

**KARAKTERISASI MATERIAL ABU VULKANIK GUNUNG MERAPI
SEBAGAI KANDIDAT KATALIS HETEROGEN**

Skripsi

Untuk memenuhi sebagian persyaratan

Mencapai derajat Sarjana Kimia



Shepta Rasika Putri

19106030036

**STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA**

**PROGRAM STUDI KIMIA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA**

2026



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-2019/Un.02/DST/PP.00.9/08/2026

Tugas Akhir dengan judul : Karakterisasi Material Abu Vulkanik Gunung Merapi sebagai Kandidat Katalis Heterogen

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : SHEPTA RASIKA PUTRI
Nomor Induk Mahasiswa : 19106030036
Telah diujikan pada : Jumat, 14 Agustus 2026
Nilai ujian Tugas Akhir : A/B

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang
Karmanto, S.Si., M.Sc.
SIGNED

Valid ID: 6a87e11282c89



Penguji I
Dr. Imelda Fajriati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6a87cd8371fed



Penguji II
Khamidinal, S.Si., M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6a87c3c165e58



Yogyakarta, 14 Agustus 2026
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6a8805c08064a

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Shepta Rasika Putri
NIM : 19106030036
Jurusan : Kimia
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi yang berjudul **“Karakterisasi Material Abu Vulkanik Gunung Merapi sebagai Kandidat Katalis Heterogen”** tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 12 Agustus 2026



Shepta Rasika Putri

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan Skripsi / Tugas Akhir

Lamp :

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

di Yogyakarta

Assalamu 'alaikum wr. wb.

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : Shepta Rasika Putri

NIM : 19106030036

Judul Skripsi : Karakterisasi Material Abu Vulkanik Gunung Merapi sebagai
Kandidat Katalis Heterogen

sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam Program Studi Kimia.

Dengan ini kami mengharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqasyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu 'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 12 Agustus 2026
Pembimbing



Karmanto, S.Si., M.Sc
NIP: 19820504 200912 1 005

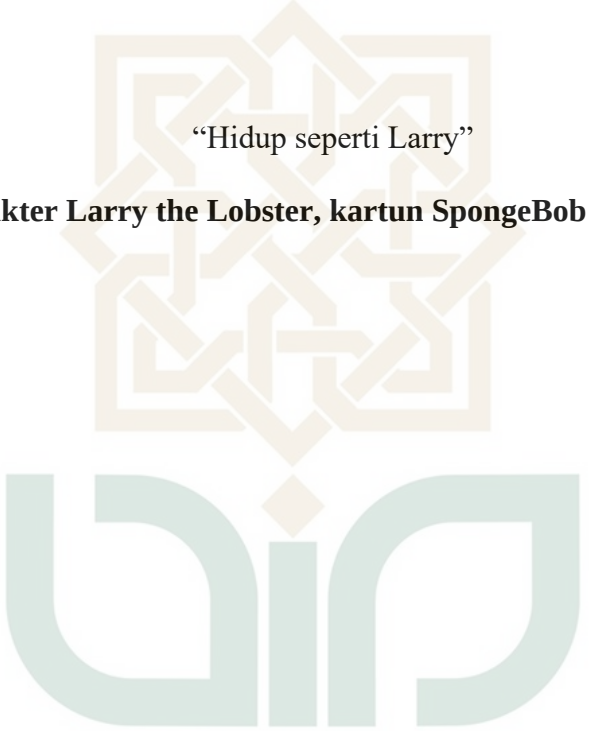
HALAMAN MOTTO

“Sederma namung anglampahi gesang, saking tinatah e gusti kang akaryo jagad,
mugi tansah lilo legawa”

*Sederhana saja menjalani hidup, karena semua sudah menjadi ketetapan Tuhan
yang menciptakan bumi, semoga selalu ikhlas dan legawa*

“Hidup seperti Larry”

- Karakter Larry the Lobster, kartun SpongeBob SquarPants



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya. Berkah kemudahan yang diberikan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “Karakterisasi Material Abu Vulkanik Gunung Merapi sebagai Kandidat Katalis Heterogen” sebagai salah satu persyaratan untuk mencapai derajat Sarjana Sains di bidang Kimia.

Penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah terlibat dalam memberikan dorongan, motivasi, semangat, dan masukan sehingga skripsi ini selesai. Ucapan terimakasih tersebut secara khusus disampaikan kepada :

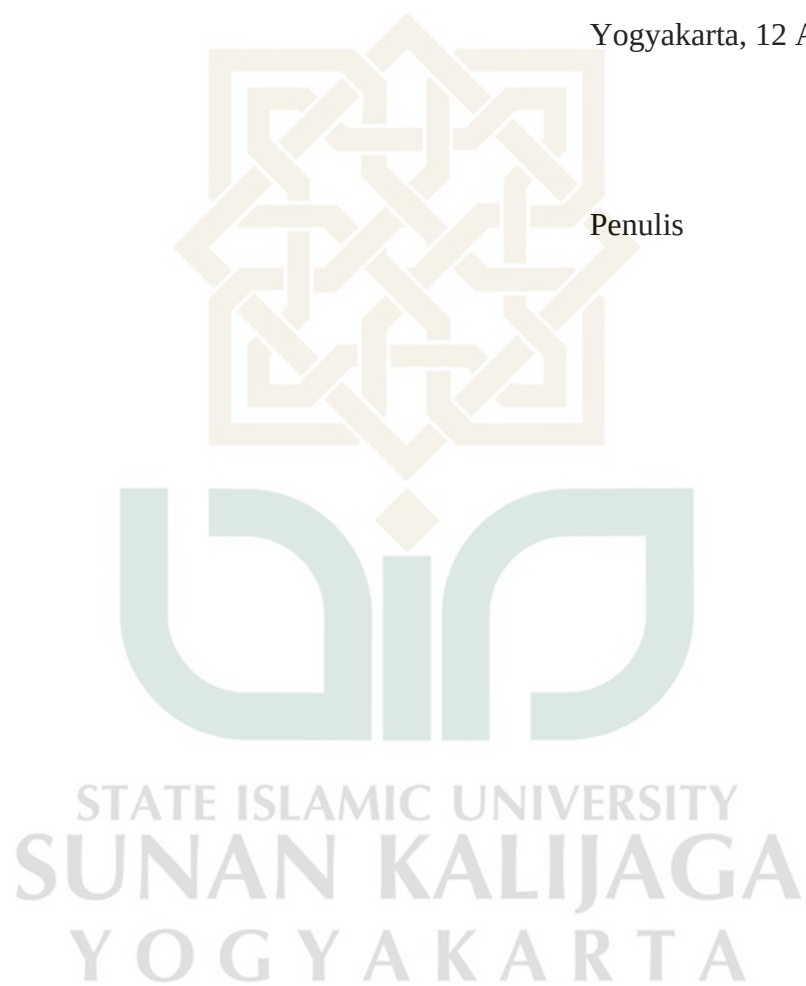
1. Ibu Dr. Khurul Wardati, M. Si. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
2. Ibu Prof. Dr. Maya Rahmayanti, S.Si., M.Si. selaku Ketua Program Studi Kimia UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
3. Bapak Karmanto, S.Si., M.Sc., selaku Dosen Pembimbing Skripsi yang secara ikhlas telah memberikan waktu, tenaga, dan pikirannya untuk membimbing, mengarahkan, dan memotivasi penulis dalam menyelesaikan skripsi.
4. Bapak dan Ibu dosen Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta, yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat selama masa studi.

