa Pendidikan Indonesia (BPI) tahun 2021 sehingga penulis dapat menyelesaikan studi doctoral dengan baik.
- 6 Dr. Dias Indrasti, S.T.P., M.Sc. dan Dr. Lia Amalia, S.T., S.S., M.T. selaku dosen penguji luar komisi atas masukan dan arahan yang telah diberikan.
- 7 Program Studi S3 Ilmu Pangan, segenap Dosen, Laboran dan Teknisi yang telah membantu selama penulis menjalani studi dan penelitian disertasi.
- 8 Pimpinan Universitas Djuanda Bogor, dan Lembaga Pemeriksa Halal (LPH) LPPOM, instansi dimana penulis bekerja, yang telah memberikan izin dan dukungan selama studi doctoral.
- 9 Orangtua, keluarga, teman-teman yang telah memberikan bantuan dan dukungan penuh untuk menyelesaikan disertasi ini.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan disertasi ini, sehingga kritik dan saran sangat penulis harapkan. Semoga tulisan ini bermanfaat bagi pihak-pihak yang membaca dan membutuhkan.

Bogor, Juli 2026

Siti Aminah



## Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

## DAFTAR ISI

|                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| DAFTAR TABEL                                                                                                                                      | xiv |
| DAFTAR GAMBAR                                                                                                                                     | xiv |
| DAFTAR LAMPIRAN                                                                                                                                   | xvi |
| I PENDAHULUAN                                                                                                                                     | 1   |
| 1.1 Latar Belakang                                                                                                                                | 1   |
| 1.2 Rumusan Masalah                                                                                                                               | 2   |
| 1.3 Tujuan                                                                                                                                        | 3   |
| 1.4 Manfaat                                                                                                                                       | 3   |
| 1.5 Ruang Lingkup                                                                                                                                 | 4   |
| 1.6 Hipotesis                                                                                                                                     | 4   |
| 1.7 Kebaruan ( <i>novelty</i> )                                                                                                                   | 4   |
| II SIFAT FISIK SERBUK JAHE MERAH PADA BERBAGAI UKURAN PARTIKEL                                                                                    | 6   |
| 2.1 Abstrak                                                                                                                                       | 6   |
| 2.2 Pendahuluan                                                                                                                                   | 6   |
| 2.3 Metode                                                                                                                                        | 7   |
| 2.4 Hasil dan Pembahasan                                                                                                                          | 10  |
| 2.5 Kesimpulan                                                                                                                                    | 23  |
| III YIELD EKSTRAKSI, AKTIVITAS ANTIOKSIDAN, SIDIK JARI INFRAMERAH DAN PROFIL METABOLOM NONVOLATIL SERBUK JAHE MERAH PADA BERBAGAI UKURAN PARTIKEL | 24  |
| 3.1 Abstrak                                                                                                                                       | 24  |
| 3.2 Pendahuluan                                                                                                                                   | 24  |
| 3.3 Metode                                                                                                                                        | 26  |
| 3.4 Hasil dan Pembahasan                                                                                                                          | 29  |
| 3.5 Kesimpulan                                                                                                                                    | 46  |
| IV PROFIL VOLATIL SERBUK JAHE MERAH PADA BERBAGAI UKURAN PARTIKEL                                                                                 | 48  |
| 4.1 Abstrak                                                                                                                                       | 48  |
| 4.2 Pendahuluan                                                                                                                                   | 48  |
| 4.3 Metode                                                                                                                                        | 49  |
| 4.4 Hasil dan Pembahasan                                                                                                                          | 51  |
| 4.5 Kesimpulan                                                                                                                                    | 72  |
| V PEMBAHASAN UMUM                                                                                                                                 | 74  |
| VI KESIMPULAN DAN SARAN                                                                                                                           | 83  |
| 6.1 Kesimpulan                                                                                                                                    | 83  |
| 6.2 Saran                                                                                                                                         | 83  |
| DAFTAR PUSTAKA                                                                                                                                    | 85  |
| LAMPIRAN                                                                                                                                          | 99  |
| RIWAYAT HIDUP                                                                                                                                     | 107 |

