

TUGAS AKHIR - TL234839

**ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN METAKAOLIN
TERHADAP KUAT TEKAN DAN KEMAMPUAN
ADSORPSI LIMBAH *METHYLENE BLUE* PADA MORTAR
GEOPOLIMER BERBASIS *FLY ASH***

YUSUF BAYU WICAKSONO
NRP. 5011201065

Dosen Pembimbing
Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
NIP. 199007262015041002
Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.
NIP. 197801132002121003

Program Studi Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2024



TUGAS AKHIR – TL234839

**ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN METAKAOLIN
TERHADAP KUAT TEKAN DAN KEMAMPUAN
ADSORPSI LIMBAH *METHYLENE BLUE* PADA MORTAR
GEOPOLIMER BERBASIS *FLY ASH***

YUSUF BAYU WICAKSONO
NRP. 5011201065

Dosen Pembimbing
Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
NIP. 199007262015041002
Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.
NIP. 197801132002121003

Program Studi Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2024

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL234839

**ANALYSIS THE EFFECT OF METAKAOLIN ADDITION
TO THE COMPRESSIVE STRENGTH AND METHYLENE
BLUE WASTE ADSORPTION CAPACITY OF FLY ASH
BASED GEOPOLYMER MORTAR**

Yusuf Bayu Wicaksono
NRP. 5011201065

Advisor
Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
NIP. 199007262015041002
Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.
NIP. 197801132002121003

Study Program of Material Engineering
Department of Materials and Metallurgical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2024

(This page is intentionally blank)

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN METAKAOLIN TERHADAP KUAT TEKAN DAN KEMAMPUAN ADSORPSI LIMBAH METHYLENE BLUE PADA MORTAR GEOPOLIMER BERBASIS FLY ASH

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **YUSUF BAYU WICAKSONO**
NRP. 5011201065

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
2. Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.
3. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.
4. Yusuf Pradesar S.T., M.T., M.Sc., Ph.D.


Pembimbing


Ko-Pembimbing


Penguji


Penguji



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPROVAL SHEET

ANALYSIS THE EFFECT OF METAKAOLIN ADDITION TO THE COMPRESSIVE STRENGTH AND METHYLENE BLUE WASTE ADSORPTION CAPACITY OF FLY ASH BASED GEOPOLYMER MORTAR

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree of Bachelor of Engineering at
Undergraduate Study Program of Material Engineering
Department of Materials and Metallurgical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : YUSUF BAYU WICAKSONO

NRP. 5011201065

Approved by Final Project Examiner Team :

1. Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
2. Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.
3. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.
4. Yusuf Pradesar S.T., M.T., M.Sc., Ph.D.

Advisor

Co-Advisor

Examiner

Examiner



(This page is intentionally blank)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa/NRP : Yusuf Bayu Wicaksono /5011201065
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS ITS
Dosen Pembimbing/NIP : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T./199007262015041002
Dosen Ko-Pembimbing : Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.
/197801132002121003

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul **“ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN METAKAOLIN TERHADAP KUAT TEKAN DAN KEMAMPUAN ADSORPSI LIMBAH METHYLENE BLUE PADA MORTAR GEOPOLIMER BERBASIS FLY ASH”** adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penelitian ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 12 Juli 2024

Mengetahui
Dosen Pembimbing

Mahasiswa



(Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.)
NIP. 199007262015041002



(Yusuf Bayu Wicaksono)
NRP. 5011201065

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of Student/NRP : Yusuf Bayu Wicaksono /5011201065
Department : Materials and Metallurgical Engineering INDSYS-ITS
Advisor/NIP : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T./199007262015041002
Co-Advisor : Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.
/197801132002121003

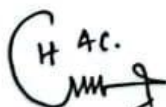
hereby declare that the Final Project with the title of **“ANALYSIS THE EFFECT OF METAKAOLIN ADDITION TO THE COMPRESSIVE STRENGTH AND METHYLENE BLUE WASTE ADSORPTION CAPACITY OF FLY ASH BASED GEOPOLYMER MORTAR”** is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, July 12th 2024

Acknowledged
Advisor

Student

Handwritten signature of Haniffudin Nurdiansah, consisting of a circle containing the letters 'H' and 'Ac.', followed by a stylized signature.

(Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.)
NIP. 199007262015041002

Handwritten signature of Yusuf Bayu Wicaksono, a stylized signature in black ink.

(Yusuf Bayu Wicaksono)
NRP. 5011201065

(This page is intentionally blank)

**ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN METAKAOLIN TERHADAP KUAT
TEKAN DAN KEMAMPUAN ADSORPSI LIMBAH *METHYLENE BLUE*
MORTAR GEOPOLIMER BERBASIS *FLY ASH***

Nama Mahasiswa / NRP : Yusuf Bayu Wicaksono/ 5011201065
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
Dosen Ko-Pembimbing : Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.

Abstrak

Mortar Geopolimer tersusun dari material geopolimer yang berfungsi untuk menggantikan pasta semen. Bahan dasar utama geopolimer adalah material yang mengandung silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) seperti *fly ash*, GGBFS (*ground granulated blast furnace slag*). Namun, rata-rata material tersebut tidak memiliki kemampuan untuk adsorpsi *methylene blue*, maka dari itu penambahan Metakaolin diperlukan untuk membantu kemampuan mortar untuk adsorpsi *methylene blue*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan Metakaolin terhadap kuat tekan dan kemampuan adsorpsi *methylene blue* mortar geopolimer berbasis *fly ash* dan GGBFS. Dengan rasio *fly ash*, GGBFS, metakaolin dan larutan alkali yang tepat sesuai dengan *mix design* diharapkan dapat meningkatkan kuat tekan dan kemampuan adsorpsi limbah *methylene blue* pada mortar geopolimer. Pengujian karakterisasi yang dilakukan pada penelitian ini diantaranya uji XRF, FTIR, XRD, SEM-EDX, dan BET. Kemudian, mortar yang dihasilkan dilakukan pengujian densitas mortar, *water absorption*, kuat tekan, adsorpsi *methylene blue*, dan UV-Vis. Dari hasil penelitian, diperoleh nilai densitas mortar berdasarkan ASTM C905 mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya persentase penambahan metakaolin dan menurunnya persentase penambahan GGBFS, dengan nilai maksimum didapatkan pada variasi F70G25M5 sebesar $2,41834 \text{ g/cm}^3$. Nilai penyerapan air mortar berdasarkan ASTM C1403 memiliki nilai maksimum pada variasi F70G5M25 sebesar $20.8\text{-}34.8 \text{ g/100 cm}^2$. Kuat tekan mortar berbanding lurus dengan nilai densitas, dengan nilai maksimum didapatkan pada variasi F70G25M5 sebesar 50,37 MPa. Persentase pertambahan massa setelah dilakukan adsorpsi limbah *methylene blue* memiliki nilai yang berbanding terbalik dengan nilai kuat tekan dan densitas, dengan nilai *removal efficiency* maksimum didapatkan pada variasi F70G5M25 sebesar 73,80095 %.

Kata Kunci: *Adsorpsi, Geopolimer, Metakaolin, Methylene Blue, Mortar Geopolimer*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALYSIS THE EFFECT OF METAKAOLIN ADDITION TO THE COMPRESSIVE STRENGTH AND METHYLENE BLUE WASTE ADSORPTION CAPACITY OF FLY ASH BASED GEOPOLYMER MORTAR

Student Name / NRP : Yusuf Bayu Wicaksono/ 5011201065
Department : Materials and Metallurgical Engineering INDSYS-ITS
Advisor : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
Co-Advisor : Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.

Abstract

Geopolymer mortar is composed of geopolymer material which functions to replace cement paste. The main basic ingredients for geopolymers are materials containing silica (SiO_2) and alumina (Al_2O_3) such as fly ash, GGBFS (ground granulated blast furnace slag). However, on average these materials do not have the ability to adsorb methylene blue, therefore the addition of Metakaolin is needed to help the mortar's ability to adsorb methylene blue. This research aims to analyze the effect of adding Metakaolin on the compressive strength and adsorption ability of methylene blue mortar based on fly ash and GGBFS geopolymer. With the right ratio of fly ash, GGBFS, metakaolin and alkali solution according to the mix design, it is hoped that it can increase the compressive strength and adsorption capacity of methylene blue waste in geopolymer mortar. Characterization tests carried out in this research include XRF, FTIR, XRD, SEM-EDX, and BET tests. Then, the resulting mortar was tested for mortar density, water absorption, compressive strength, methylene blue adsorption, and UV-Vis. From the research results, it was found that the mortar density value based on ASTM C905 decreased along with the increasing percentage of metakaolin addition and the decreasing percentage of GGBFS addition, with the maximum value obtained in the F70G25M5 variation of 2.41834 g/cm³. The water absorption value of mortar based on ASTM C1403 has a maximum value in the F70G5M25 variation of 20.8-34.8 g/100 cm². The compressive strength of mortar is directly proportional to the density value, with the maximum value obtained in the F70G25M5 variation of 50.37 MPa. The percentage increase in mass after adsorption of methylene blue waste has a value that is inversely proportional to the compressive strength and density values, with the maximum removal efficiency value obtained in the F70G5M25 variation of 73.80095%.

Keyword: *Adsorption, Geopolymer, Metakaolin, Methylene Blue, Mortar Geopolymer*

(This page is intentionally blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan laporan Tugas Akhir yang berjudul “ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN METAKAOLIN TERHADAP KUAT TEKAN DAN KEMAMPUAN ADSORPSI LIMBAH METHYLENE BLUE MORTAR GEOPOLIMER BERBASIS FLY ASH” Selama proses penelitian, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dan memberi dukungan kepada penulis, di antaranya adalah:

1. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS.
2. Bapak Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T. dan Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku dosen pembimbing I dan pembimbing II tugas akhir atas segala ilmu, bimbingan, dan waktu yang telah diberikan selama pelaksanaan tugas akhir hingga laporan selesai.
3. Ibu Amalia Rasyida, S.T., M.Sc. selaku dosen wali yang telah mencurahkan segenap waktu, tenaga, dan pikiran untuk membimbing penulis dalam perkuliahan ini, serta memberikan motivasi yang membangun.
4. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS atas waktu dan ilmu yang diberikan.

Penulis menyadari penulisan laporan ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca. Semoga laporan ini dapat berguna bagi penulis dan seluruh pihak terkait.

Surabaya, 12 Juli 2024
Penulis

Yusuf Bayu Wicaksono

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
TITLE PAGE	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
APPROVAL SHEET	vii
PERNYATAAN ORISINALITAS	ix
STATEMENT OF ORIGINALITY	xi
ABSTRAK	xiii
ABSTRACT	xv
KATA PENGANTAR	xvii
DAFTAR ISI	xix
DAFTAR GAMBAR	xxiii
DAFTAR TABEL	xxvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Geopolymer	5
2.2 Pozzolan	8
2.3 Mortar Geopolymer	9
2.3.1 <i>Fly ash</i>	10
2.3.2 Ground Granulated Blast Furnace Slag.....	11
2.3.3 Metakaolin.....	12
2.3.4 Alkali Aktivator.....	13
2.3.5 Agregat Halus	14
2.4 Kuat Tekan Mortar	15
2.5 Adsorpsi.....	16
2.6 <i>Methylene Blue</i>	17
2.7 Penelitian Terdahulu.....	18
BAB III METODOLOGI	21
3.1 Bahan Penelitian	21
3.2 Alat Penelitian	22
3.3 Diagram Alir.....	27
3.4 Metode Penelitian	28
3.4.1 Perencanaan Mix Design	28
3.4.2 Preparasi Bahan	29
3.4.3 Pembuatan Bahan Uji	29
3.4.4 Curing Mortar	31
3.5 Pengujian	31
3.5.1 Xray Fluoresence (XRF)	31
3.5.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	32

3.5.3 Xray Difraction (XRD)	33
3.5.4 Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray(SEM-EDX)	34
3.5.5 Brunauer-Emmett-Teller Surface Area Analysis	35
3.5.6 Compressive Test	38
3.5.7 Pengujian Densitas Mortar	38
3.5.8 Water Absorption Test	39
3.5.9 <i>Methylene Blue Adsorption Test</i>	40
3.5.10 UV-Vis	40
3.6 Rancangan Penelitian	41
3.7 Jadwal Penelitian	43
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	45
4.1 Produk Geopolimer	45
4.2 Hasil Pengujian XRF.....	45
4.3 Hasil Pengujian XRD	47
4.4 Hasil Pengujian FTIR.....	49
4.5 Hasil Pengujian SEM-EDX.....	50
4.6 Hasil Pengujian BET SAA	52
4.7 Hasil Pengujian Densitas.....	54
4.8 Hasil Pengujian <i>Water Absorption</i>	55
4.8.1 Hasil Uji <i>Water Absorption</i> F70G30.....	57
4.8.2 Hasil Uji <i>Water Absorption</i> F70G25M5	58
4.8.3 Hasil Uji <i>Water Absorption</i> F70G20M10	58
4.8.4 Hasil Uji <i>Water Absorption</i> F70G15M15	59
4.8.5 Hasil Uji <i>Water Absorption</i> F70G10M20	59
4.8.6 Hasil Uji <i>Water Absorption</i> F70G5M25	60
4.8.7 Hasil Uji <i>Water Absorption</i> F70M30	60
4.9 Hasil Pengujian <i>Compressive test</i>	61
4.9.1 Hasil Uji <i>Compressive test</i> F70G30	62
4.9.2 Hasil Uji <i>Compressive test</i> F70G25M5	63
4.9.3 Hasil Uji <i>Compressive test</i> F70G20M10	63
4.9.4 Hasil Uji <i>Compressive test</i> F70G15M15	64
4.9.5 Hasil Uji <i>Compressive test</i> F70G10M20	65
4.9.6 Hasil Uji <i>Compressive test</i> F70G5M25	65
4.9.7 Hasil Uji <i>Compressive test</i> F70M30	66
4.10 Hasil Pengujian UV-Vis.....	66
4.10.1 Hasil Pengujian UV-Vis <i>Methylene Blue</i> F70G30.....	69
4.10.2 Hasil Pengujian UV-Vis <i>Methylene Blue</i> F70G25M5	69
4.10.3 Hasil Pengujian UV-Vis <i>Methylene Blue</i> F70G20M10	70
4.10.4 Hasil Pengujian UV-Vis <i>Methylene Blue</i> F70G15M15	70
4.10.5 Hasil Pengujian UV-Vis <i>Methylene Blue</i> F70G10M20	71
4.10.6 Hasil Pengujian UV-Vis <i>Methylene Blue</i> F70G5M25	71
4.10.7 Hasil Pengujian UV-Vis <i>Methylene Blue</i> F70M30	72
4.11 Hasil Pengujian Adsorpsi <i>Methylene Blue</i>	72
4.11.1 Hasil Pengujian Adsorpsi <i>Methylene Blue</i> F70G30	75
4.11.2 Hasil Pengujian Adsorpsi <i>Methylene Blue</i> F70G25M5	75
4.11.3 Hasil Pengujian Adsorpsi <i>Methylene Blue</i> F70G20M10	76

4.11.4 Hasil Pengujian Adsorpsi <i>Metylene Blue</i> F70G15M15.....	76
4.11.5 Hasil Pengujian Adsorpsi <i>Metylene Blue</i> F70G10M20.....	77
4.11.6 Hasil Pengujian Adsorpsi <i>Metylene Blue</i> F70G5M25.....	78
4.11.7 Hasil Pengujian Adsorpsi <i>Metylene Blue</i> F70M30.....	78
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	81
5.1 Kesimpulan.....	81
5.2 Saran	81
DAFTAR PUSTAKA	83
LAMPIRAN	89
UCAPAN TERIMA KASIH.....	127
BIODATA PENULIS	129

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur geopolimer dengan rasio Si/Al yang berbeda	6
Gambar 2.2 Skema proses geopolimerisasi	7
Gambar 2.3 Morfologi <i>fly ash</i> hasil uji SEM.....	10
Gambar 2.4 Morfologi GGBFS hasil uji SEM	11
Gambar 2.5 Morfologi Metakaolin (800°C selama 2 jam) hasil uji SEM	13
Gambar 2.6 (a) NaOH dalam bentuk flake; (b) NaOH dalam wujud larutan dengan konsentrasi 16M	14
Gambar 2.7 (a) Na ₂ SiO ₃ dalam wujud granular; (b) Na ₂ SiO ₃ dalam wujud larutan/water glass	14
Gambar 2.8 Kurva stress-strain untuk kondisi tekan pada (a) mortar variasi; (b) agregat, pasta semen, mortar, dan beton	16
Gambar 2.9 Proses pembentukan gel material geopolimer dan.....	17
Gambar 2.10 Struktur kimia methylene blue (C ₁₆ H ₁₈ ClN ₃ S).....	18
Gambar 3.1 <i>Fly ash</i> tipe C PLTU Paiton	21
Gambar 3.2 GGBFS PT. Krakatau Semen Indonesia	21
Gambar 3.3 <i>Metakaolin Argical M1000</i>	21
Gambar 3.4 <i>Flake</i> NaOH	22
Gambar 3.5 Larutan Na ₂ SiO ₃ (<i>waterglass</i>).....	22
Gambar 3.6 Pasir.....	22
Gambar 3.7 Cetakan Mortar (<i>Trigang</i>)	23
Gambar 3.8 <i>Mixer</i>	23
Gambar 3.9 Ayakan	23
Gambar 3.10 Lumpang dan martil	24
Gambar 3.11 <i>Furnace</i>	24
Gambar 3.12 Alat pengujian XRD.....	24
Gambar 3.13 Alat pengujian FTIR	25
Gambar 3.14 Alat pengujian SEM-EDX	25
Gambar 3.15 <i>Universal Testing Machine</i>	25
Gambar 3.16 Alat uji UV-Vis	26
Gambar 3.17 Alat uji BET	26
Gambar 3.18 Diagram alir penelitian.....	27
Gambar 3.19 <i>Dry Mixing</i>	30
Gambar 3.20 Penambahan larutan Na ₂ SiO ₃	30
Gambar 3.21 Prinsip kerja alat XRF	32
Gambar 3.22 Skema kerja alat FTIR	33
Gambar 3.23 Prinsip Kerja XRD	33
Gambar 3.24 Instrumen pengujian XRD PANalytical	34
Gambar 3.25 Skema Proses Kerja SEM	35
Gambar 3.26 Adsorpsi Tipe I.....	36
Gambar 3.27 Adsorpsi Tipe II	36
Gambar 3.28 Adsorpsi Tipe III.....	37
Gambar 3.29 Adsorpsi Tipe IV.....	37