5. Kedua orang tua penulis, Bapak R. Rasto Priyanto dan Ibu Riyani Rasnawati serta keluarga besar Hadiatmodjo yang selalu memberikan doa, semangat, dan dukungan dalam menyusun dan menyelesaikan skripsi ini.
6. Warih Sekarwati Rahsito dan Victrisius Bagus Krisnanto Satriatama selaku kakak dan adik penulis yang selalu menemani dan membantu penulis dalam penyusunan skripsi.
7. Bapak Tri Mujiyanto, Bapak Budi, dan rekan – rekan selaku penjaga Pos Pengamatan Gunung Merapi Babadan Magelang, yang telah membantu penulis dalam mendapatkan sampel penelitian untuk skripsi.
8. Teman – teman kelompok bimbingan, Miftahul Jannah dan Isti Ngafiah yang selalu kebersamai selama bimbingan skripsi.
9. Keluarga besar Kimia Angkatan 2019 yang telah mendukung dan membantu selama masa studi dan penyusunan skripsi.
10. Kepada seseorang yang tak kalah penting kehadirannya, Rifki Ihza Mohamad Bima Sancaka. Terima kasih telah menjadi bagian dalam proses perjalanan hidup penulis menyusun skripsi. Berkontribusi baik tenaga, waktu, menemani, mendukung serta menghibur penulis dalam kesedihan, mendengarkan keluh kesah, dan menyakinkan penulis untuk pantang menyerah hingga penyusunan skripsi ini terselesaikan.
11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu atas bantuannya dalam penyusunan skripsi ini.

Demi kesempurnaan skripsi ini, kritik dan saran sangat diharapkan. Penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan secara umum dan secara khusus di bidang kimia.

Yogyakarta, 12 Agustus 2026

Penulis



HALAMAN PERSEMBAHAN

Karya ini kami dedikasikan
Untuk almamater Program Studi Kimia
UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta



DAFTAR ISI

PENGESAHAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	iii
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR	iii
HALAMAN MOTTO	v
KATA PENGANTAR.....	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
ABSTRAK	xv
ABSTRACT	i
PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Batasan Masalah	2
C. Rumusan Masalah.....	3
D. Tujuan Penelitian	3
E. Manfaat Penelitian	4
BAB II.....	5
TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	5
A. Tinjauan Pustaka	5
B. Landasan Teori	7
1. Abu Vulkanik.....	8
2. X-Ray Fluorescence (XRF)	8
3. Katalis Heterogen	13
4. Luas Permukaan dan Porositas dalam Katalis Heterogen	16
5. Metode Brunauer-Emmett-Teller (BET) dan Metode Barrett-Joyner-Halenda (BJH)	17
C. Kerangka Berpikir dan Hipotesis Penelitian	19
BAB III	22

METODOLOGI PENELITIAN	22
A. Waktu dan Tempat Penelitian	22
B. Alat – Alat Penelitian	22
C. Bahan – Bahan Penelitian.....	22
D. Prosedur Kerja Penelitian	23
1. Pengambilan Sampel	23
2. Uji Komposisi Kimia Material Abu Vulkanik Gunung Merapi menggunakan Metode <i>Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence</i> (WD-XRF)	23
3. Analisis Luas Permukaan dan Volume Pori dengan Metode <i>Brunauer- Emmett-Teller</i> (BET)	23
4. Teknis Analisis Data	24
BAB IV	26
PEMBAHASAN	26
BAB V	43
PENUTUP	43
LAMPIRAN	49

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Komposisi Unsur Abu Vulkanik Gunung Merapi Hasil WD-XRF2.....	30
Table 4.2 Komposisi Senyawa Oksida Abu Vulkanik Gunung Merapi Hasil WD-XRF3	31
Tabel 4.3 Data Luas Permukaan Spesifik Abu Vulkanik Gunung Merapi4	35
Table 4.4 Data Volume dan Diameter Pori Abu Vulkanik Gunung Merapi5	36
Table 4.5 Parameter Regresi Persamaan BET6	36



DAFTAR GAMBAR

Gambar 4.1 Grafik Analisis Kualitatif WD-XRF Abu Vulkanik Gunung Merapi..	27
Gambar 4.2 Grafik Adsorpsi-Desorpsi Nitrogen.....	39