## DAFTAR TABEL

|    |                                                                                                                                                            |    |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | Distribusi ukuran partikel serbuk jahe merah dengan berbagai metode analisis                                                                               | 11 |
| 2  | Kemampuan alir serbuk jahe merah dengan berbagai ukuran partikel                                                                                           | 14 |
| 3  | Karakteristik warna serbuk jahe merah dengan berbagai ukuran partikel                                                                                      | 19 |
| 4  | <i>Yield</i> ekstraksi jahe merah dengan berbagai ukuran partikel                                                                                          | 29 |
| 5  | Aktivitas antioksidan ekstrak metanol jahe merah pada berbagai ukuran partikel yang dianalisis dengan metode DPPH                                          | 31 |
| 6  | Identifikasi gugus fungsi berdasarkan puncak spektrum ATR-FTIR ekstrak metanol jahe merah                                                                  | 33 |
| 7  | Bilangan gelombang dan gugus fungsi diskriminan yang mengindikasikan perbedaan antarkelas                                                                  | 37 |
| 8  | Identifikasi gugus fungsi relevan yang berkorelasi positif dengan aktivitas antioksidan ekstrak metanol jahe merah                                         | 40 |
| 9  | Aktivitas antioksidan serbuk jahe merah dengan berbagai ukuran partikel yang dihitung berdasarkan aktivitas antioksidan ekstrak dan <i>yield</i> ekstraksi | 51 |
| 10 | Senyawa penciri kelompok serbuk jahe merah kasar (D50 2256 $\mu\text{m}$ )                                                                                 | 66 |
| 11 | Senyawa penciri kelompok serbuk jahe merah halus (D50 2066, 636, 580, 47,38, 40,37, 39,98, dan 34,82 $\mu\text{m}$ )                                       | 67 |
| 12 | Senyawa penciri kelompok serbuk jahe merah nano (D50 0,22 $\mu\text{m}$ )                                                                                  | 68 |
| 13 | Senyawa volatil yang berkorelasi positif dengan aktivitas antioksidan pada serbuk jahe merah dengan ukuran partikel yang berbeda                           | 71 |
| 14 | Pemetaan terpadu respons sifat fisik, kimia, dan fungsional serbuk jahe merah pada berbagai ukuran partikel (D50 2256–0,22 $\mu\text{m}$ )                 | 78 |

## DAFTAR GAMBAR

|    |                                                                                                                                                                                                                   |    |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | Distribusi ukuran partikel serbuk jahe merah menggunakan metode <i>sieving</i> , <i>laser diffraction</i> , dan <i>dynamic light scattering</i>                                                                   | 12 |
| 2  | Distribusi ukuran partikel serbuk jahe merah dengan metode SEM                                                                                                                                                    | 13 |
| 3  | Indeks kompresibilitas (%) serbuk jahe merah pada berbagai ukuran partikel                                                                                                                                        | 15 |
| 4  | Rasio Hausner serbuk jahe merah pada berbagai ukuran partikel                                                                                                                                                     | 16 |
| 5  | Kadar air serbuk jahe merah pada berbagai ukuran partikel                                                                                                                                                         | 17 |
| 6  | Kelarutan dalam air (%) serbuk jahe merah dengan berbagai ukuran partikel                                                                                                                                         | 18 |
| 7  | Degradasi warna serbuk jahe merah dengan berbagai ukuran partikel                                                                                                                                                 | 20 |
| 8  | Morfologi serbuk jahe merah pada SEM perbesaran 50 $\times$                                                                                                                                                       | 20 |
| 9  | Morfologi SEM serbuk jahe merah ukuran kasar: (A) struktur lamelar dan granula pati terekspos pada D50 636 $\mu\text{m}$ (500 $\times$ ), (B) <i>spherical body</i> pada D50 2256 $\mu\text{m}$ (30000 $\times$ ) | 21 |
| 10 | Morfologi SEM serbuk jahe merah ukuran halus dengan perbesaran 2500 $\times$ (A) D50 47,38 $\mu\text{m}$ dan (B) D50 40,37 $\mu\text{m}$ (skala 10 $\mu\text{m}$ )                                                | 22 |