Gambar 3.30 Adsorpsi Tipe V.....	37
Gambar 3.31 Adsorpsi Tipe VI	38
Gambar 3.32 Penimbangan benda uji	38
Gambar 3.33 Pengujian kuat tekan mortar	38
Gambar 3.34 Konfigurasi sampel selama pengujian (ASTM C1403).....	40
Gambar 3.35 Skema kerja spektrofotometri UV-Vis	41
Gambar 4.1 Gambar sample mortar 1. F70G30 2. F70G25M5 3. F70G20M10 4. F70G15M15 5. F70G10M20 6. F70G5M25 7. F70M30	45
Gambar 4.2 Uji XRD.....	48
Gambar 4.3 Hasil uji FTIR pada material Fly Ash, GGBFS, Metakaolin, dan F70G10M20.	49
Gambar 4.4 Morfologi dari (a) fly ash dan (b) GGBFS dengan perbesaran 2500 \times	50
Gambar 4.5 Morfologi dari Metakaolin perbesaran 2500 \times	51
Gambar 4.6 Morfologi dari Metakaolin perbesaran 2500 \times	51
Gambar 4.7 Hasil pengujian EDX sampel F70G10M20.	52
Gambar 4.8 Grafik isothermal dari pengujian BET Metakaolin.	53
Gambar 4.9 Hubungan diameter pori dengan volume pori metakaolin.....	54
Gambar 4.10 Grafik Densitas Mortar Geopolimer.	55
Gambar 4.11 Grafik <i>Water Adsorption</i> Mortar Geopolimer.	56
Gambar 4.12 Hasil Uji <i>Water Adsorption</i> pada Mortar F70G30.....	57
Gambar 4.13 Hasil Uji <i>Water Adsorption</i> pada Mortar F70G25M5.	58
Gambar 4.14 Hasil Uji <i>Water Adsorption</i> pada Mortar F70G20M10.	58
Gambar 4.15 Hasil Uji <i>Water Adsorption</i> pada Mortar F70G15M15.	59
Gambar 4.16 Hasil Uji <i>Water Adsorption</i> pada Mortar F70G10M20.	59
Gambar 4.17 Hasil Uji <i>Water Adsorption</i> pada Mortar F70G5M25.	60
Gambar 4.18 Hasil Uji <i>Water Adsorption</i> pada Mortar F70M30.	60
Gambar 4.19 Grafik Kuat Tekan Mortar Geopolimer.	61
Gambar 4.20 Grafik uji kuat tekan F70G30.	62
Gambar 4.21 Grafik uji kuat tekan F70G25M5.....	63
Gambar 4.22 Grafik uji kuat tekan F70G20M10.....	63
Gambar 4.23 Grafik uji kuat tekan F70G15M15.....	64
Gambar 4.24 Grafik uji kuat tekan F70G10M20.....	65
Gambar 4.25 Grafik uji kuat tekan F70G25M5.....	65
Gambar 4.26 Grafik uji kuat tekan F70M30.	66
Gambar 4.27 Grafik UV-Vis kalibrasi larutan standar <i>methylene blue</i>	67
Gambar 4.28 Grafik regresi linear larutan standar <i>methylene blue</i>	67
Gambar 4.29 Grafik konversi absorbansi ke konsentrasi larutan adsorpsi <i>methylene blue</i>	68
Gambar 4.30 Grafik absorbansi UV-Vis F70G30.	69
Gambar 4.31 Grafik absorbansi UV-Vis F70G25M5.....	69
Gambar 4.32 Grafik absorbansi UV-Vis F70G20M10.....	70
Gambar 4.33 Grafik absorbansi UV-Vis F70G15M15.....	70
Gambar 4.34 Grafik absorbansi UV-Vis F70G10M20.....	71
Gambar 4.35 Grafik absorbansi UV-Vis F70G5M25.....	71
Gambar 4.36 Grafik absorbansi UV-Vis F70M30.	72

Gambar 4.37 Proses adsorpsi limbah <i>methylene blue</i> pada a) F70G30 b) F70G25M5 c) F70G10M20 d) F70G15M15 e) F70G10M20 f) F70G5M25 g) F70M30.	73
Gambar 4.38 Grafik <i>methylene blue waste removal efficiency</i> pada mortar geopolimer. .	74
Gambar 4.39 Grafik <i>methylene blue waste sorption capacity</i> pada mortar geopolimer....	75
Gambar 4.40 Grafik a) RE dan b) SC F70G30.	75
Gambar 4.41 Grafik a) RE dan b) SC F70G25M5.	76
Gambar 4.42 Grafik a) RE dan b) SC F70G20M10.	76
Gambar 4.43 Grafik a) RE dan b) SC F70G15M15.	77
Gambar 4.44 Grafik a) RE dan b) SC F70G10M20.	77
Gambar 4.45 Grafik a) RE dan b) SC F70G5M25.	78
Gambar 4.46 Grafik a) RE dan b) SC F70M30.	78

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Aplikasi-aplikasi geopolimer berdasarkan rasio Si/Al	5
Tabel 2.2 Perbandingan sifat fisik geopolimer, semen portland, glass, keramik dan paduan aluminium.....	6
Tabel 2.3 Spesifikasi mortar (SNI 03-6882, 2014).....	9
Tabel 2.4 Persyaratan komposisi kimia <i>fly ash</i> (ASTM C618, 2019)	11
Tabel 2.5 Persyaratan kimia GGBFS (ASTM C989-05, 2005).....	11
Tabel 2.6 Penelitian Terdahulu	19
Tabel 3.1 Rasio <i>mix design</i>	28
Tabel 3.2 <i>Mix design</i> per m ³	28
Tabel 3.3 Tabel Rancangan Penelitian.....	42
Tabel 3.4 Jadwal penelitian.....	43
Tabel 4.1 Hasil Uji XRF pada Prekursor.....	46
Tabel 4.2 Rasio SiO ₂ Al ₂ O ₃	47
Tabel 4.3 Komposisi unsur sampel F70G10M20	52
Tabel 4.4 Tabel <i>Water Adsorption</i> Mortar Geopolimer	56
Tabel 4.5 Hasil Kuat Tekan Mortar Geopolimer	62

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan tren fesyen di Indonesia diperkirakan naik terus setiap tahun. Menurut McKinsey Global Fashion Index 2020, pasar fesyen di Indonesia akan mengalami lonjakan sebesar 8-9% pada tahun 2025. Pabrik tekstil juga meningkatkan produksinya untuk mengimbangi kebutuhan pasar. Namun, seiring meningkatnya produksi pabrik tekstil juga terdapat efek samping pembuangan limbah tekstil yang mengakibatkan pencemaran lingkungan terutama pada perairan. Jenis limbah tekstil yang digunakan contohnya *Rhodamine B* dan *Methylene Blue*. Diperkirakan total produksi pewarna buatan dari 100.000 pabrik bisa mencapai 700.000 ton per tahun (Katheresan et al., 2018). Jika terdapat konsentrasi metilen biru yang cukup tinggi di perairan, maka akan mengurangi intensitas cahaya matahari yang masuk ke perairan sehingga mengganggu proses fotosintesis yang dilakukan oleh tumbuhan perairan. Metilen Biru memiliki sifat toksik yang dalam konsentrasi tertentu dapat memberikan efek buruk bagi lingkungan dan makhluk hidup, bahkan dapat menyerang susunan syaraf pusat pada manusia. Senyawa ini juga dapat menyebabkan mutasi genetik dan berpengaruh pada sistem reproduksi (Oladoye et al., 2022). Maka dari itu, dibutuhkan solusi yang dapat menyelesaikan permasalahan terkait limbah *Methylene Blue* tersebut. Salah satu upaya yang dilakukan adalah dengan menggunakan Struktur yang dapat mengadsorpsi limbah tersebut dan diaplikasikan di bidang konstruksi bantalan sungai atau waduk.

Adsorpsi telah menjadi fokus berkelanjutan di bidang penyerapan logam berat dan limbah zat pewarna karena keuntungan berupa efisiensi yang tinggi, sederhana dan biaya yang rendah. Saat ini, banyak jenis bahan telah digunakan sebagai adsorben dan menunjukkan hasil yang baik, seperti karbon aktif, *fly ash*, resin, zeolit, oksida logam, kaolin, bahan magnetik adsorben, dan adsorben fungsional polipirol (Jin et al., 2021). Salah satu material adsorben *Methylene Blue* sekaligus material *pozzolan* yang baik adalah metakaolin (Karuppaiyan et al., 2023). Metakaolin merupakan salah satu bahan yang mengandung aluminosilikat dan sering digunakan pada mortar geopolimer. Metakaolin memiliki ukuran partikel $d_{10} = 1.8 \mu\text{m}$, $d_{50} = 10.3 \mu\text{m}$, $d_{90} = 48.2 \mu\text{m}$ dan *specific surface area* $\approx 18 \text{ m}^2/\text{g}$ (Benavent et al., 2022). Metakaolin diproduksi dari tanah liat alami (kaolin) dengan kalsinasi pada temperatur 600-800°C. Saat ini metakaolin banyak diaplikasikan pada pasta dan mortar geopolimer (Albidah et al., 2021). Menurut Khatib, pengembangan dalam material *pozzolan* memerlukan inovasi, salah satu contohnya di Inggris dalam 6 tahun mendatang akan menutup pembangkit listrik tenaga barubara yang dimana PLTU merupakan salah satu penyumbang *fly ash*.

Mortar Geopolimer tersusun dari material geopolimer yang berfungsi untuk menggantikan pasta semen. Bahan dasar utama geopolimer adalah material yang mengandung silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) dan larutan alkali. Sumber silika dan alumina banyak ditemukan pada limbah industri seperti, *fly ash*, *ground granulated blast furnace slag (GGBFS)*, *silica fume*, *spent bleaching earth (SBE)* dan lain-lain (Johan & Manalip, 2018).

Fly Ash merupakan limbah industri yang berasal dari pembakaran batubara, salah satu contohnya yaitu pada pabrik pembangkit listrik uap (PLTU). Ukuran *Fly Ash* sangat kecil, berkisar antara 0,5 μm sampai 200 μm (Alterary & Marei, 2021a). *Fly ash* bersifat *pozzolan* dan mengandung banyak unsur silika sebanyak 52,4% dan alumina sebanyak 26,5% sehingga dapat digunakan sebagai material geopolimer (Priastiwi et al., 2020). Penggunaan *fly ash* sebagai material geopolimer pengganti semen biasanya dipadukan dengan beberapa material lain. Salah satunya *Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS)* yang

merupakan jenis limbah yang dihasilkan dari peleburan besi dan baja dengan kandungan kalsium, alumina, dan silika yang tinggi, sehingga dapat digunakan sebagai aditif mortar geopolimer. Penambahan GGBFS dengan kandungan CaO sebanyak 36,9% ke dalam campuran tersebut dapat secara signifikan meningkatkan kuat tekan mortar geopolimer dan waktu pengerasan semakin menurun (Johan & Manalip, 2018).

GGBFS dan *fly ash* merupakan prekursor yang paling banyak digunakan untuk geopolimer dan saat ini hampir sepenuhnya digunakan sebagai *pozzolan* untuk produksi semen (Scrivener et al., 2018). Saat ini GGBFS dan *fly ash* digunakan sebagai mortar geopolimer yang merupakan alternatif untuk semen dalam produksi beton. Namun, rata-rata dari mortar tersebut tidak memiliki kemampuan untuk adsorpsi *methylene blue*, maka dari itu penambahan Metakaolin diperlukan untuk membantu kemampuan mortar untuk adsorpsi *methylene blue*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan Metakaolin terhadap kuat tekan dan kemampuan adsorpsi *Methylene Blue* mortar geopolimer berbasis *fly ash* dan GGBFS. Dengan rasio *fly ash*, GGBFS, metakaolin dan larutan alkali yang tepat sesuai dengan *mix design* diharapkan dapat meningkatkan kuat tekan dan kemampuan adsorpsi limbah *methylene blue* pada mortar geopolimer. Pengujian karakterisasi yang dilakukan pada penelitian ini diantaranya uji XRF, FTIR, XRD, SEM-EDX, dan BET. Kemudian, mortar yang dihasilkan dilakukan pengujian densitas mortar, *water absorption*, kuat tekan, adsorpsi *methylene blue*, dan UV-Vis.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh penambahan Metakaolin terhadap nilai kuat tekan mortar geopolimer berbasis *fly ash* dan *ground granulated blast furnace slag* (GGBFS)?
2. Bagaimana pengaruh penambahan Metakaolin terhadap kemampuan mortar geopolimer berbasis *fly ash* dan *ground granulated blast furnace slag* (GGBFS) dalam mengadsorpsi *methylene blue*?

1.3 Batasan Masalah

Supaya diperoleh hasil akhir yang baik serta tidak menyimpang dari permasalahan, maka batasan masalah pada pembahasan ini adalah sebagai berikut:

1. Pasir yang telah dikeringkan dengan oven dianggap memiliki kualitas yang sama.
2. Larutan natrium hidroksida (NaOH) dan larutan natrium silikat (Na_2SiO_3) dianggap tidak memiliki zat pengotor.
3. *Fly ash*, GGBFS, dan metakaolin masing-masing dianggap memiliki kualitas yang sama.
4. Pencampuran adonan geopolimer dianggap homogen.
5. Temperatur penyimpanan benda uji setelah proses *curing* dianggap sama.
6. *Methylene blue* di Tempat uji dianggap tidak ada pengotor.

1.4 Tujuan Penelitian

Dengan adanya rumusan masalah di atas, maka dapat ditarik tujuan sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh penambahan Metakaolin terhadap nilai kuat tekan mortar geopolimer berbasis *fly ash* dan *ground granulated blast furnace slag* (GGBFS)

2. Menganalisis pengaruh penambahan Metakaolin terhadap kemampuan adsorpsi *Methylene Blue* mortar geopolimer berbasis *fly ash* dan *ground granulated blast furnace slag* (GGBFS)

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan harapan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Upaya mengurangi limbah di dunia industri dan membantu mengurangi pencemaran zat *methylen blue* ke perairan.
2. Memberikan pengetahuan mengenai pengaruh penambahan Metakaolin terhadap kuat tekan dan daya adsorpsi pada mortar geopolimer berbasis *fly ash* dan *ground granulated blast furnace slag*.
3. Sebagai acuan penelitian yang berkaitan di masa mendatang.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geopolymer

Pada akhir tahun 1970-an, Profesor Joseph Davidovits melakukan penelitian terhadap polimer tahan api dan memperkenalkan konsep geopolimer, yang diciptakan untuk menggambarkan pengikat aluminosilikat yang diaktifkan alkali (Z. H. Zhang et al., 2016). Geopolimer dibentuk melalui aktivasi alkali hidroksida atau prekursor silikat alkali dan biasanya disuplai dalam bentuk bubuk padat. Bahan padat dan stabil yang terdiri dari aluminosilikat ini merupakan material baru yang dapat digunakan sebagai pelapis, perekat, dan pengikat untuk komposit serat, enkapsulasi limbah, dan semen untuk beton (Davidovits., 2011).