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Komposisi Unsur Abu Vulkanik Gunung Merapi Hasil WD-XRF	49
Lampiran 2. Komposisi Senyawa Oksida Abu Vulkanik Gunung Merapi Hasil WD-XRF	49
Lampiran 3. Data Luas Permukaan Spesifik, Volume Pori dan Distribusi Pori Abu Vulkanik Gunung Merapi Hasil SAA.....	50
Lampiran 4 Parameter Regresi Persamaan BET	50
Lampiran 5. Dokumentasi Penelitian	51



ABSTRAK

KARAKTERISASI MATERIAL ABU VULKANIK GUNUNG MERAPI SEBAGAI KANDIDAT KATALIS HETEROGEN

Oleh :

Shepta Rasika Putri

19106030036

Pembimbing :

Karmanto, S.Si., M.Sc

Abu vulkanik Gunung Merapi merupakan material yang melimpah jumlahnya, namun pemanfaatannya di Indonesia masih terbatas. Secara komposisi kimia, abu vulkanik mengandung senyawa aluminosilikat serta berbagai oksida logam yang berpotensi dikembangkan sebagai kandidat katalis heterogen. Penelitian ini bertujuan mengkarakterisasi komposisi kimia serta sifat tekstur abu vulkanik Gunung Merapi sebagai dasar penilaian potensinya sebagai kandidat katalis heterogen. Karakterisasi komposisi kimia dilakukan menggunakan *Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence* (WD-XRF) dan karakterisasi luas permukaan spesifik, volume pori, dan distribusi ukuran pori dilakukan menggunakan *Surface Area Analyzer* (SAA) berbasis metode adsorpsi desorpsi gas nitrogen (BET dan BJH).

Hasil analisis WD-XRF menunjukkan bahwa abu vulkanik Gunung Merapi didominasi oleh SiO_2 (37,9%) dan Al_2O_3 (8,61%) yang berbentuk kerangka aluminosilikat, disertai kandungan CaO (4,75%), Fe_2O_3 (4,58%), dan K_2O (3,59%) sebagai oksida logam alkali, alkali tanah, dan transisi dalam jumlah yang cukup berarti, dengan rasio molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ sebesar 7,47. Hasil analisis *Surface Area Analyzer* menunjukkan luas permukaan MultiPoint BET sebesar $0,4720 \text{ m}^2/\text{g}$ dengan struktur pori yang didominasi mesopore berdasarkan klasifikasi IUPAC, disertai pola isotherm Tipe IV dengan histeresis tipe H3. Kombinasi kandungan aluminosilikat, oksida logam alkali, dan alkali tanah serta oksida logam transisi seperti Fe_2O_3 , mengindikasikan bahwa abu vulkanik Gunung Merapi berpotensi menunjukkan karakter katalitik asam, basa, atau redoks, sehingga layak dipertimbangkan sebagai kandidat katalis heterogen untuk penelitian lanjutan.

Kata Kunci : abu vulkanik, Gunung Merapi, katalis heterogen, WD-XRF, BET

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF VOLCANIC ASH MATERIAL FROM MOUNT MERAPI AS A HETEROGENEOUS CATALYST CANDIDATE

By :

Shepta Rasika Putri

19106030036

Adviser :

Karmanto, S.Si., M.Sc

Volcanic ash from Mount Merapi is an abundant material, however its utilization in Indonesia remains limited. In terms of its chemical composition, volcanic ash contains aluminosilicate compounds and various metal oxides, have the potential to be developed as heterogeneous catalyst candidate. This study aimed to characterize the chemical composition and textural properties of Mount Merapi volcanic ash as a basis for evaluating its potential as a heterogeneous catalyst. The chemical composition was characterized using *Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence* (WD-XRF), while the specific surface area, pore volume, and pore size distribution were analyzed using a *Surface Area Analyzer* (SAA) based on nitrogen adsorption-desorption measurements using the *Brunauer-Emmett-Teller* (BET) and *Barrett-Joyner-Halenda* (BJH) methods.