|    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 11 | Morfologi SEM serbuk jahe merah ukuran nano (D50 0,22 $\mu\text{m}$ ) pada perbesaran 10000 $\times$ (skala 1 $\mu\text{m}$ )                                                                                                                                                                                               | 22 |
| 12 | Perbandingan mekanisme ekstraksi senyawa bioaktif dari serbuk skala mikro dan serbuk skala nano (diadaptasi dari Baldelli dan Aguilera 2025)                                                                                                                                                                                | 30 |
| 13 | Serapan ATR-FTIR ekstrak metanol jahe merah dari serbuk dengan ukuran partikel yang berbeda. Ukuran partikel dinyatakan sebagai D50 dalam satuan $\mu\text{m}$                                                                                                                                                              | 32 |
| 14 | Plot skor PCA berdasarkan spektrum IR ekstrak metanol jahe merah dari serbuk dengan berbagai ukuran partikel. Ukuran partikel pada legenda dinyatakan sebagai D50 ( $\mu\text{m}$ ).                                                                                                                                        | 35 |
| 15 | Plot skor OPLS-DA berdasarkan spektrum IR ekstrak metanol jahe merah dari serbuk dengan berbagai ukuran partikel                                                                                                                                                                                                            | 35 |
| 16 | Plot koefisien (A) Kelas 1 dan (B) Kelas 2. Kelas 1 mewakili ekstrak metanol jahe merah dengan ukuran partikel serbuk kasar (D50 2256, 2066, 636, 580 $\mu\text{m}$ ) dan kelas 2 mewakili ekstrak dengan ukuran partikel serbuk halus (D50 47,38, 40,37, 39,98, 34,82 dan 0,22 $\mu\text{m}$ )                             | 36 |
| 17 | Plot skor OPLS ekstrak metanol jahe merah dari serbuk dengan berbagai ukuran partikel                                                                                                                                                                                                                                       | 38 |
| 18 | (A) Plot uji permutasi (100 permutasi) (B) <i>Y-related coefficient plot</i> model OPLS spektra ATR-FTIR ekstrak metanol jahe merah dari serbuk dengan berbagai ukuran partikel                                                                                                                                             | 39 |
| 19 | Kromatogram LC-HRMS ekstrak metanol jahe merah dari serbuk dengan berbagai ukuran partikel. Kromatogram ditampilkan untuk sampel dengan D50 2256; 47,38; 34,82; dan 0,22 $\mu\text{m}$ pada mode ionisasi positif ESI                                                                                                       | 42 |
| 20 | Profil intensitas relatif kelompok senyawa ekstrak metanol jahe merah dari serbuk dengan ukuran berbagai partikel berdasarkan analisis LC-HRMS. Ukuran partikel pada sumbu X dinyatakan sebagai D50 ( $\mu\text{m}$ )                                                                                                       | 43 |
| 21 | <i>Heatmap</i> metabolom yang teridentifikasi dalam ekstrak metanol jahe merah dari serbuk dengan berbagai ukuran partikel berdasarkan analisis LC-HRMS. Sampel dikelompokkan berdasarkan D50 2256, 47,38, 34,82, dan 0,22 $\mu\text{m}$ , sedangkan warna menunjukkan intensitas relatif area puncak masing-masing senyawa | 45 |
| 22 | Kromatogram GC-MS senyawa volatil serbuk jahe merah dengan berbagai ukuran partikel. Senyawa volatil diekstraksi menggunakan metode SPME dan dianalisis dengan GC-MS. Ukuran partikel pada label dinyatakan sebagai D50 ( $\mu\text{m}$ )                                                                                   | 53 |
| 23 | Distribusi kelompok senyawa volatil pada serbuk jahe merah dengan berbagai ukuran partikel                                                                                                                                                                                                                                  | 54 |
| 24 | Distribusi relatif kelompok monoterpen pada serbuk jahe merah dengan berbagai ukuran partikel berdasarkan analisis SPME-GC-MS. R1: residu halus, R2: residu kasar                                                                                                                                                           | 55 |
| 25 | Distribusi relatif kelompok monoterpenoid pada serbuk jahe merah dengan berbagai ukuran partikel berdasarkan analisis SPME-GC-MS. R1: residu halus, R2: residu kasar                                                                                                                                                        | 56 |
| 26 | Distribusi relatif kelompok seskuiterpen pada serbuk jahe merah dengan berbagai ukuran partikel menggunakan analisis SPME-GC-MS. R1: residu halus, R2: residu kasar                                                                                                                                                         | 57 |