Adapula sistem geopolimer teraktivasi alkali dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

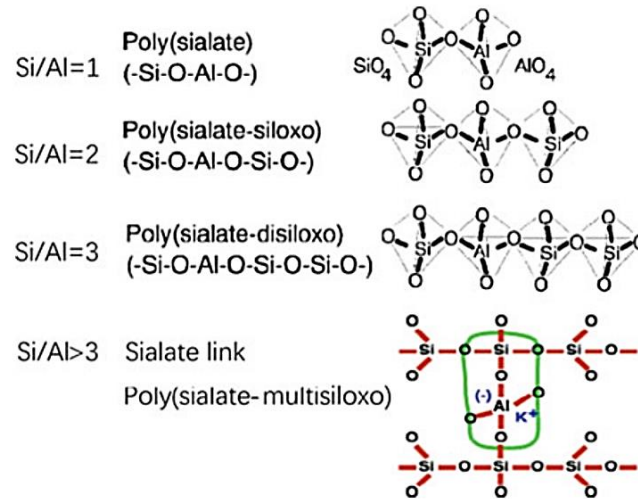
1. Menurut jenis bahan bakunya. Bahan baku untuk menghasilkan geopolimer sangat banyak, antara lain limbah padat seperti metakaolin, fly ash, abu vulkanik, gangue batubara (Zhao et al., 2021). Geopolimer yang dihasilkan dapat disebut sebagai geopolimer berbasis metakaolin, geopolimer berbasis *fly ash*, dan geopolimer berbasis *volcanic ash*. Setiap bahan baku yang berbeda akan menghasilkan produk geopolimer yang memiliki sifat mekanik dan fungsi yang berbeda.
2. Menurut jumlah rasio Si/Al dalam monomer geopolimer. Dapat dilihat pada **Gambar 2.1**, Davidovits membagi geopolimer menjadi empat kategori, yaitu Poli(sialate) ketika Si/Al = 1 (PS), Poli(sialate-siloksi) ketika Si/Al = 2 (PSS), Poli(sialatedisiloxo) ketika Si/Al = 3. Dengan meningkatnya rasio Si/Al, geopolimer dengan Si/Al dari 4 memiliki sifat mekanik yang jauh lebih tinggi dibandingkan geopolimer dengan Si/Al dari 2, hal ini disebabkan meningkatnya ikatan Si-O-Si dan sisa silika sebagai penguat (He et al., 2016). Dapat diketahui bahwa peningkatan Si/Al berbanding lurus dengan meningkatnya sifat mekanik geopolimer namun stabilitas kimia dan ketahanan panasnya menurun. Adapula aplikasi geopolimer berdasarkan jumlah rasio Si/Al yang ditunjukkan pada **Tabel 2.1**

Tabel 2.1 Aplikasi-aplikasi geopolimer berdasarkan rasio Si/Al (Davidovits., 2011)

Rasio Si/Al	Aplikasi
1	Bata, keramik, pelindung kebakaran/api
2	Semen & beton rendah CO ₂ , dan enkapsulasi limbah beracun & radioaktif
3	Komposit <i>fiberglass</i> perlindungan kebakaran/api, peralatan pengecoran, komposit tahan panas (200°C to 1000°C), dan perkakas untuk proses titanium dirgantara
>3	<i>Sealants</i> untuk industri (200°C to 600°C) dan perkakas untuk dirgantara aluminium SPF
20-35	Komposit tahan panas dan api

3. Menurut ion aktivasinya yang umum digunakan adalah Li⁺, Na⁺, K⁺, NH₄⁺, Ca²⁺, dan Ba²⁺. Sifat mekanik dan ketahanan panas geopolimer yang dihasilkan meningkat seiring bertambahnya radius ion alkali. Sebagai contoh, geopolimer berbasis K menunjukkan tingkat geopolimerisasi yang jauh lebih tinggi daripada geopolimer berbasis Na. Selain itu, titik leleh untuk *leucite* (berasal dari geopolimer berbasis K) jauh lebih tinggi daripada *nepheline* (berasal dari geopolimer berbasis Na), dan *pollucite* (berasal dari geopolimer berbasis Cs) memiliki titik leleh tertinggi 1900°C

diantara semua glass-ceramics. Meskipun ion aktivasi K^+ lebih reaktif daripada Na^+ , namun karena harganya lebih mahal, maka yang umum digunakan adalah Na (Cong & Cheng, 2021).



Gambar 2.1 Struktur geopolimer dengan rasio Si/Al yang berbeda (Davidovits. 1989)

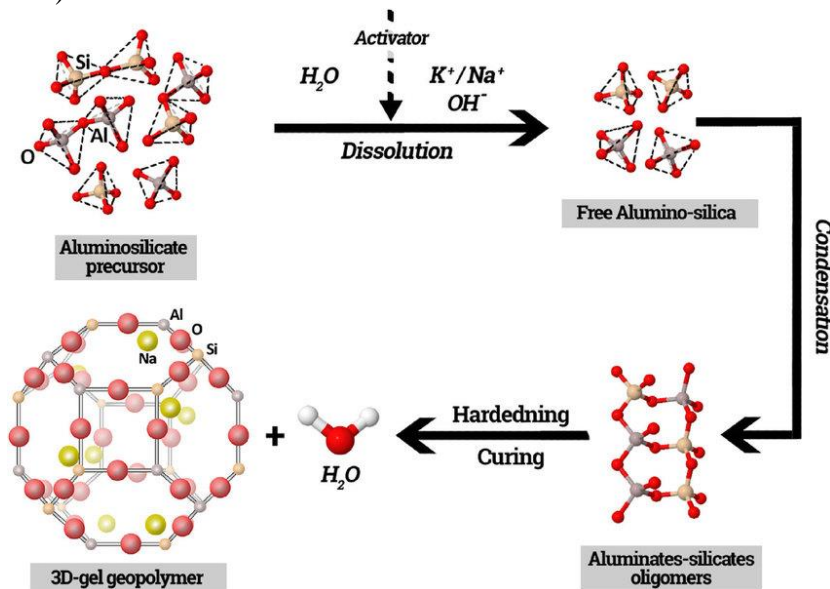
Geopolimer dapat diproduksi pada temperatur yang relative rendah, tetapi dapat berfungsi pada temperatur tinggi, hingga 900-1200°C (da Silva Godinho et al., 2022), dengan sifat mekanik yang ditunjukkan pada **Tabel 2.2** dimana beban yang mampu diterima tak kalah dari semen (20-25 J/cm³), geopolimer sebanding dengan konvensional keramik, resin dan paduan aluminium konduktivitas termal rendah (0,24-0,38 W/m K), kepadatan rendah (2,2-2,3 g/cm³) (H. Y. Zhang et al., 2021), tahan panas, tahan korosi, tahan radiasi, tidak larut dalam pelarut organik, dan anti bocor. Geopolimer memiliki keunggulan lainnya seperti teknologinya sederhana, pembuatan temperatur rendah, konsumsi energi yang lebih rendah, dan polusi lingkungan yang rendah, bahkan dapat menyerap polusi itu sendiri.

Tabel 2.2 Perbandingan sifat fisik geopolimer, semen portland, glass, keramik dan paduan aluminium (H. Y. Zhang et al., 2021)

Jenis	Massa Jenis (g/cm ³)	Modulus elastisitas (GPa)	Kekuatan Tarik (MPa)	Kekuatan lentur (MPa)	Work of fracture (J/cm ³)
Geopolimer	2,2 – 2,3	25 - 27	3,4 – 3,9	5 – 10	20 - 25
Semen Portland	2,3	20	1,6 - 3,3	5 – 10	20
Glass	2,5	20	1,6 – 3,3	5 – 10	20
Keramik	3,0	200	100	150 – 200	300
Paduan Aluminium	2,7	70	30	150 – 400	10.000

Davidovits membagi proses geopolimerisasi menjadi beberapa tahap seperti pada **Gambar 2.2**: disolusi, difusi, polimerisasi dan solidifikasi. Walau pada kenyataannya terjadi secara bersamaan, namun pembentukan material geopolimer melalui proses geopolimerisasi berlangsung secara linier. Pada tahap pertama, pelarutan sumber aluminosilikat padat oleh hidrolisis basa (menyerap air) menghasilkan grup aluminat dan

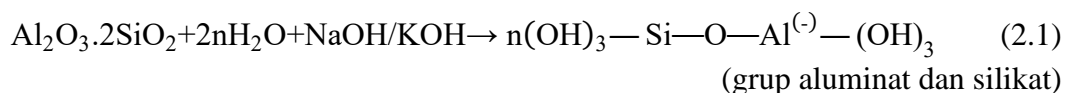
silikat. Pelarutan partikel padat di permukaan mengakibatkan pembebasan aluminat dan silikat (kemungkinan besar dalam bentuk monomer) ke dalam larutan memiliki peranan dalam mengubah material dari partikel padat selama geopolimerisasi (Khale dan Chaudhary, 2007).



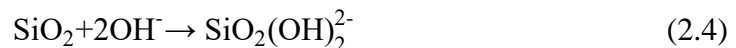
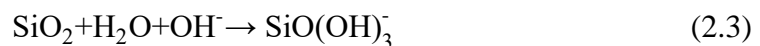
Gambar 2.2 Skema proses geopolimerisasi (Mabroum et al., 2020)

Reaksi-reaksi pada **Gambar 2.2** dapat dijabarkan dalam mekanisme reaksi kimia berikut (Mabroum et al., 2020).

1. *Dissolution* atom-atom Si dan Al dari sumber bahan melalui reaksi ion hidroksida. Reaksi yang ditunjukkan pada Persamaan 2.1 disebut dengan reaksi hidrolisis alkalin dimana material sumber aluminosilikat dipecah oleh larutan alkali. Reaksi berlangsung cepat pada pH tinggi dan secara cepat menghasilkan grup Al–OH dan Si–OH atau biasa dikenal aluminat dan silikat



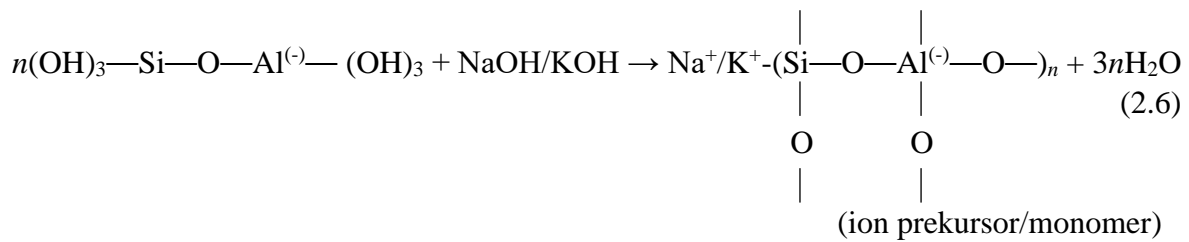
Reaksi disolusi dari sumber SiO_2 dan Al_2O_3 dapat dijabarkan seperti Persamaan 2.2 hingga 2.4 (Liang et al., 2022).



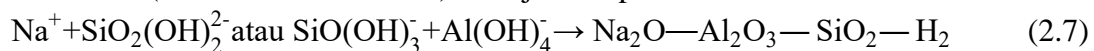
Secara termodinamika, reaksi kimia awal dari disolusi Si dan Al dari sumber aluminosilikat (metakaolin) membentuk grup Si–OH dan Al–OH dapat dituliskan pada Persamaan 2.5 (M. Zhang et al., 2013).



2. Kondensasi ion prekursor menjadi monomer. Pada tahap selanjutnya, Persamaan 2.6 grup aluminat dan silikat membentuk ion prekursor menjadi monomer dalam keadaan larutan aluminosilikat super jenuh yang selanjutnya akan terbentuk oligomer pada fase cair melalui proses pembentukan gel (*gelation*).



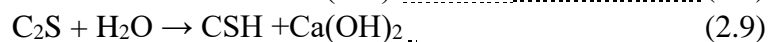
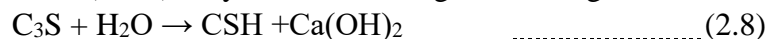
Dalam larutan aluminosilikat jenuh menyebabkan pembentukan gel, sebagai oligomer dalam fase berair membentuk jaringan besar melalui kondensasi. Proses ini melepaskan sejumlah air pada saat proses reaksi. Reaksi kondensasi dari spesies silikat dan aluminat (Tennakon *et al.*, 2014) ditunjukkan pada Persamaan 2.7.



3. *Curing/Hardening*, terjadi proses *Reorganization* dan polikondensasi monomer ke dalam struktur polimer. Setelah gelasi sistem terus berlangsung untuk mengatur ulang dan mereorganisasi, terjadi peningkatan konektivitas jaringan gel, sehingga terbentuk jaringan aluminosilikat tiga dimensi yang kemudian dikenal dengan geopolimer.

2.2 Pozzolan

Pozzolan adalah suatu material yang mengandung silika dan alumina yang tidak memiliki sifat perekat (*cementing*) tersendiri, namun mampu bereaksi terhadap senyawa $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hasil dari reaksi hidrasi antara semen dan air. Dalam keadaan halus *pozzolan* bereaksi dengan kapur bebas dan air menjadi suatu massa padat yang tidak larut dalam air (Putero *et al.*, 2013). Reaksi senyawa semen dengan air membentuk senyawa (CSH) dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang kemudian senyawa $\text{Ca}(\text{OH})_2$ akan bereaksi dengan *pozzolan* membentuk (CSH) dan (CAH). Menurut Newman (1957) senyawa semen dengan air sebagai berikut :



Hasil $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dari Persamaan 2.8 dan 2.9 yang merupakan hasil sampingan dari reaksi hidrasi, bereaksi kembali dengan unsur SiO_2 dan Al_2O_3 pada material *pozzolan* untuk mendapatkan CSH yang lebih banyak dan CAH. Reaksi *pozzolan* terhadap $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ini dapat dilihat pada Persamaan 2.10 dan 2.11 berikut :



Pozzolan dapat ditambahkan pada campuran adukan beton dan mortar untuk memperbaiki kelecakan (keenceran) dan membuat beton menjadi lebih kedap air (mengurangi permeabilitas). *Pozzolan* dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu :

- a) *Pozzolan* alam
Bahan alam yang merupakan sedimentasi dari abu atau larva gunung yang mengandung silika aktif (*volcanic ash*).
- b) *Pozzolan* buatan
Jenis ini merupakan sisa pembakaran dari tungku, maupun pemanfaatan limbah yang diolah menjadi abu yang mengandung silika reaktif dengan proses pembakaran, seperti *fly ash*, *silica fume*, RHA dan lainnya.

Pemakaian material *pozzolan* dalam beton atau mortar akan menghasilkan beton dan mortar yang lebih kedap air. Silika dalam jumlah tertentu dapat berperan sebagai pengisi

antara partikel-partikel pembentuk material, sehingga dengan adanya silika maka porositas beton atau mortar akan menjadi lebih kecil dan selanjutnya kedap air beton dan mortar akan menjadi bertambah sehingga permeabilitas semakin kecil. Hal ini dapat menyebabkan kekuatan material meningkat.

Berdasarkan ACI (1990), material *pozzolan* dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu:

1. Tipe C
 - a) Kadar ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) > 50%.
 - b) Kadar CaO > 5%.
2. Tipe F
 - a. Kadar ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) > 70%
 - b. Kadar CaO < 5%
3. Tipe N
Pozzolan alam atau hasil pembakaran yang dapat digolongkan antara lain *diatomic soil*, *opaline chertz*, *shales*, *tuff*, dan *volcanic ash* dimana bisa diproses melalui pembakaran atau tidak melalui proses pembakaran. Selain itu juga memiliki sifat *pozzolan* yang baik.

2.3 Mortar Geopolymer

Mortar semen tradisional sering kali berfungsi sebagai pengikat umum material dan bahan perbaikan yang banyak digunakan di semua jenis struktur teknik. Banyak peneliti telah membahas kelayakan dan prospek penerapan mortar geopolimer yang digunakan sebagai pengganti mortar semen tradisional. Mortar geopolimer dikembangkan menggunakan alumina teraktivasi alkali dan bahan limbah yang mengandung silika seperti *fly ash*, metakaolin, GGBFS, alkali aktivator, agregat dan lainnya. Selama beberapa tahun terakhir, studi mendalam tentang bahan konstruksi ramah lingkungan dan diversifikasi teknologi preparasi geopolimer, mortar geopolimer telah mendapat daya tarik khusus untuk digunakan sebagai penggantian mortar semen tradisional (P. Zhang et al., 2018).

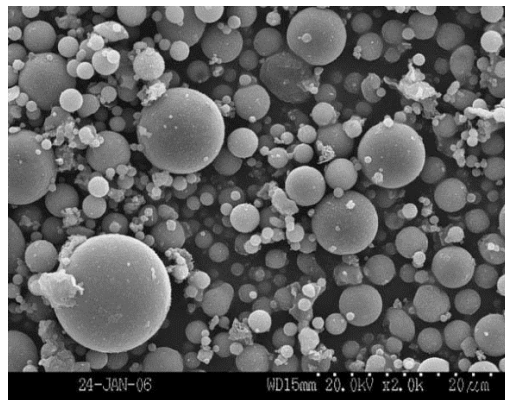
Tabel 2.3 Spesifikasi mortar (SNI 03-6882, 2014)

Tipe mortar	Kuat Tekan Minimum (MPa)	Retensi Air Min %	Kadar udara maks %	Aplikasi
Mortar Tipe M	17,2	75	12	1. Dinding dekat tanah 2. Adukan pipa air kotor 3. Adukan dinding penahan tanah 4. Adukan untuk jalan
Mortar Tipe S	12,4	75	12	Diperlukan untuk daya rekat tinggi dan adanya gaya samping
Mortar Tipe N	5,2	75	14	Untuk pasangan dinding yang tidak menahan beban dan tidak ada persyaratan mengenai kekuatan
Mortar Tipe O	2,4	75	14	Untuk konstruksi dinding yang tidak menahan beban berat dan pengaruh cuaca ringan

Pada **Tabel 2.3** menunjukkan klasifikasi standar mortar menurut SNI 6882, 2014 berdasarkan kekuatannya.

2.3.1 Fly ash

Fly Ash (FA) batubara diproduksi di pembangkit listrik sebagai produk sampingan dari pembakaran batubara. Produk sampingan abu pembakaran batubara meliputi *fly and bottom ash*, *boiler slag*, dan *flue gas*. Partikel FA, produk sampingan utama, adalah partikel menyerupai tepung halus, dan heterogen. Selama pembakaran batu bara, partikel FA biasanya terbawa ke samping dengan bantuan gas buang dan ditahan oleh pengendap baik elektrostatis maupun mekanis. Tetesan cair terbentuk oleh bahan non-organik dalam batubara pada suhu sekitar 1500 C kemudian dipadatkan. Proses ini membentuk benda padat seperti kaca, dan berongga bola dengan permukaan halus, dan ukurannya berkisar dari 0,5 hingga 200 μ m (Alterary & Marei, 2021a). **Gambar 2.3** melihat morfologi *fly ash*.