The WD-XRF analysis showed that Mount Merapi volcanic ash was predominantly composed of SiO_2 (37,9%) and Al_2O_3 (8,61%), which constitute the aluminosilicate framework, along with CaO (4,75%), Fe_2O_3 (4,58%), and K_2O (3,59%). These results indicate the presence of significant amounts of alkaline, alkaline-earth, and transition metal oxides, with a $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratio of 7,47. The Surface Area Analyzer results showed a multipoint BET surface area of 0,4720 m^2/g , with a pore structure dominated by mesopores according to the IUPAC classification. The adsorption-desorption isotherm was classified as Type IV with an H3-type hysteresis loop. The combination of aluminosilicate components, alkaline and alkaline-earth metal oxides, and transition metal oxides such as Fe_2O_3 suggests that Mount Merapi volcanic ash may exhibit acidic, basic and redox catalytic properties. Therefore, Mount Merapi volcanic ash warrants further investigation as a potential heterogeneous catalyst for subsequent studies.

Keywords : volcanic ash, Mount Merapi, heterogeneous catalyst, WD-XRF, BET

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Indonesia merupakan negara dengan aktivitas vulkanik yang sangat tinggi dikarenakan terletak di jalur cincin api pasifik, dengan Gunung Merapi di Yogyakarta sebagai salah satu gunung berapi paling aktif di dunia. Setiap periode erupsi Gunung Merapi menghasilkan abu vulkanik dalam jumlah besar yang tersebar hingga puluhan kilometer dari puncak. Di satu sisi, abu vulkanik sering dipandang sebagai material sisa yang berdampak negatif bagi lingkungan dan aktivitas Masyarakat. Abu vulkanik sesungguhnya menyimpan potensi pemanfaatan komposisinya yang kaya akan senyawa aluminosilikat serta berbagai oksida logam hasil kristalisasi magma (Wahyuni et al., 2012).

Pemanfaatan abu vulkanik sebagai material fungsional telah banyak dikaji, di antaranya sebagai bahan pozzolan dan geopolimer pada industri konstruksi, maupun sebagai bahan baku katalis heterogen pada berbagai reaksi kimia (Ilham et al., 2021). Kandungan aluminosilikat pada abu vulkanik memiliki kemiripan struktur dengan material zeolite yang telah lama dikenal sebagai katalis asam heterogen, sementara kandungan oksida logam alkali dan alkali tanah seperti K_2O , CaO , dan MgO berpotensi memberikan karakter basa pada permukaan material. Selain itu, keberadaan oksida logam transisi seperti Fe_2O_3 turut membuka peluang aktivitas katalitik berbasis reaksi redoks.

Katalis heterogen memiliki keunggulan dibanding katalis homogen, terutama dalam hal kemudahan pemisahan dari campuran reaksi, potensi digunakan berulang, dan dampak lingkungan yang lebih rendah, sehingga sejalan dengan prinsip kimia hijau (Vedrine, 2015). Namun demikian, sebelum suatu material dapat diusulkan sebagai kandidat katalis heterogen, karakterisasi awal terhadap komposisi kimia dan sifat tekstur material tersebut menjadi tahap penting yang perlu dilakukan. Komposisi kimia menentukan jenis situs aktif terbentuk pada permukaan material, sedangkan sifat tekstur seperti luas permukaan spesifik dan distribusi ukuran pori menentukan aksesibilitas reaktan menuju situs aktif tersebut.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengkarakterisasi abu vulkanik Gunung Merapi melalui dua pendekatan analisis instrumental, yaitu *Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence* (WD-XRF) untuk menentukan komposisi kimia, serta *Surface Area Analyzer* (SAA) untuk menentukan luas permukaan spesifik, volume pori, dan distribusi ukuran pori material. Kedua data karakterisasi tersebut kemudian dikaji secara bersama untuk menilai kelayakan abu vulkanik Gunung Merapi sebagai kandidat katalis heterogen.