|    |                                                                                                                                                                                                                 |    |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 27 | Distribusi relatif kelompok seskuiterpenoid pada serbuk jahe merah dengan berbagai ukuran partikel menggunakan analisis SPME-GC-MS. R1: residu halus, R2: residu kasar                                          | 58 |
| 28 | Distribusi relatif kelompok aldehida pada serbuk jahe merah dengan berbagai ukuran partikel menggunakan analisis SPME-GC-MS. R1: residu halus, R2: residu kasar                                                 | 59 |
| 29 | Distribusi relatif kelompok keton pada serbuk jahe merah dengan berbagai ukuran partikel menggunakan analisis SPME-GC-MS. R1: residu halus, R2: residu kasar                                                    | 59 |
| 30 | Distribusi relatif kelompok ester pada serbuk jahe merah dengan berbagai ukuran partikel menggunakan analisis SPME-GC-MS. R1: residu halus, R2: residu kasar                                                    | 60 |
| 31 | Distribusi relatif kelompok alkohol pada serbuk jahe merah dengan berbagai ukuran partikel menggunakan analisis SPME-GC-MS. R1: residu halus, R2: residu kasar                                                  | 61 |
| 32 | Distribusi relatif kelompok hidrokarbon nonterpen pada serbuk jahe merah dengan berbagai ukuran partikel menggunakan analisis SPME-GC-MS. R1: residu halus, R2: residu kasar                                    | 61 |
| 33 | Heatmap 50 senyawa yang teridentifikasi sementara dalam serbuk jahe merah dengan berbagai ukuran partikel (berdasarkan nilai VIP tertinggi) menggunakan analisis SPME-GC-MS. R1: residu halus, R2: residu kasar | 62 |
| 34 | Plot skor PCA dari senyawa volatil serbuk jahe merah berbagai ukuran partikel menggunakan analisis SPME-GC-MS                                                                                                   | 64 |
| 35 | Plot skor OPLS-DA senyawa volatil serbuk jahe merah dengan berbagai ukuran partikel menggunakan analisis SPME-GC-MS                                                                                             | 65 |
| 36 | Plot uji permutasi model OPLS senyawa volatil serbuk jahe merah dengan ukuran partikel yang berbeda yang dianalisis dengan SPME-GC-MS.                                                                          | 69 |
| 37 | Plot skor OPLS senyawa volatil serbuk jahe merah dengan ukuran partikel yang berbeda yang dianalisis dengan SPME-GC-MS                                                                                          | 70 |
| 38 | S-plot OPLS senyawa volatil serbuk jahe merah dengan ukuran partikel yang berbeda yang dianalisis dengan SPME-GC-MS                                                                                             | 71 |
| 39 | Skema mekanisme aglomerasi nanopartikel jahe melalui ikatan hidrogen antargugus -OH permukaan. Disusun berdasarkan (Yeap 2018; Wang <i>et al.</i> 2022)                                                         | 75 |
| 40 | Pola respon karakteristik serbuk jahe merah pada berbagai ukuran partikel.                                                                                                                                      | 76 |

## DAFTAR LAMPIRAN

|   |                                                                                                                             |     |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1 | Komposisi senyawa volatil serbuk jahe merah ( <i>Zingiber officinale</i> var. <i>rubrum</i> ) pada berbagai ukuran partikel | 100 |
| 2 | Komposisi senyawa volatil serbuk jahe merah ( <i>Zingiber officinale</i> var. <i>rubrum</i> ) pada berbagai ukuran partikel | 102 |
| 3 | Karakteristik fisikokimia dan korelasi antioksidan senyawa penanda volatil antarkelompok ukuran partikel serbuk jahe merah  | 104 |