Gambar 2.3 Morfologi *fly ash* hasil uji SEM (Garg, 2016)

Komposisi FA berbeda-beda tergantung jenis batubara yang dibakar dan kontrol pendinginan. Keragaman FA menjadikannya bahan yang sulit untuk dispesifikasikan. Oleh karena itu, FA digolongkan menjadi dua kelompok utama yaitu fly ash kelas C dan kelas F sesuai dengan ASTM (ASTM, 2008). Menurut ASTM C618 (2019), *fly ash* diklasifikasikan dalam 3 tipe seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.4, yaitu :

1. Tipe N - limbah alam atau *pozzolan* yang dikalsinasi yang memenuhi persyaratan kegunaan dari kelasnya, seperti beberapa *diatomite*, opal dan serpih, tuf serta abu vulkanik atau batu apung dan bahan lain yang mungkin belum dikalsinasi; dan berbagai bahan yang memerlukan kalsinasi untuk mencapai sifat yang baik, seperti beberapa jenis tanah liat dan serpihan
2. Tipe F - *Fly ash* biasanya diperoleh dari pembakaran antrasit (*bright coal*) atau bitumen batubara dengan kualitas yang dipersyaratkan, yang dapat digunakan dalam kelas ini sesuai kebutuhan. Jenis *fly ash* ini memiliki sifat *pozzolan*.
3. Tipe C – *fly ash*, biasanya terbuat dari lignit yang memenuhi syarat atau karbon rendah, dapat digunakan dalam kategori ini jika diperlukan. Selain sifat *pozzolan*, *fly ash* jenis ini juga memiliki beberapa sifat yang lebih mirip dengan semen. *Fly ash* tipe C memiliki kandungan kalsium total lebih dari 10%, dinyatakan sebagai kalsium oksida (CaO).

Berikut merupakan persyaratan komposisi kimia pada tiap tipe *fly ash*:

Tabel 2.4 Persyaratan komposisi kimia *fly ash* (ASTM C618, 2019)

Komponen	<i>Fly ash</i> tipe N	<i>Fly ash</i> tipe F	<i>Fly ash</i> tipe C
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ , min %	70	70	50
CaO, %	Report only	<18%	>18%
SO ₃ , maks%	4	5	5
Kadar air, maks%	3	3	3
Hilang pijar, maks%	10	6	3

2.3.2 Ground Granulated Blast Furnace Slag

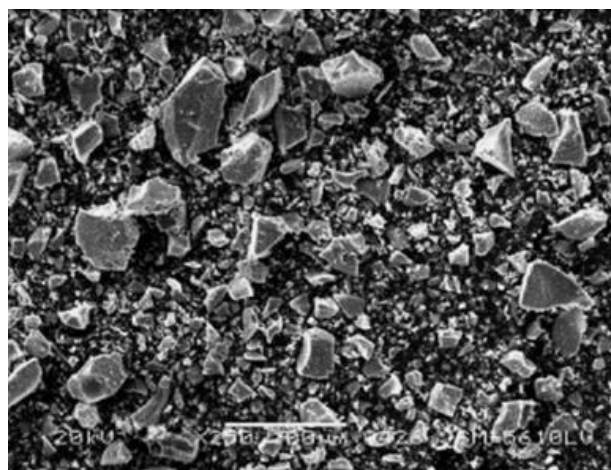
Ground granulated blast furnace slag (GGBFS) merupakan kerak (slag) hasil residu pembakaran tanur tinggi dan merupakan produk non-metal yang materialnya berbentuk butiran/granular. GGBFS sebagian besar terdiri dari kapur, silika dan alumina yang terkandung dalam besi saat dimasukkan dalam tanur. Apabila GGBFS dengan partikel halus akan memiliki sifat yang sangat reaktif dan dapat digunakan sebagai pengganti semen (Wahid & Taufan, 2020).

GGBFS diproduksi di *blast furnace* secara bersamaan dengan Fe. Besi oksida direduksi menjadi Fe di dalam tungku dengan menambahkan fluks seperti batu kapur atau dolomit dan bahan bakar serta zat pereduksi seperti kokas. *Slag* cair menempel di *pig iron* dan suhunya mendekati suhu besi cair, yaitu antara 1400 dan 1600°C. *Slag* akan naik ke permukaan dan dikeluarkan tepat waktu. *Slag* cair jika didinginkan dengan cepat akan membentuk silikat Ca–Al–Mg seperti kaca (Özbay et al., 2016).

Menurut ASTM C989-05 (2005), GGBFS harus memenuhi persyaratan kimia yang ditetapkan untuk dapat digunakan dalam campuran mortar dan beton, ditunjukkan pada **Tabel 2.5**.

Tabel 2.5 Persyaratan kimia GGBFS (ASTM C989-05, 2005)

<i>Sulfide Sulfur</i> (S)	<2,5%
SO ₃	<4%



Gambar 2.4 Morfologi GGBFS hasil uji SEM (Alzeebaree, n.d.)

Gambar 2.4 menunjukkan hasil morfologi dari GGBFS dengan menggunakan pengujian SEM, yang menunjukkan fase *amorf* karena sebagian besar terdiri dari bahan silika. Kandungan silika sebanyak 20% dan butiran GGBFS yang lebih halus meningkatkan reaktivitas campuran sehingga mempercepat proses polimerisasi. Berbagai

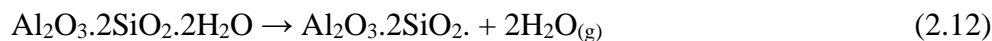
peneliti menggunakan GGBFS sebagai aditif untuk meningkatkan kuat tekan beton geopolimer (Parveen *et al.*, 2017).

2.3.3 Metakaolin

Metakaolin (MK) adalah salah satu jenis tanah liat terkalsinasi dan berasal dari kalsinasi tanah liat kaolin. Saat ini mulai terdapat minat dalam penggunaan MK, misalnya di Inggris, industri pembangkit listrik tenaga batu bara akan tutup dalam 6 tahun ke depan dan abu terbang (fly ash) akan berhenti dihasilkan, sehingga bahan pozzolan alternatif perlu digunakan guna meningkatkan sifat-sifat beton seperti ketahanan dan mengurangi jumlah semen yang digunakan dalam produksi beton. MK dapat digunakan sebagai pengganti sebagian semen dalam pasta, mortar, atau beton. Penggunaan bahan *pozzolan* lainnya seperti *fly ash* atau GGBFS bersama dengan MK juga sering diteliti (Khatib *et al.*, 2018).

MK berbeda dengan bahan pengganti semen lainnya dalam artian bukan merupakan produk limbah yang dihasilkan dari kegiatan uji coba industri dan juga bukan sepenuhnya alami. MK berasal dari mineral tanah liat kaolinit dan diproses untuk berbagai kegunaan dan aplikasi termasuk semen. Metakaolin memiliki ukuran partikel $d_{10} = 1.8 \mu\text{m}$, $d_{50} = 10.3 \mu\text{m}$, $d_{90} = 48.2 \mu\text{m}$ dan *specific surface area* $\approx 18 \text{ m}^2/\text{g}$ (Benavent *et al.*, 2022). Karakteristik utama dari MK adalah aktivitas *pozzolan*, yaitu kemampuan MK untuk bereaksi, dengan adanya air, dengan kalsium hidroksida untuk membentuk produk hidrat gel silikat terhidrasi yang memiliki sifat semen (Gameiro *et al.*, 2014). Poon *et al.*, (2001) menunjukkan bahwa reaktivitas awal MK pada pasta semen campuran lebih tinggi dibandingkan dengan silika fume atau fly ash. Karena reaktivitas awal pasta semen dengan MK yang tinggi, laju perkembangan kuat tekannya lebih tinggi dibandingkan pasta semen yang mengandung silika fume. Curcio *dkk.*, (1998) menunjukkan bahwa mortar yang mengandung MK memiliki tingkat pengembangan kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan silika fume. Peningkatan kekuatan sebesar 30% diperoleh bila semen diganti dengan MK 10% 15%.

MK diproduksi melalui kalsinasi kaolin lempung dalam suhu berkisar antara 600°C hingga 800°C. Proses kalsinasi penting untuk produksi yang tinggi bahan *pozzolan* yang memiliki reaktivitas tinggi. Pada proses kalsinasi, air dihilangkan dari tanah liat kaolinit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dan mengakibatkan struktur material berubah, menghasilkan aluminosilikat amorf ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) yang disebut sebagai metakaolin atau metakaolinit (Ilic *et al.*, 2010). Proses ini dinamakan dengan dehidroksilasi dan dapat dilihat pada persamaan 2.12 berikut:



Penelitian mengenai proses konversi termal kaolinit telah banyak dilakukan dan didapatkan hasil bahwa parameter utama yang berpengaruh secara signifikan pada proses dehidroksilasi adalah suhu pemanasan, durasi dan laju pemanasan, kecepatan pendinginan, dan kondisi sekitar. Hilangnya massa akibat dehidroksilasi kaolinit murni (39,5% Al_2O_3 , 46,5% SiO_2 , dan 14% H_2O) adalah sekitar 14% (Khatib *et al.*, 2018).

Perlakuan termal kaolinit mengarah pada transformasi fase kristal menjadi fase amorf reaktif, yang merupakan unsur aktif yang menentukan kekuatan akhir geopolimer. Perlakuan termal biasanya dilakukan pada suhu berkisar 550–800°C yang disertai dengan dehidroksilasi ion hidroksil yang terikat kuat pada lapisan konstitutif Al. Dengan demikian, kaolinit diubah menjadi metakaolin. Metakaolin juga memiliki struktur berlapis seperti

kaolinit bahkan setelah proses perlakuan panas. **Gambar 2.5** menunjukkan struktur lapisan metakaolin tampak lebih terbuka dibandingkan kaolinit. Selain itu, perlakuan panas akan merusak lapisan heksagonal kaolinit dan menyebabkan susunan atom yang mengubah ion Al kaolinit terkoordinasi heksa menjadi Al terkoordinasi penta dan tetra. ion. Jumlah ion Al yang terkoordinasi penta dan tetra mencerminkan reaktivitas metakaolin.



Gambar 2.5 Morfologi Metakaolin (800°C selama 2 jam) hasil uji SEM (Abdullah et al., 2018)

Berdasarkan ASTM C618 (2015) MK memenuhi kelas N (*Natural Pozzolan*), sedangkan fly ash memenuhi persyaratan Kelas F atau C berdasarkan jenis batubara bitumen dan proses pembakarannya.

2.3.4 Alkali Aktivator

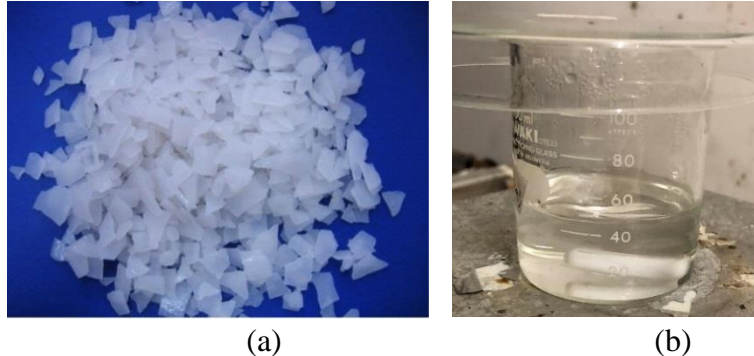
Alkali aktivator adalah material yang digunakan untuk mengaktifkan berbagai bahan aluminosilikat atau produk samping industri atau pertanian lainnya yang kaya akan silikon dan aluminium, seperti FA, GGBFS, dan MK, abu sekam padi (RHA), dll. Penggunaan alkali aktivator pada material *pozzolan* dapat menggantikan bahan baku semen sekaligus menjadi solusi pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh penumpukan produk samping industri semen. Produksi geopolimer FA dilaporkan mengurangi emisi CO₂ sebesar 80% dan membutuhkan energi 60% lebih sedikit dibandingkan proses produksi semen biasa.

Larutan alkali yang paling umum digunakan untuk mengaktifkan bahan aluminosilikat adalah kombinasi natrium hidroksida (NaOH) / kalium hidroksida (KOH) dan natrium silikat (Na₂SiO₃) / kalium silikat (K₂SiO₃). Kalium hidroksida (KOH) memberikan lebih banyak alkalinitas dalam campuran daripada NaOH. Namun dalam prakteknya, NaOH lebih disukai karena memiliki kemampuan yang lebih besar untuk melepaskan monomer silikat dan aluminat. Penggunaan NaOH sebagai aktivator pada mortar geopolimer berbahan dasar *fly ash* dapat menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi daripada menggunakan KOH (Davidovits, n.d.-b). Sifat-sifat geopolimer dapat dioptimalkan lebih baik dengan memilih bahan yang tepat dan merancang campuran yang tepat (Jindal, 2019).

NaOH merupakan salah satu jenis alkali hidroksida yang digunakan dalam suatu material pengikat geopolimer. NaOH tersedia dalam bentuk flake (padat) seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.6 (a)** dengan tingkat kemurnian (97-99%) (Criado *et al.*, 2010). Natrium hidroksida efektif dalam melarutkan mineral dalam *fly ash*. Parameter penting yang harus diperhatikan adalah molaritas NaOH. Pada penelitian yang dilakukan

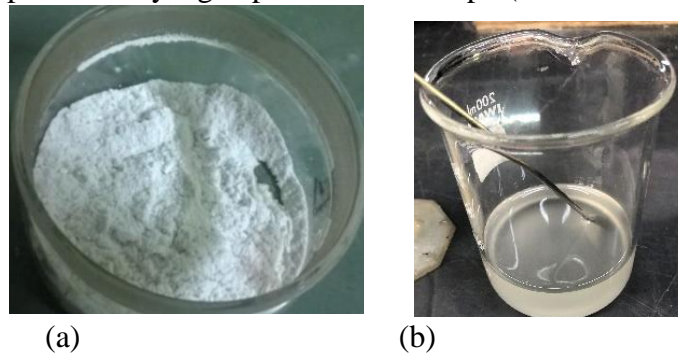
oleh (Kumar et al., 2019), yang menggunakan molaritas 8M, 10M, 12M pada NaOH, dan didapatkan kesimpulan bahwa semakin tinggi molaritas NaOH berbanding lurus dengan peningkatan kekuatan tekan geopolimer.

Pada **Gambar 2.6 (b)** ditunjukkan bahwa NaOH digunakan sebagai bahan pengikat dalam geopolimer, langkah-langkah tertentu diterapkan. Biasanya, NaOH disiapkan secara tertutup, diukur dengan cermat, dan segera larut dalam air untuk membuat larutan dengan konsentrasi molar yang sudah ditentukan sebelumnya. Setelah terbentuk, wadah penyimpanannya ditutup rapat untuk mencegah paparan udara. Ini disebabkan oleh sifat higroskopis NaOH yang membuatnya tidak stabil jika tidak segera dilarutkan.



Gambar 2.6 (a) NaOH dalam bentuk flake (Amer et al., 2018); (b) NaOH dalam wujud larutan dengan konsentrasi 16M

Natrium silikat tersedia di pasaran dalam bentuk cairan dan padatan sesuai **Gambar 2.7** Sodium silicate (Na_2SiO_3) atau waterglass digunakan untuk mempercepat proses polimerisasi. Natrium silikat dalam larutan bervariasi sesuai dengan kekuatannya. Konsentrasi antara natrium hidroksida dan natrium silikat harus tepat agar bisa meningkatkan mutu dan kualitas dari geopolimer. Wadah yang digunakan harus bersih, tanpa minyak, dan tanpa kotoran yang dapat merusak sampel (Saloma et al., 2017).



Gambar 2.7 (a) Na_2SiO_3 dalam wujud granular (Karim, 2017); (b) Na_2SiO_3 dalam wujud larutan/water glass

Natrium silikat juga memiliki sifat higroskopis, namun tidak lebih sensitif dibanding NaOH. Oleh karena itu yang umum digunakan dalam bentuk *liquid* atau dikenal dengan *waterglass*. Selain itu, ada pendapat yang mengatakan bahwa penggunaan alkali silikat dalam wujud padat akan mengurangi kekuatan pada material pengikat geopolimer dibanding menggunakan alkali dalam bentuk larutan (Matinfar & Nychka, 2023).

2.3.5 Agregat Halus

Agregat berpengaruh signifikan terhadap reologi dan mekanik sifat pada mortar dan beton. Agregat halus adalah komponen utama dalam produksi mortar dan memiliki

peranan yang penting dalam mempengaruhi kekuatan mortar. Salah satu contoh dari agregat halus yang sering digunakan adalah pasir. Industri bangunan dan konstruksi juga berkontribusi terhadap permasalahan lingkungan yang disebabkan oleh masifnya penggunaan sumber daya alam seperti pasir alam. Sebagai akibat modernisasi di seluruh dunia dan meningkatnya urbanisasi, permintaan pasir meningkat secara signifikan. Salah satu kemungkinan pemanfaatan limbah industri dan produk sampingannya adalah penggunaannya dalam teknologi mortar (Vandhiyan et al., 2021).