B. Batasan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, batasan masalah yang terdapat dalam penelitian ini di antaranya :

1. Sampel abu vulkanik Gunung Merapi yang digunakan di ambil di Posko Pengamatan Gunung Merapi Babadan Magelang pada tanggal 11 Maret 2023.

2. Tidak dilakukan preparasi kimia seperti pengeringan, pengayakan ukuran partikel, atau pembuatan pellet pada uji komposisi kimia menggunakan *Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence* (WD-XRF) dan uji luas permukaan dan volume pori menggunakan *Surface Area Analyzer* (SAA) dengan metode *Brunauer-Emmett-Teller* (BET).

C. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana komposisi kimia, baik dalam bentuk unsur maupun senyawa oksida, dari abu vulkanik Gunung Merapi berdasarkan hasil analisis WD-XRF ?
2. Bagaimana karakterisasi luas permukaan spesifik, volume pori, dan distribusi ukuran pori abu vulkanik Gunung Merapi berdasarkan hasil analisis *Surface Area Analyzer* ?
3. Bagaimana potensi abu vulkanik Gunung Merapi sebagai kandidat katalis heterogen berdasarkan keterkaitan antara data komposisi kimia dan data tekstur yang diperoleh ?

D. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menentukan komposisi kimia abu vulkanik Gunung Merapi, baik dalam bentuk unsur maupun senyawa oksida menggunakan metode *Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence* (WD-XRF).
2. Menentukan luas permukaan spesifik, volume pori, dan distribusi ukuran pori abu vulkanik Gunung Merapi menggunakan metode *Surface Area Analyzer* (SAA) berbasis adsorpsi desorpsi gas nitrogen.
3. Menganalisis potensi abu vulkanik Gunung Merapi sebagai kandidat katalis heterogen berdasarkan keterkaitan data komposisi kimia dan data tekstur material yang diperoleh.

E. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberi manfaat baik secara teoritis maupun praktis. Secara teoritis, penelitian ini diharapkan dapat memperkaya data ilmiah mengenai komposisi kimia dan karakter tekstur abu vulkanik Gunung Merapi, khususnya dalam kaitannya dengan teori katalis heterogen. Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi penelitian lanjutan mengenai sintesis maupun uji aktivitas katalitik berbasis abu vulkanik, sekaligus mendorong pemanfaatan abu vulkanik sebagai material fungsional bernilai tambah, sejalan dengan prinsip kimia hijau dan pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan.

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan, dapat disimpulkan sebagai berikut

1. Abu vulkanik Gunung Merapi memiliki komposisi unsur yang didominasi oleh Si sebesar 17,6%, Al sebesar 5,35%, Ca sebesar 3,33%, Fe sebesar 3,15%, dan K sebesar 2,92%. Komposisi senyawa oksida didominasi oleh SiO_2 sebesar 37,9% dan Al_2O_3 sebesar 8,61%, membentuk kerangka aluminosilikat, disertai kandungan CaO sebesar 4,75%, Fe_2O_3 sebesar 4,58%, dan K_2O 3,59% sebagai oksida logam, alkali tanah, dan transisi. Rasio molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ sampel tercatat sebesar 7,47.
2. Abu vulkanik Gunung Merapi memiliki luas permukaan spesifik MultiPoint BET sebesar $0,4720 \text{ m}^2/\text{g}$ dengan struktur pori yang didominasi mesopori berdasarkan klasifikasi IUPAC, disertai kontribusi mikropori dan sedikit makropori, serta menunjukkan pola isotherm Tipe IV dengan histeresis tipe H3 yang mengindikasikan pori berbentuk celah khas agregat partikel berbentuk lempeng.
3. Kombinasi kerangka aluminosilikat yang berpotensi bersifat asam, oksida logam alkali, dan alkali tanah yang berpotensi bersifat basa, disertai struktur pori mesopori yang mendukung aksesibilitas reaktan, menunjukkan bahwa

abu vulkanik Gunung Merapi layak dipertimbangkan sebagai kandidat katalis heterogen.