Salah satu fungsi agregat halus dalam campuran adukan mortar adalah mengisi ruang kosong antara partikel. Agregat halus yang digunakan untuk membuat campuran adukan mortar harus sesuai dengan standar yang telah ditentukan. Berdasarkan SNI 03-6820-2002, ukuran butir agregat halus yang diperbolehkan adalah maksimal 4,76mm yang lolos saringan dan berasal dari sumber alam atau buatan. Biasanya agregat halus alami terbentuk dari proses pelapukan batuan, sementara agregat halus buatan didapatkan dari penyaringan batuan lain atau sisa peleburan besi. (SNI 03-6820-2002, 2002)

Persyaratan agregat halus sesuai SK SNI S-04-1989-F :

- a. Butirnya keras dan tidak berpori
- b. Kekal, tidak akan rusak atau hancur oleh cuaca (panas matahari atau hujan). Hingga 12% fraksi hancur saat diuji dengan larutan garam natrium sulfat dan hingga 18% saat diuji dengan garam magnesium sulfat.
- c. Tidak mengandung lumpur (butir halus yang lolos ayakan 0,06mm) lebih dari 5%
- d. Tidak boleh mengandung zat-zat yang reaktif terhadap alkali
- e. Butir agregat yang pipih dan Panjang tidak boleh melebihi 20%
- f. Modulus butir antara 1,5-3,8, dengan variasi butir menurut standar gradasi
- g. Ukuran butir maksimum tidak boleh melebihi dari 1/5 dari jarak minimum antara sisi samping cetakan, 1/3 dari tebal pelat beton, 3/4 dari jarak bersih antar tulangan atau berkas tulangan.
- h. Agregat halus dari laut/pantai, dapat digunakan sesuai petunjuk dari lembaga pemeriksaan bahan-bahan yang terakreditasi.

2.4 Kuat Tekan Mortar

Kuat tekan mortar adalah gaya satuan maksimum yang bekerja pada kubus sampel mortar dengan ukuran tertentu. Gaya maksimum adalah gaya yang bekerja ketika sampel kubus pecah. (SNI 03-6825-2002). Langkah-langkah untuk pengujian kuat tekan mortar sesuai pada SNI 03-1974-1990 dan ASTM C109/C 109M-02. Unit kekuatan material biasanya didefinisikan sebagai tegangan pada material. Data yang dihasilkan pada pengujian ini berupa *load* dan *displacement* yang diolah hingga didapatkan grafik tegangan-regangan untuk masing-masing benda uji. Tegangan didefinisikan sebagai tahanan terhadap gaya-gaya luar. Intensitas gaya yaitu gaya per satuan luas. Gaya yang bekerja tegak-lurus terhadap penampang mortar secara aktual merupakan resultan distribusi gaya-gaya yang bekerja pada penampang melintang dengan arah normal. Grafik pada **Gambar 2.8 (a)** merupakan regangan yang terjadi pada saat beban maksimum (*P ultimate*). Persamaan 2.12 merupakan rumus yang digunakan untuk menghitung kuat tekan mortar:

$$\sigma_m = \frac{P_{max}}{A} \dots\dots\dots (2.12)$$

Besarnya regangan yang terjadi menurut Timoshenko (1986), dapat dihitung dengan Persamaan 2.13.

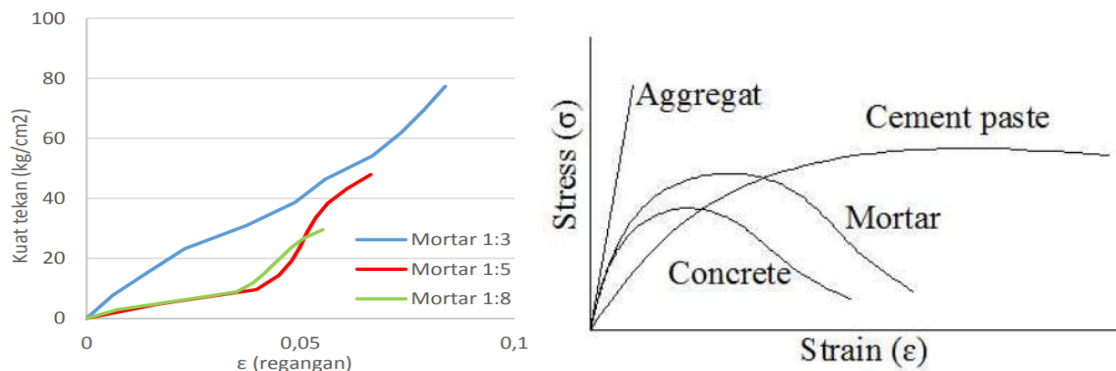
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \dots\dots\dots (2.13)$$

Keterangan :

- σ_m : Kuat tekan mortar, N/ mm²
- P_{max} : Gaya tekan maksimum, N
- A : Luas penampang benda uji, mm²
- ε : Regangan mortar
- Δl : Perpendekan benda uji, mm
- l_0 : Panjang benda uji sebelum pembebanan, mm

Untuk sampel kubus dengan sisi 5cm, maka $A = 25\text{cm}^2$

Sebagaimana beban aksial yang bertambah bertahap, pertambahan panjang terhadap panjang *gage* diukur pada setiap pertambahan beban dan ini dilanjutkan sampai terjadi kerusakan (*fracture*) pada spesimen. Dengan mengetahui luas penampang awal spesimen, maka tegangan normal, yang dinyatakan dengan σ , dapat diperoleh untuk setiap nilai beban aksial dengan menggunakan hubungan dimana P menyatakan beban aksial dalam (Newton) dan A menyatakan luas penampang awal (mm²). Dengan memasangkan pasangan nilai tegangan normal (σ) dan regangan normal (ε), data percobaan dapat digambarkan dengan memperlakukan kuantitas-kuantitas ini sebagai absis dan ordinat. Gambar yang diperoleh adalah diagram atau kurva tegangan-regangan. Berdasarkan Neville (2003) kurva *stress-strain* tipikal untuk agregat, pasta semen, mortar dan beton ditunjukkan pada **Gambar 2.8**.



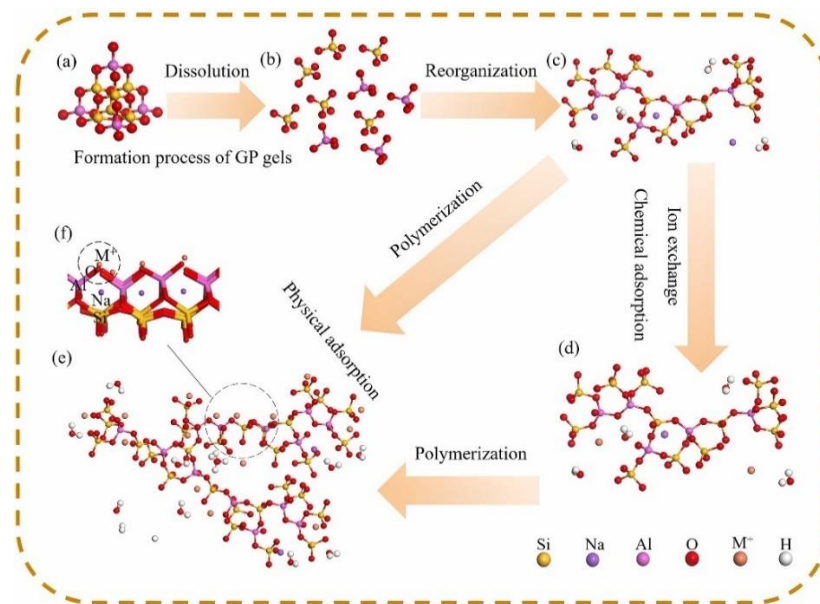
Gambar 2.8 Kurva stress-strain untuk kondisi tekan pada (a) mortar variasi (William et al., 2017) ; (b) agregat, pasta semen, mortar, dan beton (Neville, 2003)

2.5 Adsorpsi

Adsorpsi adalah proses ketika suatu molekul, atau ion, yang disebut adsorbat biasanya berbentuk gas atau cair yang menempel pada permukaan benda padat yang disebut adsorben, namun terkadang adsorben bisa berbentuk cair. Adsorpsi adalah sebuah proses yang terjadi pada permukaan, karena hanya permukaan adsorben saja yang terlibat, dan adsorbat tidak berdifusi ke dalam struktur dari adsorben. Proses sebaliknya, yaitu keluarnya sebuah molekul dari permukaan padat, disebut desorpsi. Proses ini terjadi secara alami di lingkungan. Proses ini memiliki banyak aplikasi industri (misalnya, untuk fraksinasi campuran udara atau untuk menghilangkan emisi gas atau cairan). Bisa memicu proses penting lainnya seperti reaksi enzimatik atau pertukaran ion (Artioli, 2008).

Terdapat dua jenis adsorpsi, yaitu *physical adsorption* (atau fisisorpsi) ketika adsorbat melekat ke permukaan karena kekuatan fisik, dan *chemical adsorption* (atau kemisorpsi) jika adsorbat terikat secara kimia pada permukaan adsorben. Fisisorpsi terjadi berkat interaksi van der Waals (yaitu gaya tarik menarik akibat interaksi elektrostatis yang lemah yang terjadi antar molekul). Jika molekul adsorbate menumbuk permukaan dengan energi rendah maka dengan mudah akan diubah sebagai panas melalui getaran antara benda padat. Maka dari itu, molekul bisa menempel di permukaan. Jika molekul menumbuk permukaan dengan energi yang terlalu besar, molekul tidak bisa menempel di permukaan karena energinya akan dihamburkan oleh adsorben dan memantul (Artioli, 2008).

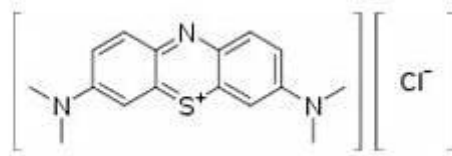
Penelitian yang dilakukan Liang dkk., (2022) menjelaskan tentang bagaimana perilaku adsorpsi geopolimer terhadap ion logam berat, dapat dilakukan secara fisisorpsi dan kemisorpsi. Pada **Gambar 2.9** dijelaskan bagaimana proses pembentukan gel material geopolimer sampai perilaku fisisorpsi dan kemisorpsinya terhadap ion logam berat. (a)–(c) merupakan proses pembentukan gel geopolimer. (d) Secara kemisorpsi, kation menggantikan ion Na^+ untuk menyeimbangkan muatan. Gel geopolimer kemudian dipolimerisasi lebih lanjut menjadi membentuk material geopolimer dengan kekuatan tertentu. (e)–(f) dalam fisisorpsi, kation diadsorpsi oleh geopolimer dan molekul air melalui gaya Coulomb.



Gambar 2.9 Proses pembentukan gel material geopolimer dan perilaku fisisorpsi/kemisorpsi geopolimer (Liang et al., 2022).

2.6 Methylene Blue

Methylene blue (methylthioninium chloride) (MB) pada **Gambar 2.10** adalah pewarna kationik dari keluarga fenotiazin, yaitu senyawa trisiklik yang larut dalam air dan beberapa pelarut organik. Senyawa ini digunakan sebagai pewarna dalam berbagai aplikasi contohnya pada industri tekstil, termasuk pewarnaan biologis dan medis. Dalam dunia medis methylene blue juga digunakan sebagai obat untuk mengobati methemoglobinemia, yaitu kondisi di mana kadar methemoglobin dalam darah meningkat, sehingga menyebabkan kurangnya oksigen dalam tubuh (Silva et al., 2020).



Gambar 2.10 Struktur kimia methylene blue ($C_{16}H_{18}ClN_3S$)

Produksi pewarna sintetik terus meningkat seiring dengan tingginya permintaan, terutama di sektor tekstil dan industri pakaian jadi. Bahan kimia ini diproduksi dalam jumlah besar setiap tahun, mencapai ribuan ton di seluruh dunia. Secara spesifik, produksi tahunan senyawa pewarna industri mencapai sekitar 7×10^5 ton. Contoh-contoh pewarna sintetik meliputi *aniline blue*, *alcian blue*, *basic fuchsin*, *methylene blue*, *crystal violet*, *toluidine blue*, and *congo red*. Dampak negatif yang terkait dengan produksi dan penggunaan pewarna sintetik dalam jumlah besar terletak pada kenyataan bahwa pewarna-pewarna ini tetap ada di lingkungan setelah proses pewarnaan dan penyelesaian akhir. Pewarna sintetik sulit terurai, sehingga umumnya tidak dihilangkan selama proses pengolahan air konvensional. Oleh karena itu, pewarna tersebut tetap ada di lingkungan karena stabilitasnya terhadap suhu, cahaya, air, serta zat lainnya, termasuk sabun dan deterjen. Akibatnya, 'air olahan' yang seharusnya dianggap sebagai air yang telah melalui proses pengolahan menjadi ancaman bagi komponen biotik di lingkungan. (Oladoye et al., 2022).

Methylene blue adalah pewarna kationik yang umum digunakan dalam industri tekstil dan dapat menyebabkan polusi lingkungan jika tidak ditangani dengan baik. Ada beberapa bahan yang dapat digunakan untuk adsorpsi metilen biru, termasuk karbon aktif, zeolit, dan biosorben yang terbuat dari daun limbah tanaman. (Mussa et al., 2023). Karuppaiyan dkk., 2023 melakukan penelitian tentang peran gugus fungsi permukaan metakaolin dalam penyerapan metilen biru, hasil penelitiannya menyatakan bahwa metakaolin adalah bahan penyerap metilen biru yang baik, efisiensi adsorpsi methylene blue hingga mencapai 91.30% didapatkan pada pH of 8–11.5 dengan dosis larutan 1 g/L. Adapula penelitian oleh Eshghabadi & Javanbakht, 2023 yang mengkaji tentang geopolymer foam adsorben berbasis metakaolin untuk mengadsorpsi limbah pewarna metilen biru dari larutan air. Hasil adsorpsi disesuaikan dengan kinetika orde dua semu dengan waktu kesetimbangan 120 menit dan model isotherm Freundlich. Adsorpsi metilen biru tertinggi diperoleh hingga 90 %. Kapasitas adsorpsi maksimum diperoleh sebesar 12,5 mg/g untuk larutan pewarna 10 mg/L pada suhu 40 °C dan pH = 13.

2.7 Penelitian Terdahulu

Geopolimer adalah salah satu alternatif teknologi konstruksi ramah lingkungan yang terus berkembang terus menerus, sehingga dibutuhkan beberapa acuan untuk melakukan pembuatan. Pada **Tabel 2.6** menunjukkan beberapa hasil penelitian mengenai geopolimer. Salah satunya perbandingan rasio larutan alkali hidroksida dan silikat yang ditemukan dengan rasio optimum 2,5 dengan molaritas NaOH 16M dan metode *curing* yang dapat meningkatkan kuat tekan mortar geopolimer berupa metode *oven curing* dengan temperatur 60°C selama 24 jam. Sedangkan untuk prekursor, didapatkan rasio optimum *fly ash* 70% sisanya untuk *admixture* lain. Adapula, nilai kuat tekan tertinggi yang dilakukan oleh Safie (2022) di dapatkan oleh mortar dengan prekursor GGBFS 100%.

Tabel 2.6 Penelitian Terdahulu

No	Peneliti	Hasil Penelitian
1.	Kaur. M., Singh. J., & Manpreet. K. (2018).	Pada penelitian ini, mengkaji kekuatan tekan mortar geopolimer berbasis FA dengan variasi molaritas natrium hidroksida (NaOH) sebesar 12M, 14M, 16M dan disertai dengan perbandingan natrium silikat (Na_2SiO_3) 2,5. Semua campuran geopolimer di <i>curing</i> dalam oven pada temperatur 80°C selama 24 jam dan setelah itu disimpan pada temperatur ruangan hingga saat pengujian. Pengujian kuat tekan di lakukan pada umur 3, 7, 14, dan 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan Na_2SiO_3 meningkatkan kekuatan dalam mortar geopolimer. Kuat tekan tertinggi 40,41 MPa diperoleh dengan memasukkan Na_2SiO_3 bersama dengan NaOH 16M. Selanjutnya peningkatan kuat tekan terlihat seiring meningkatnya molaritas NaOH dan waktu <i>curing</i> .
2.	Paningrahi <i>et al.</i> , (2018); Patel * Shah (2018)	Penelitian ini mengkaji <i>curing</i> geopolimer pada temperatur 50, 60, 70, dan 80°C. Metode curing optimum dari kedua penelitian diperoleh pada temperatur 60°C selama 24 jam yang dapat meningkatkan kuat tekan geopolimer.
3.	Venu, M., Rao, G.M., Kumar, Y.A., Madduru, S.R.C., dan Bellum, R.R. (2020).	Penelitian ini mengkaji perbandingan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 1,5, 2, 2,5, dan 3. Dan didapatkan hasil proporsi optimum perbandingan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 2,5.
4.	Izabela, H.,Mateusz. S., & K. Morz., (2021)	Penelitian ini menagkaji pengaruh penambahan slag pada mortar berbasis <i>fly ash</i> untukaplikasi temperatur tinggi. Menggunakan rasio precursor 100% FA, 90% FA: 10%GGBFS, 75%FA:25%GGBFS, dan 50%FA:50%GGBFS. Didapatkan rasio optimum pada 75%FA:25%GGBFS dengan kuat tekan 105,0 Mpa di umur 90 hari.
5.	Jin. H, Zhang. Y, Wang. Q, Chang. Q, Li. C., (2021)	Penelitian ini mengkaji tentang adsorpsi ion logam berat dan pewarna untuk meningkatkan efisiensi adsorpsi menggunakan geopolimer berbasis metakaolin. Geopolimer sebagai adsorben untuk pengolahan air limbah menunjukkan potensi penyerapan yang baik. Penyesuaian pH dapat memberikan muatan negatif untuk lebih banyak adsorpsi, menghasilkan adsorpsi MB dan Ni^{2+} dengan cepat. Adsorpsi meningkat dengan meningkatnya dosis adsorbent, dan tingkat adsorpsi mencapai 96.0% ketika dosis adsorbent di 0.7 g.
6.	Safie M.O., Jinan. L. A., Yahyia M. H., Abbas H. M., & Ali K. H. (2022).	Penelitian ini mengkaji tentang pengaruh perbedaan rasio <i>fly ash</i> dan GGBFS terhadap kuat tekan mortar geopolimer. Rasio penambahan GGBFS adalah 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, & 100% dengan NaOH 12M dan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ 2,5. Sehingga, didapatkan kuat tekan tertinggi pada rasio 100% GGBFS dengan nilai 78,25 MPa di umur 7 hari.

7.	Fatemeh Eshghabadi, & Vahid Javanbakht., (2023)	Penelitian ini mengkaji tentang <i>geopolymer foam</i> adsorben berbasis metakaolin untuk mengadsorpsi limbah pewarna metilen biru dari larutan air. Hasil adsorpsi disesuaikan dengan kinetika orde dua semu dengan waktu kesetimbangan 120 menit dan model isoterm Freundlich. Adsorpsi metilen biru tertinggi diperoleh hingga 90 %. Kapasitas adsorpsi maksimum diperoleh sebesar 12,5 mg/g untuk larutan pewarna 10 mg/L pada suhu 40 °C dan pH = 13.
8	Karuppaiyan. J ,Jeyalakshmi. R, Kiruthika. S, Wadaan. M. A, Khan. M. F, Kim. W., (2023)	Penelitian ini mengkaji tentang peran gugus fungsi permukaan metakaolin dalam penyerapan metilen biru, hasil penelitiannya menyatakan bahwa metakaolin adalah bahan penyerap metilen biru yang baik, efisiensi adsorpsi methylene blue hingga mencapai 91.30% didapatkan pada pH of 8–11.5 dengan dosis larutan 1 g/L

BAB III METODOLOGI

3.1 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam proses penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Fly ash*

Gambar 3.1 merupakan bahan yang digunakan yaitu *fly ash* Tipe C dari PLTU Paiton.



Gambar 3.1 *Fly ash* tipe C PLTU Paiton

2. *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS)

Gambar 3.2 merupakan bahan yang digunakan yaitu GGBFS dari PT. Krakatau Semen Indonesia.



Gambar 3.2 GGBFS PT. Krakatau Semen Indonesia

3. Metakaolin

Gambar 3.3 merupakan bahan yang digunakan yaitu *Metakaolin Argical M1000* yang lolos ayakan mesh 224.



Gambar 3.3 *Metakaolin Argical M1000*

4. Natrium Hidroksida (NaOH)

Gambar 3.4 merupakan bahan yang digunakan yaitu NaOH berbentuk serpihan (*flake*).



Gambar 3.4 Flake NaOH

5. Natrium Silikat (Na_2SiO_3)

Gambar 3.5 merupakan bahan yang digunakan yaitu Na_2SiO_3 dalam wujud *aqueous* yang lebih dikenal dengan nama *waterglass*.



Gambar 3.5 Larutan Na_2SiO_3 (*waterglass*)

6. Pasir

Gambar 3.6 merupakan bahan yang digunakan yaitu pasir Lumajang dan berfungsi sebagai agregat halus.



Gambar 3.6 Pasir

7. Aquades

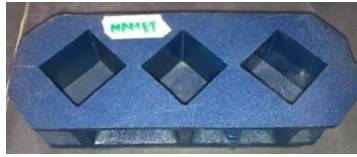
Bahan ini digunakan untuk melarutkan serpihan NaOH.

3.2 Alat Penelitian

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bak
Digunakan untuk menyimpan bahan sebelum di proses
2. Neraca digital
Digunakan untuk menimbang bahan yang akan digunakan pada proses penelitian
3. Cetakan Mortar (*Trigang*)

Gambar 3.7 merupakan alat yang digunakan yaitu trigang untuk mencetak adonan mortar dengan ukuran 5cm×5cm×5cm



Gambar 3.7 Cetakan Mortar (*Trigang*)

4. *Mixer*

Gambar 3.8 merupakan alat yang digunakan yaitu *mixer* untuk mencampur bahan hingga terbentuk adonan yang homogen



Gambar 3.8 *Mixer*

5. Ayakan (*Sieving*)

Gambar 3.9 merupakan alat yang digunakan yaitu ayakan untuk memperoleh *grade* kehalusan bahan yang lebih kecil dari semula. Ayakan yang digunakan berukuran 1.18 mm dan mesh 224.



Gambar 3.9 Ayakan

6. Gelas ukur

Digunakan untuk mengukur volume *aquades* dalam proses penelitian

7. Lumpang dan Martil

Gambar 3.10 merupakan alat yang digunakan yaitu lumpang dan martil untuk menghaluskan



Gambar 3.10 Lumpang dan martil

8. *Furnace*

Gambar 3.11 merupakan alat yang digunakan yaitu *furnace* untuk *curing* pada sampel mortar



Gambar 3.11 *Furnace*

9. Alat Uji XRD

Gambar 3.12 adalah alat uji XRD yang digunakan untuk mengidentifikasi senyawa dalam sampel beserta struktur dan ukuran kristalnya.



Gambar 3.12 Alat pengujian XRD

10. Alat Uji XRF

Digunakan untuk mengetahui komposisi unsur/elemen pada suatu sampel secara cepat.

11. Alat Uji FTIR

Gambar 3.13 adalah alat uji FTIR yang digunakan untuk mengetahui gugus fungsi yang terkandung dalam sampel.



Gambar 3.13 Alat pengujian FTIR

12. Alat Uji SEM-EDX

Gambar 3.14 adalah alat uji SEM-EDX yang digunakan untuk menganalisis morfologi, yaitu bentuk dan ukuran unsur-unsur penyusun objek.



Gambar 3.14 Alat pengujian SEM-EDX

13. Alat Uji Tekan (*Universal Testing Machine*)

Gambar 3.15 merupakan alat UTM yang digunakan untuk mengetahui nilai kuat tekan pada sampel mortar.



Gambar 3.15 *Universal Testing Machine*

14. Alat Uji UV-Vis

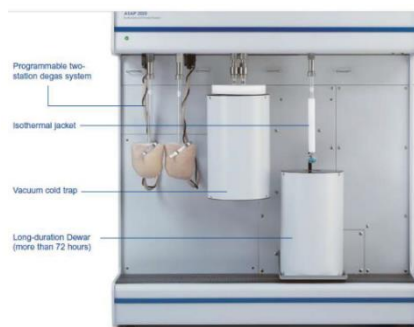
Gambar 3.16 adalah alat uji UV-Vis yang digunakan untuk menganalisis presentase penyerapan limbah *Methylene Blue* pada larutan sebelum dan setelah uji adsorpsi Geopolimer



Gambar 3.16 Alat uji UV-Vis

15. Alat Uji BET

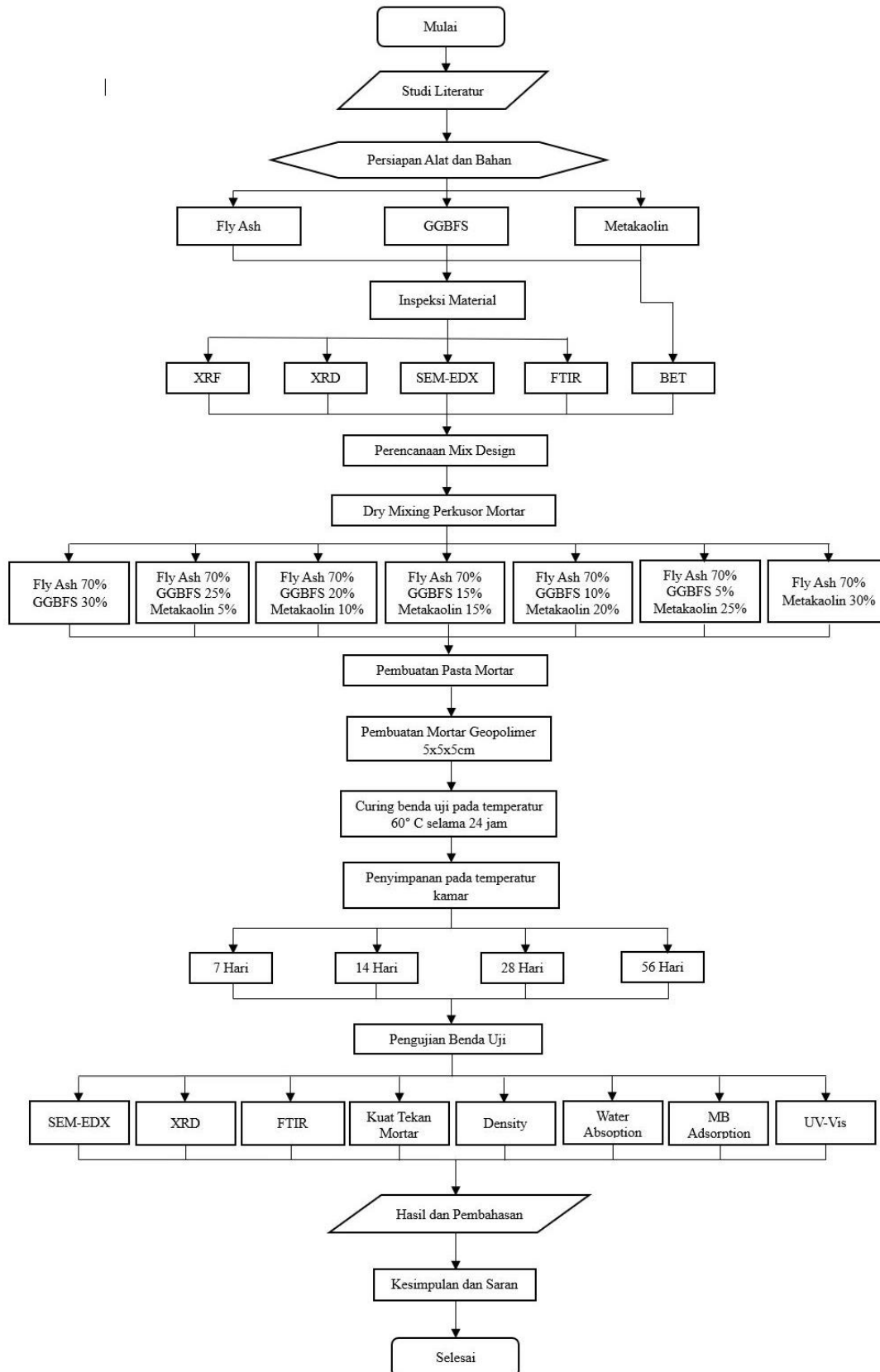
Gambar 3.17 adalah alat uji BET yang digunakan untuk menganalisis luas permukaan dan volume porositas dari metakaolin



Gambar 3.17 Alat uji BET

3.3 Diagram Alir

Diagram alir penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 3.19**



Gambar 3.18 Diagram alir penelitian

3.4 Metode Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat beberapa tahapan proses yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi penambahan Metakaolin terhadap kuat tekan mortar geopolimer berbasis *fly ash* dan GGBFS serta kemampuan adsorpsi dari mortar tersebut. Metode penilitan yang digunakan adalah metode studi eksperimen dimana untuk mendapatkan data yang berhubungan dengan variabel-variabel yang diteliti harus melakukan suatu percobaan. Beberapa tahapan yang dilakukan adalah persiapan alat dan bahan, inspeksi material, perencanaan *mix design* komposisi mortar, dry mixing prekursor mortar, pembuatan pasta mortar, pembuatan benda uji mortar, *curing* benda uji pada temperatur 60°C selama 24 jam, penyimpanan mortar pada temperatur ruangan hingga mencapai umur pengujian (7,14, 28, dan 56 hari) dan pengujian benda uji. Pembuatan dan pengujian pada proses penelitian mortar geopolimer ini dilaksanakan di Laboratorium Beton Material Maju dan Komputasi Mekanik Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

3.4.1 Perencanaan Mix Design

Pada proses ini dilakukan penentuan jumlah masing-masing material yang akan digunakan hingga membentuk pasta mortar geopolimer. *Mix Design* pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi penambahan Metakaolin terhadap kuat tekan mortar pada umur 7, 14, 28, dan 56 hari. Nilai kuat tekan yang dicatat untuk setiap umur adalah rata-rata dari nilai kekuatan yang diperoleh dari tiga spesimen yang identik (Bui & Huynh, 2022).

Larutan aktivator alkali yang digunakan pada penelitian ini adalah natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na₂SiO₃) dengan perbandingan 1:2,5 dengan konsentrasi NaOH 16M. Larutan NaOH disiapkan satu hari sebelum pembuatan pasta mortar geopolimer (Okoye *et al.*, 2015). *Mix design* dipersiapkan dengan rasio yang ditunjukkan pada **Tabel 3.1** berikut:

Tabel 3.1 Rasio *mix design*

Binder : Agregat	Larutan Alkali : Prekursor	Larutan NaOH : Na ₂ SiO ₃
2 : 3	0,55 : 1	1 : 2,5

Sehingga, rasio *mix design* diatas, didapatkan komposisi *mix design* pasta mortar per m³ pada **Tabel 3.2** berikut:

Tabel 3.2 *Mix design* per 500 cm³

Kode	<i>Fly ash</i> (g)	GGBFS (g)	Metakaolin (g)	Na ₂ SiO ₃ (g)	NaOH (g)	Air (g)	Pasir (g)
F70G30	208,649	89,421	0,000	117,1	46,84	73,19	693
F70G25M5	208,649	74,518	14,904	117,1	46,84	73,19	693
F70G20M10	208,649	59,614	29,807	117,1	46,84	73,19	693
F70G15M15	208,649	44,711	44,711	117,1	46,84	73,19	693
F70G10M20	208,649	29,807	59,614	117,1	46,84	73,19	693
F70G5M25	208,649	14,904	74,518	117,1	46,84	73,19	693
F70M30	208,649	0,000	89,421	117,1	46,84	73,19	693

Pada **Tabel 3.2** terdapat kolom dengan kode pada tiap variasi menunjukkan kandungan prekursor yang terdapat pada sampel mortar, dimana F menyimbolkan *fly ash*, G menyimbolkan GGBFS, dan M menyimbolkan Metakaolin. pada mortar variasi penambahan Metakaolin, ditunjukkan oleh kode F70G25M5 dengan kandungan *fly ash* 70%, GGBFS 25%, dan Metakaolin 5 %. Begitupun dengan F70G20M10, F70G15M15, F70G10M20, F70G5M25, dan F70M30.

3.4.2 Preparasi Bahan

Sebelum dilakukan pembuatan pasta dan pengujian mortar geopolimer perlu dilakukan preparasi bahan pada pasir, metakaolin, dan NaOH.

Untuk preparasi pasir adalah sebagai berikut:

1. Siapkan pasir di loyang dan masukkan ke dalam oven dengan temperatur 110°C selama 24 jam,
2. Keluarkan pasir dari oven setelah di oven selama 24 jam, lalu ayak menggunakan ayakan 1,18mm,
3. Diamkan pasir hingga temperaturnya turun ke temperatur ruangan sebelum digunakan untuk pembuatan benda uji.

Selanjutnya, pada proses penelitian ini digunakan larutan NaOH dengan molaritas 16M. Bahan baku yang digunakan berbentuk serpihan NaOH yang tentunya memerlukan preparasi hingga berbentuk larutan 16M NaOH. Preparasi yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Kebutuhan NaOH berbentuk serpihan dalam satuan g dan aquades dalam satuan ml dihitung menggunakan Persamaan 3.1 sebagai berikut.

$$M = \frac{m}{Mr} \times \frac{1000}{V} \dots\dots\dots(3.1)$$

dimana,

M = molaritas larutan NaOH (M)

m = massa serpihan NaOH (g)

Mr= massa relatif NaOH (gr/mol)

V = volume aquades (ml)

2. Aquades yang dibutuhkan diukur menggunakan gelas ukur, dan serpihan NaOH yang dibutuhkan ditimbang menggunakan neraca digital.
3. Serpihan NaOH dimasukkan pelan-pelan ke dalam aquades yang telah ditempatkan di dalam gelas kimia, lalu aduk hingga homogen.
4. Larutan NaOH didiamkan selama 24 jam sebelum digunakan.

3.4.3 Pembuatan Bahan Uji

Benda uji dalam penelitian dicetak pada cetakan mortar berbentuk kubus dengan dimensi 5cm×5cm×5cm. **Tabel 3.3** menunjukkan variasi prekursor dan jumlah benda uji yang dibuat pada penelitian ini. Dengan kode yang mewakili isi per prekursor dan angka menunjukkan rasio prekursor F menyimbolkan *fly ash*, G menyimbolkan GGBFS, dan M menyimbolkan metakaolin, dan terdapat mortar kontrol yaitu F70G30. Kode lainnya merupakan mortar dengan variasi penambahan metakaolin dari 5%, 10%, 15%, 20%, 25% hingga 30%. Ada 3 spesimen yang dibuat pada tiap-tiap variasi.

Proses pembuatan benda uji:

1. Siapkan semua bahan dan alat yang diperlukan,

2. Timbang material yang dibutuhkan, seperti pasir, *fly ash*, GGBFS, metakaolin, dan Na_2SiO_3 sesuai dengan rancangan *mix design* yang telah direncanakan,
3. Lakukan *dry mixing* sesuai **Gambar 3.19** dengan memasukkan prekursor (*fly ash*, GGBFS, dan metakaolin) ke dalam *mixer* dan aduk hingga homogen.