B. Saran

Saran yang dapat diberikan dalam penelitian lebih lanjut adalah sebagai berikut :

1. Perlu dilakukan analisis *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengonfirmasi fase mineral kristalin penyusun abu vulkanik.
2. Perlu dilakukan uji keasaman dan kebasaan permukaan, misalnya melalui metode indikator *Hammett* atau *temperature programmed desorption* untuk mengonfirmasi keberadaan dan kekuatan situs aktif secara langsung.
3. Perlu dilakukan uji aktivitas katalitik pada reaksi model yang relevan untuk membuktikan secara empiris potensi abu vulkanik Gunung Merapi sebagai katalis heterogen.

DAFTAR PUSTAKA

- Bambynek, W., Crasemann, B., Fink, R. W., Freund, H. U., Mark, H., Swift, C.D., Price, R. E., & Rao, P. V. (1972). X-ray Fluorescence yields, Auger, and Coster-Kronig transition probabilities. *Reviews of Modern Physics*, 44(4), 716-813.
- Barrett, E. P., Joyner, L. G., & Halenda, P. P. (1951). The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. Computations from nitrogen isotherms. *Journal of the American Chemical Society*, 73(1), 373-380.
- Bragg, W. H., & Bragg, W. L. (1913). The reflection of X-rays by crystals. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 88(605), 428-438.
- Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60(2), 309-319.
- Delmelle, P., Villieras, F., & Polletier, M. (2005). Surface area, porosity and water adsorption properties of fine volcanic ash particles. *Bulletin of Volcanology*, 67(2), 160-169.
- E.Kusumastuti (2012). Pemanfaatan abu vulkanik Gunung Merapi sebagai geopolimer (suatu polimer anorganik aluminosilikat). *Jurnal MIPA*. 35(1)
- Einvall, J., Albertazzi, S., Hultberg, C., Malik, A., Basile, F., Larsson A, C., Brandin, J., & Sanati, M. (2007). Investigation of reforming catalys deactivation by exposure to fly ash from biomass gasification in laboratory scale. *Energy and Fuels*, 21(5), 2481 – 2488.
- Ersoy, O. (2010). Surface area and volume measurements of volcanic ash particles using micro-computed tomography (micro-CT): A comparison with scanning electron microscope (SEM) stereoscopic imaging and geometric considerations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 196(3-4), 281-286.

- Firsta, R. K. (2021). *Identifikasi kandungan material vulkanis sebagai bahan dasar geopolimer*. [Skripsi, Universitas Islam Indonesia. Repositori Institusi Universitas Islam Indonesia.
- Furqon, F., Nugroho, A.K dan Anshorulloh, M.K. (2019) ‘Kajian Penggunaan Katalis KOH pada Pembuatan Biodiesel Menggunakan Reverse Flow Biodiesel Reactor secara Batch’, *Rona Teknik Pertanian*, 12(1), pp. 22-31.
- Ginting, L. (2018). *Karakterisasi abu vulkanik Gunung Sinabung yang dimanfaatkan sebagai katalis pada sintesis biodiesel*. [Skripsi, Universitas Sumatera Utara]. Repositori Institusi Universitas Sumatera Utara.
- Haag, W.O., Lago, R. M., & Weisz, P. B. (1984). The active site of acidic aluminosilicate catalysts. *Nature*, 309(5969), 589-591.
- Ilham, D. J., Anggarini, U., Juniarti, J., & Fiantis, D. (2021). Utilization of volcanic ashes for geopolymer based on alkaline activator and solid-liquid ratio. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 708(1), 012058.
- Kandola, I., et al. (2025). Eco-friendly catalyst design: Transforming volcanic lava ashes into sustainable synthesis of glycerol carbonate from glycerol in one pot solvent-free route. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(2), 116030.
- Kusumastuti, E., & Sugiyo. (2016). Sintesis dan karakterisasi zeolite/geopolimer berbasis abu vulkanik Gunung Merapi menggunakan metode aktivasi basa. *Jurnal MIPA*, 39(1), 45-52.
- Margui, E., Queralt, I., & de Almeida, E. (2022). X-ray fluorescence spectrometry for environmental analysis: Basic principles, instrumentation, applications and recent trends. *Chemosphere*, 303, 135006.
- Moseley, H. G. J. (1913). The high-frequency spectra of the elements. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 26(156), 1024-1034.
- Nandiyanto, A. B. D., Putra, Z. A., Andika, R., Bilad, M. R., Abdullah, A. G., & Aiza, M. (2016). Porous structure and physicochemical properties of natural volcanic ash particles. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 1(2), 183-192.