Gambar 3.19 *Dry Mixing*

4. Tambahkan pasir pada adukan prekursor dan aduk kembali hingga homogen.
5. Setelah *dry mixing*, tambahkan larutan NaOH yang telah dibuat sehari sebelumnya ke dalam pasta kering dan aduk hingga homogen.
6. Tambahkan larutan Na_2SiO_3 ke dalam pasta, kemudian aduk hingga semua campuran homogen selama ± 5 menit ditunjukkan pada **Gambar 3.20**.



Gambar 3.20 Penambahan larutan dan NaOH Na_2SiO_3

7. Masukkan pasta tersebut kedalam cetakan mortar (*trigang*) berukuran $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$ yang telah di olesi oli sebelumnya. Pasta dimasukkan secara bertahap 3 lapis, dimana tiap penambahan per lapisan dilakukan pemadatan dengan menumbuk pasta dalam cetakan sebanyak 25 kali.

8. Letakkan cetakan mortar yang telah terisi pasta ditempat teduh dengan temperatur ruangan selama 24 jam.
9. Lepaskan mortar dari cetakan setelah 24 jam maksimal.

3.4.4 Curing Mortar

Temperatur dan durasi curing memainkan peran penting dalam peningkatan kekuatan mortar geopolimer. Pada penelitian yang dilakukan oleh Hardjito dan Rangan (Hardjito *et al.*, 2005) Mortar dicuring pada variasi temperatur 30°C , 45°C , 60°C , 75°C , dan 90°C selama 24 jam. Setelah 24 jam, benda uji disimpan pada temperatur ruangan sebelum pengujian. Penelitian lain menyarankan *curing* benda uji pada temperatur 60°C selama 24 jam (Hardjito *et al.*, 2005, Nuruddin *et al.*, 2011, Jaarsveld *et al.*, 1997).

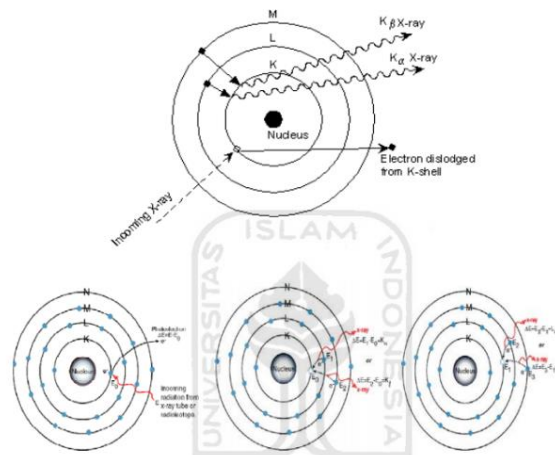
Pada penelitian ini semua benda uji di *curing* pada temperatur 60°C selama 24 jam. *Curing* dijaga konstan karena pada penelitian ini difokuskan pada pengaruh penambahan metakaolin terhadap geopolimer. Setelah 24 jam, benda uji disimpan pada temperatur ruangan terlindung dari sinar matahari dan hujan. Menyimpan spesimen hingga tiba saat pengujian, yaitu saat mortar berumur 7, 14, 28, dan 56 hari.

3.5 Pengujian

Adapun pengujian yang dilakukan pada penelitian ini sebagai berikut.

3.5.1 Xray Fluorescence (XRF)

X-Ray Fluorescence (XRF) merupakan pengujian analisis unsur yang membentuk suatu material tersebut dengan dasar interaksi sinar-X dengan material. Teknik ini digunakan untuk mengukur unsur-unsur, terutama yang terdapat dalam batuan atau mineral. Analisis menggunakan XRF dilakukan berdasarkan identifikasi dan pencacahan sinar-x karakteristik yang terjadi dari peristiwa efek fotolistrik. Efek fotolistrik terjadi karena elektron dalam atom target (sampel) terkena sinar berenergi tinggi (radiasi gamma, sinar-x). Bila energi sinar tersebut lebih tinggi daripada energi ikat elektron dalam orbit K, L atau M atom target, maka elektron atom target akan keluar dari orbitnya. Dengan demikian atom target akan mengalami kekosongan elektron. Kekosongan elektron ini akan diisi oleh elektron dari orbital yang lebih luar diikuti pelepasan energi yang berupa sinar-x. Sinar-x yang dihasilkan merupakan suatu gabungan spektrum sinambung dan spektrum berenergi tertentu (*discreet*) yang berasal dari bahan sasaran yang tertumbuk elektron. Jenis spektrum *discreet* yang terjadi tergantung pada perpindahan elektron yang terjadi dalam atom bahan. Spektrum ini dikenal sebagai spektrum sinar-x karakteristik. Peristiwa tersebut dapat dilihat pada **Gambar 3.21** (Rosika K., 2007).



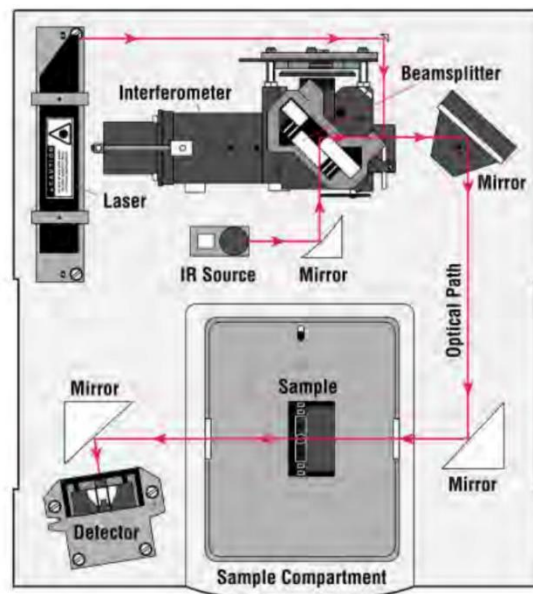
Gambar 3.21 Prinsip kerja alat XRF (Rosika K., 2007)

Prinsip kerja alat XRF adalah sebagai berikut: Sinar-X fluoresensi yang dipancarkan oleh sampel dihasilkan dari penyinaran sampel dengan sinar-x primer dari tabung sinar-x (X-Ray Tube), yang dibangkitkan dengan energi listrik dari sumber tegangan sebesar 1200 volt. Bila radiasi dari tabung sinar-x mengenai suatu bahan maka elektron dalam bahan tersebut akan tereksitasi ke tingkat energi yang lebih rendah, sambil memancarkan sinar-x karakteristik. Sinar-x karakteristik ini ditangkap oleh detektor diubah ke dalam sinyal tegangan (*voltage*), diperkuat oleh *Preamp* dan dimasukkan ke analizer untuk diolah datanya.

3.5.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) adalah salah satu alat atau instrumen yang dapat digunakan untuk mendeteksi gugus fungsi, mengidentifikasi senyawa, dan menganalisis campuran sampel yang dianalisis tanpa merusak sampel, dalam teknik analisis untuk identifikasi bahan. Teknik ini mengukur absorpsi panjang gelombang cahaya inframerah yang dipancarkan oleh bahan yang diuji. Pita absorpsi inframerah ini mengungkapkan struktur dan komposisi molekul tertentu. Tes ini digunakan untuk menentukan ikatan kimia dalam bahan yang diwakili oleh puncak yang berbeda. Tes ini mengacu pada ASTM E1252.

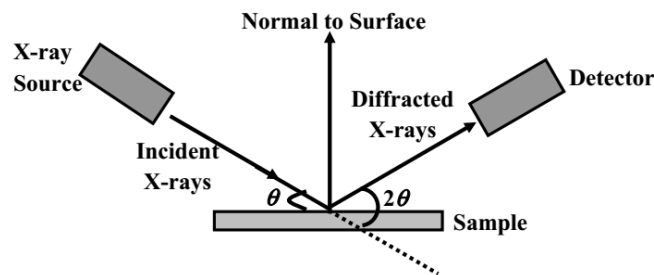
Sederhananya, FTIR dapat mengidentifikasi senyawa, mendeteksi gugus fungsi, dan menganalisis campuran dan sampel selama analisis. Sinar infra merah yang berfungsi sebagai sumber cahaya dibagi menjadi dua berkas, satu melewati sampel dan lainnya melewati komparator. Kemudian secara berurutan melewati *copper*. Setelah melewati prisma atau grating, berkas jatuh pada detektor dan diubah menjadi sinyal listrik yang kemudian direkam oleh rekorder. Selain itu, *amplifier* diperlukan ketika sinyal yang diterima sangat lemah. Skema kerja alat *spektroskopi inframerah* menurut Thermonicolet (2001) ditunjukkan pada **Gambar 3.22**.



. **Gambar 3.22** Skema kerja alat FTIR (Thermonicolet, 2001).

3.5.3 Xray Diffraction (XRD)

XRD merupakan salah satu alat pengujian material yang digunakan untuk analisis kualitatif (identifikasi unsur tunggal dan senyawa) dan analisis kuantitatif (penentuan komposisi, ukuran kristal, dll). Pengujian ini memanfaatkan difraksi dari sinar-X. Sinar-X merupakan salah satu bentuk radiasi elektromagnetik yang mempunyai energi antara 200 eV–1 MeV dengan Panjang gelombang antara 0,5–2,5 Å. Panjang gelombangnya hampir sama dengan jarak antara atom dalam kristal, menyebabkan difraksi sinar-X menjadi salah satu teknik dalam analisa material (Christyaningsih, 2020).



Gambar 3.23 Prinsip Kerja XRD (Wubet, 2019)

Prinsip kerja XRD terdiri dari 4 tahap yang dapat dilihat pada skema **Gambar 3.23**. Tahapan meliputi produksi, difraksi, deteksi dan interpretasi. Untuk dapat melakukan fungsinya, XRD dilengkapi oleh komponen-komponen penting seperti tabung sinar X, monochromator, detector dan lain-lain. Pada tahap produksi, elektron yang dihasilkan ketika filamen (katoda) dipanaskan akan dipercepat akibat perbedaan tegangan antara filamen (katoda) dengan spesimen target (anoda) sehingga terjadi tumbukan dengan spesimen target yang akan menghasilkan radiasi sinar-X yang keluar dari tabung sehingga berinteraksi dengan struktur kristal yang diuji. Selanjutnya, pada tahap difraksi material akan dianalisis struktur kristalnya harus berada dalam fasa padat karena dalam kondisi tersebut kedudukan atom-atomnya berada dalam susunan yang sangat teratur sehingga membentuk bidang kristal. Ketika sinar-X diarahkan pada bidang kristal tersebut, maka

akan timbul pola-pola difraksi ketika sinar-X melewati celah-celah kecil di antara bidang-bidang kristal.

Pada tahap selanjutnya, interferensi konstruktif radiasi sinar-X hasil difraksi struktur kristal material yang diuji akan dideteksi oleh detektor. Agar detektor dapat mendeteksi interferensi konstruktif radiasi sinar-X hasil difraksi struktur kristal, maka posisinya harus berada tepat pada arah sudut pantul radiasi sinar-X tersebut. Tahap terakhir, interferensi konstruktif radiasi sinar-X yang telah dideteksi oleh detektor kemudian akan diperkuat oleh gelombang dengan menggunakan amplifier. Lalu interferensi konstruktif radiasi sinar-X tersebut akan terbaca secara spektroskopi sebagai puncak-puncak grafik yang akan ditampilkan oleh display. Dengan menganalisis puncak-puncak grafik tersebut maka struktur kristal suatu material dapat diketahui.



Gambar 3.24 Instrumen pengujian XRD PANalytical

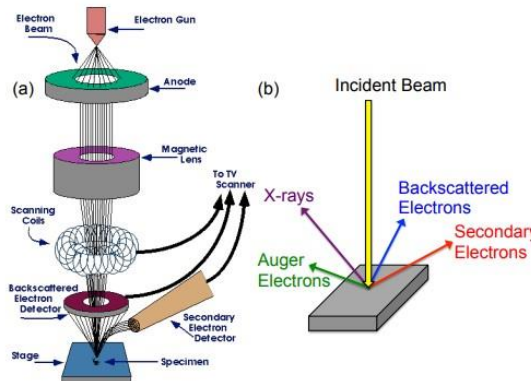
Instrumen yang digunakan merupakan XRD PANalytical seperti **Gambar 3.24** Sampel yang digunakan pada pengujian ini berbentuk serbuk atau padatan kristalin sehingga memiliki bidang kisi yang acak.

3.5.4 Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray(SEM-EDX)

Scanning Electron Microscope (SEM) adalah jenis mikroskop elektron yang menghasilkan gambar sampel dengan memindainya dengan pancaran elektron berenergi tinggi. Elektron berinteraksi dengan atom sampel, menghasilkan beragam sinyal yang memuat informasi tentang topografi permukaan, morfologi, komposisi (unsur dan senyawa beserta jumlah relatif masing-masing) menggunakan EDX (Energy Dispersive X-Ray).

Prinsip kerja SEM adalah berkas elektron yang dihasilkan oleh *electron gun* menyapu permukaan sampel seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3.25**. saat elektron berinteraksi dengan sampel, maka akan dihasilkan *secondary electron* (SE), elektron ini masuk ke dalam detektor dan diubah menjadi sinyal listrik yang menghasilkan Gambar di layar monitor. Sinyal keluaran detektor ini mempengaruhi intensitas cahaya pada tabung monitor, karena jumlah cahaya yang dipancarkan oleh monitor sebanding dengan jumlah elektron yang berinteraksi dengan sampel. Hasil yang ditampilkan dari elektron sekunder ini adalah topografi permukaan sampel. Sementara itu, *backscattered electron* (BE) dilakukan untuk mengamati fasa-fasa. BE memberikan perbedaan kehitaman berdasarkan nomor atom (Z) dari unsur-unsur fasa dalam sampel. Bahan dengan nomor atom tinggi tampak lebih terang daripada bahan dengan nomor atom lebih rendah. Selain itu, terdapat

uji EDX (*Energy Dispersive X-ray*) yang bertujuan untuk mengetahui jenis dan jumlah partikel material dalam sampel. Pengujian EDX dilakukan pada SEM INSPECT dan Gambar 3.25 menunjukkan instrumen uji SEM.



Gambar 3.25 Skema Proses Kerja SEM (Walock, 2013)

3.5.5 Brunauer-Emmett-Teller Surface Area Analysis

Pengujian luas permukaan dan volume porositas dapat dilakukan menggunakan uji Brunauer-Emmett-Teller (BET) surface area. BET ini berdasarkan model Langmuir yang menggambarkan adsorpsi molekul gas pada permukaan padat sebagai proses yang dapat dijelaskan oleh sejumlah asumsi dasar: Setiap situs adsorpsi di permukaan padat hanya dapat diisi oleh satu molekul gas pada satu waktu. Tidak ada interaksi antara molekul gas yang diadsorpsi pada situs yang sama. Setiap situs adsorpsi memiliki energi adsorpsi yang tetap dan sama. Mekanisme kerja BET adalah berdasarkan model adsorpsi Langmuir penyerapan gas Nitrogen oleh permukaan sample pada kondisi isothermal dan vakum, kemudian kerja mesin BET dalam menentukan luas permukaan dan volume porositas adalah sebagai berikut:

$$A_s = \frac{N_A W_M a_{N_2}}{M_{mol}} \dots\dots\dots (3.2)$$

$$V_{iq} = \frac{P.V_{ads}.V_{mol}}{R.T} \dots\dots\dots (3.3)$$

Dimana:

- As** : luas permukaan serat, m²
- Viq** : volume pori-pori yang terisi gas terkondensasi, m³
- NA** : bilangan Avogadro 6,023. 10²³ mol⁻¹
- AN₂** : luas penampang molekul nitrogen adalah 16,2 Å
- Vads** : volume gas yang terserap serat m³
- Wm** : berat media adsorbate, g
- P, R dan T**: standar tekanan dan temperatur ruang vakum

Berat adsorbate (Wm) dihitung dari persamaan linier BET-plot yakni grafik hasil uji BET yang diperoleh dari penyerapan media adsorbate (nitrogen, N₂) pada tekanan relatif P/Po yang memiliki rentang antara 0,05 – 0,3. Harga Wm akan menentukan luas permukaan, volume dan ukuran pori-pori.

$$W_m = \frac{1}{A+B} \dots\dots\dots (3.4)$$

Dengan

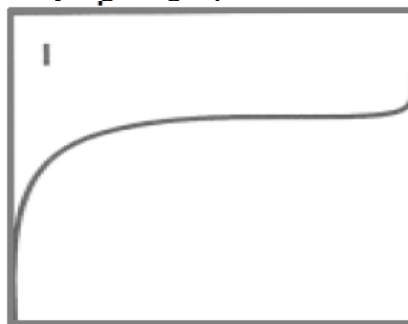
A: slope

B: intercept linier BET-plot.

Sedangkan harga konstanta a dan b diperoleh dari grafik linier BET-plot hasil uji BET absorpsi gas Nitrogen.

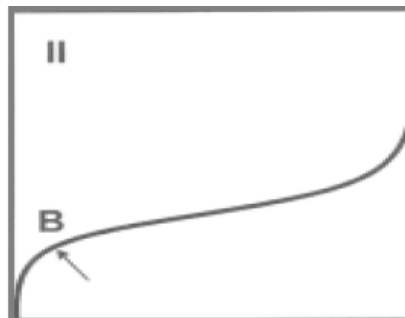
Dalam analisis BET (Brunauer-Emmett-Teller), terdapat enam jenis sistem adsorpsi berdasarkan pola adsorpsi pada grafik isoterm adsorpsi. Berikut adalah keenam jenis sistem adsorpsi tersebut:

1. Tipe I (Monolayer Adsorption): Pada tipe ini, isoterm adsorpsi menunjukkan peningkatan cepat dalam jumlah adsorpsi dengan meningkatnya tekanan, yang kemudian mendatar ketika hampir seluruh permukaan aktif diisi oleh molekul adsorben. Ini biasanya terjadi pada material dengan permukaan yang sangat homogen, seperti zeolit atau karbon aktif yang sangat pori.