- Neimark, A. V., Sing, K. S. W., & Thommes, M. (2008). Surface area and porosity. In G. Ertl, H. Knozinger, F. Schuth, & J. Weitkamp (Eds.), *Handbook of heterogeneous catalysis*. Wiley-VCH.
- Putra, M. S. N. H. S., & Sutrisno, H. (2016). Karakterisasi Fisik Abu Vulkanik Gunung Kelud Yang Dihasilkan Dari Perendaman Berbagai Konsentrasi Natrium Hidroksida. *Jurnal Elemen Kimia*, 5(2).
- Ramagani, S. (2023). Sintesis katalis heterogen berbasis material silika alami untuk aplikasi reaksi organik. *Jurnal Rekayasa Proses*, 17(1), 34-42.
- Rigaku Corporation. (n.d). Supermini200 benchtop sequential WDXRF spectrometer [Product specification]. Rigaku Corporation. Diakses 11 Agustus 2026, dari <https://rigaku.com/products/xrf-spectrometers/wdxrf/supermini200>
- Salamah, S., Maryudi, M., & Aktawan, A. (2021). Chemical Stability and Leaching Test of Natural Amuninosilicate Based Heterogeneous Catalysts. *Journal of Materials and Chemical Engineering*, 9(2), 45-52.
- Taslim, T., Bani, O., Sittiyah, I., & Sembiring, S. (2019). Biodiesel Production Using Heterogeneous Catalyst Based on Volcanic Ash of Mount Sinabung. *AIP Conference Proceedings*, 2095 (1), 020062.
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J.P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9-10), 1051-1069.
- Tiya-Djowe, A., Lemougna, P. N., Emadak, A., Mbowou, M. P., Laminsi, S., & Melo, U. C. (2018). Taking advantage of iron contained in natural volcanic ash for catalytic degradation of Rhodamine 6G. *Journal of Applied Surfaces and Interfaces*, 3(1-3).
- Vogt, C., & Weckhuysen, B. M. (2022). The concept of active site in heterogeneous catalysis. *Nature Reviews Chemistry*, 6, 89-111.
- Vedrine, J. C. (2015). Acid-base characterization of heterogeneous catalysts: An up-to-date overview. *Research on Chemical Intermediates*, 41(12), 9387-9432.

- Wahyuni, E. T., Triyono, S., & Suherman, S. (2012). Penentuan komposisi kimia abu vulkanik dari erupsi Gunung Merapi. *Jurnal Manusia dan Lingkungan*, 19(2), 150-159.
- Widyaningsih, S., Radiman, C.L., & Sugesti, S. (2019). The Development of Fly Ash-Supported CaO Derived from Mollusk Shell of *Anadara Granosa* and *Paphia Undulata* as Heterogeneous CaO Catalyst in Biodiesel Synthesis. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 10(3), 315-326.
- Yilmaz, D., & Boydas, E. (2018). The use of scattering peaks for matrix effect correction in WDXRF analysis. *Radiation Physics and Chemistry*, 153, 17-20.
- Zhuravlev, L. T. (2000). The surface chemistry of amorphous silica. Zhuravlev model. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspect*, 173(1-3), 1-38.