Gambar 3.26 Adsorpsi Tipe I

2. Tipe II (Multilayer Adsorption): Pada tipe ini, isoterm adsorpsi menunjukkan peningkatan yang cepat pada awalnya, lalu tetap naik secara lambat seiring dengan peningkatan tekanan. Ini mengindikasikan bahwa adsorpsi gas terjadi pada permukaan material, tetapi molekul gas dapat menumpuk dan membentuk lapisan yang lebih tebal.



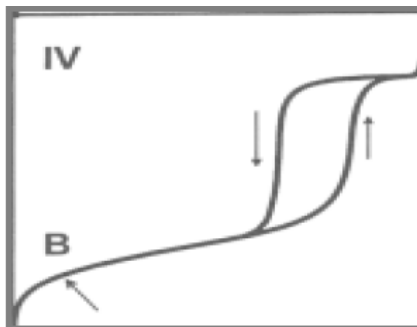
Gambar 3.27 Adsorpsi Tipe II

3. Tipe III (Capillary Condensation): Tipe ini mirip dengan Tipe II, tetapi pada tekanan tertentu, isoterm adsorpsi menunjukkan lonjakan tajam dalam jumlah adsorpsi. Ini mengindikasikan terbentuknya kondensat dalam pori-pori yang lebih kecil, seperti fenomena kapiler.



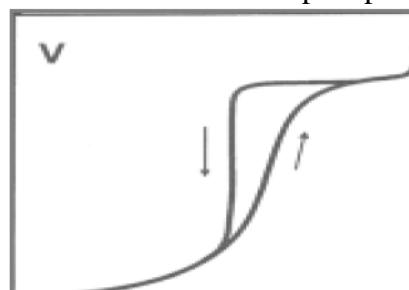
Gambar 3.28 Adsorpsi Tipe III

4. Tipe IV (Hysteresis Loop, Mesoporous Materials): Pada tipe ini, terdapat perbedaan antara kurva adsorpsi dan desorpsi. Ini menunjukkan bahwa terdapat pori-pori dengan ukuran sedang (mesopori) yang menyebabkan histeresis saat molekul gas masuk dan keluar dari pori-pori tersebut.



Gambar 3.29 Adsorpsi Tipe IV

5. Tipe V (Hysteresis Loop, Macroporous Materials): Seperti Tipe VI, namun dengan histeresis yang lebih signifikan. Ini menunjukkan adanya pori-pori yang sangat besar (makropori), dan gas dapat masuk dan keluar dari pori-pori ini dengan lebih sulit.



Gambar 3.30 Adsorpsi Tipe V

6. Tipe VI (Adsorption on Non-Porous or Non-Absorbing Surfaces): Tipe ini mencirikan material yang tidak memiliki pori-pori yang signifikan atau tidak memiliki kemampuan untuk mengadsorpsi gas pada permukaan. Isotherm adsorpsi cenderung mendatar dengan sedikit atau tanpa peningkatan yang signifikan. Dengan mengidentifikasi tipe sistem adsorpsi berdasarkan isotherm adsorpsi, Anda dapat lebih memahami sifat permukaan material dan menggunakannya untuk mengestimasi luas permukaan spesifik menggunakan analisis BET atau untuk karakterisasi material berpori pada umumnya.



Gambar 3.31 Adsorpsi Tipe VI

3.5.6 Compressive Test

Pengujian kuat tekan mortar dilakukan setelah mortar berumur 7, 14, dan 28 hari. Pengujian kuat tekan ini dilakukan untuk mengetahui besarnya nilai kuat tekan dari mortar tersebut. Alat yang digunakan untuk pengujian adalah mesin tekan dengan bidang tumpuan dari baja 60 HRB. Prosedur Pengujian mengacu pada SNI 03-6825-2002 dan ASTM D695:

1. Sebelum dilakukan pengujian kuat tekan, benda uji ditimbang terlebih dahulu.

Gambar 3.32 menunjukkan penimbangan benda uji.



Gambar 3.32 Penimbangan benda uji

2. Benda uji diletakkan tepat di tengah alat *universal testing machine* seperti yang ditunjukkan **Gambar 3.33**.



Gambar 3.33 Pengujian kuat tekan mortar

3. Berikan beban tekan secara perlahan-lahan pada benda uji dengan mengoperasikan mesin sampai benda uji runtuh.
4. Catat beban maksimum yang dapat ditahan

3.5.7 Pengujian Densitas Mortar

Pengujian densitas dilakukan untuk mengetahui kerapatan suatu massa benda dimana kerapatan massa suatu benda adalah perbandingan antara massa benda terhadap volume

benda. Pengujian dilakukan berdasarkan prinsip Archimedes yang mengacu pada ASTM C 905-01. Prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Bersihkan debu/pengotor lain yang melekat pada permukaan sampel uji, catat berat sampel uji di udara (S),
2. Letakkan sampel uji dalam wadah berisi air atau ikat sampel uji pada tali yang diberi penyangga kemudian timbang sampel uji di dalam air (sampel uji+air), catat sebagai (I),
3. Hitung nilai densitas mortar menggunakan Persamaan 3.2 berikut.

$$D_c = \frac{\rho \cdot S}{S - I} \dots \dots \dots (3.5)$$

Dimana,

- D_c = densitas mortar (g/cm^3)
- ρ = densitas air ($0,9975 \text{ g/cm}^3$)
- S = berat benda uji kering di udara (g)
- I = berat benda uji dalam air (g)

3.5.8 Water Absorption Test

Pengujian *water absorption* dilakukan berdasarkan ASTM C1403 ditunjukkan pada **Gambar 3.34** yang menampilkan konfigurasi pengujian *water absorption* pada sampel. Prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut.

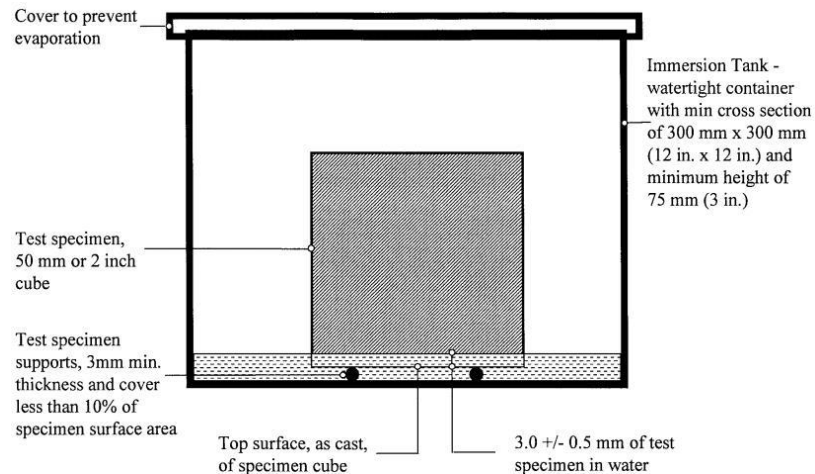
1. Mengukur panjang dan lebar dari sampel uji dan menghitung luas permukaannya
2. Catat berat awal (W_0) masing-masing sampel dalam gram hingga 0,1g sebelum dilakukan pengujian.
3. Tempatkan tangki perendaman pada permukaan datar. Seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 3.34**, sebelum memasukkan masing-masing sampel uji, berikan pengganjal agar permukaan sampel uji tidak kontak langsung dengan alas tangki perendaman.
4. Tambahkan air ke tangki perendaman sehingga sampel uji sebagian terendam dalam $3,0 \pm 0,5 \text{ mm}$ ($0,12 \pm 0,02 \text{ in}$) air. Tutup tangki perendaman untuk meminimalkan penguapan.
5. Catat berat tiap sampel uji dalam gram hingga 0,1 g pada 0,25, 1, 4, dan 24 jam, dan catat sebagai W_t dimana T adalah waktu pengukuran dalam jam. Sebelum dilakukan pencatatan, bersihkan air pada permukaan dari tiap sampel uji menggunakan kain selama 10 detik agar tidak ada sisa air pada permukaan sampel. Menyelesaikan penimbangan dalam 1 menit.
6. Setelah tiap sampel uji ditimbang, masukkan kembali sampel uji ke dalam tangki perendaman seperti yang telah ditentukan dalam langkah (4), dan tutup kembali tangki perendaman.

Persamaan 3.3 digunakan untuk menghitung *water absorption* adalah sebagai berikut.

$$A_T = \frac{(W_T - W_0) \times 10000}{(L_1 \times L_2)} \dots \dots \dots (3.6)$$

Dimana,

- W_T = berat sampel uji pada waktu T dalam gram hingga 0,1 g,
- W_0 = berat awal sampel uji dalam gram hingga 0,1g,
- L_1 = panjang rata-rata permukaan sampel uji mortar dalam mm



Gambar 3.34 Konfigurasi sampel selama pengujian (ASTM C1403)

3.5.9 Methylene Blue Adsorption Test

Prosedur pengujian *methylene blue adsorption* yang dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Mempersiapkan mortar geopolimer.
2. Siapkan akuarium kecil, dan pastikan akuarium dalam keadaan bersih agar tidak ada pengotor yang terlibat
3. Akuarium kecil diisi larutan *methylene blue* dengan konsentrasi 10 ppm.
4. Mortar geopolimer lalu direndam sempurna kedalam larutan *methylene blue* dengan variasi waktu perendaman 8, 16, dan 24 jam.
5. Setelah waktu perendaman 8, 16, dan 24 jam, larutan *methylene blue* diambil untuk diuji UV-Vis

Persamaan 3.9 digunakan untuk menghitung *methylene blue adsorption*. Persamaan Langmuir untuk kapasitas sorpsi pada adsorpsi lapisan tunggal adalah:

$$q = \frac{1+K.c}{Q.K.c} \dots\dots\dots(3.7)$$

Di sini:

q = jumlah zat terlarut yang diserap per unit massa sorben (kapasitas sorpsi) dalam kondisi kesetimbangan, diukur dalam satuan seperti mg/g atau mmol/g.

Q = kapasitas maksimum sorpsi, yaitu jumlah maksimum zat terlarut yang dapat diserap oleh sorben per unit massa dalam kondisi ideal, diukur dalam satuan yang sama dengan q.

K = konstanta Langmuir yang terkait dengan energi ikatan antara zat terlarut dan sorben.

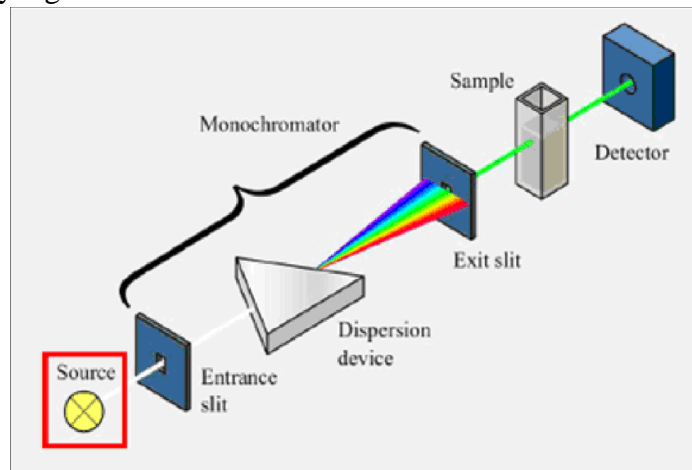
c = konsentrasi zat terlarut dalam larutan pada kondisi kesetimbangan, diukur dalam satuan seperti mol/L atau mg/L.

3.5.10 UV-Vis

Spektroskopi UV-Visible melibatkan pengukuran panjang gelombang dan intensitas serapan cahaya oleh sampel. Serapan cahaya terlihat menyebabkan warna pada zat, contohnya *methylene blue* yang tampak biru karena menyerap cahaya merah. Spektrofotometer terdiri dari sumber cahaya, penahan sampel, grating difraksi atau monokromator, dan detektor. Sampel larutan ditempatkan dalam sel silika, dan dua lampu

digunakan untuk wilayah ultraviolet dan terlihat. Eksperimen melibatkan pengukuran spektrum sebelum dan setelah proses adsorpsi *methylene blue*.

Bagian dasar dari spektrofotometer meliputi sumber cahaya (biasanya lampu pijar untuk panjang gelombang terlihat, atau lampu busur deuterium untuk ultraviolet), penahan sampel, grating difraksi atau monokromator untuk memisahkan panjang gelombang cahaya yang berbeda, dan detektor di **Gambar 3.35**. Detektor umumnya berupa fotodiode atau CCD. Fotodiode digunakan dengan monokromator, yang menyaring cahaya sehingga hanya cahaya dengan panjang gelombang tunggal yang mencapai detektor. Grating difraksi digunakan dengan CCD, yang mengumpulkan cahaya dengan panjang gelombang yang berbeda di piksel yang berbeda.



Gambar 3.35 Skema kerja spektrofotometri UV-Vis (Jackson Foundation, 2009).

Hukum Lambert-Beer, juga dikenal sebagai Hukum Beer-Lambert, adalah prinsip dasar dalam spektrofotometri yang digunakan untuk mengukur konsentrasi larutan berdasarkan penyerapan cahaya oleh zat terlarut. Hukum ini menyatakan bahwa absorbansi (A) suatu larutan pada panjang gelombang tertentu berkaitan secara linear dengan konsentrasi (c) dan ketebalan larutan (b). Hukum Lambert-Beer umumnya dirumuskan sebagai:

$$A = \epsilon \cdot c \cdot b \dots\dots\dots(3.8)$$

Di sini:

A = adalah absorbansi larutan pada panjang gelombang tertentu.

ϵ = koefisien daya serap molari (molar absorptivity) atau kadang disebut sebagai koefisien absorpsi molari ekstinsif, yang bergantung pada sifat-sifat spesifik zat terlarut dan panjang gelombang cahaya yang digunakan.

c = konsentrasi zat terlarut dalam larutan, diukur dalam mol per liter (Molar atau mol/L).

b = panjang lintasan cahaya dalam larutan, diukur dalam sentimeter (cm).

3.6 Rancangan Penelitian

Adapun rancangan penelitian dan pengujian yang akan dilakukan pada penelitian ini seperti yang terlihat pada **Tabel 3.3**.

Tabel 3.3 Tabel Rancangan Penelitian

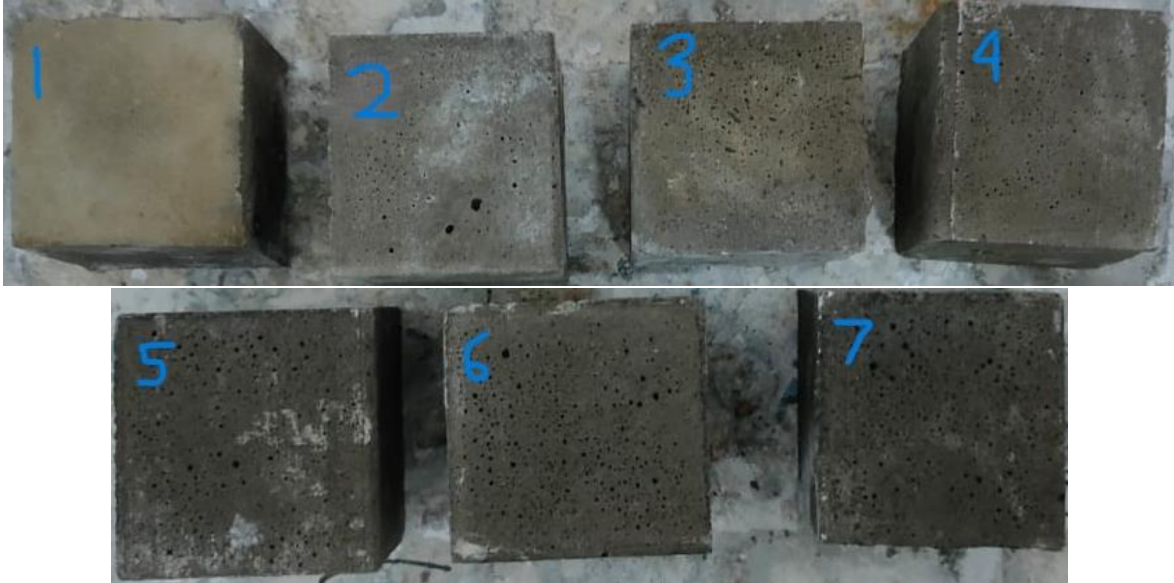
Sampel	FTIR	X R D	X R F	SEM - EDX	B E T	Densitas	Water Absorption	Kuat Tekan	Methylene blue adsorption test	UV - Vis
<i>Fly ash</i>	✓	✓	✓	✓						
GGBFS	✓	✓	✓	✓						
Metakaolin	✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓
F70G30 U07								✓		
F70G25M5 U07								✓		
F70G20M10 U07								✓		
F70G15M15 U07								✓		
F70G10M20 U07								✓		
F70G5M25 U07								✓		
F70M30 U07								✓		
F70G30 U14								✓		
F70G25M5 U14								✓		
F70G20M10 U14								✓		
F70G15M15 U14								✓		
F70G10M20 U14								✓		
F70G5M25 U14								✓		
F70M30 U14								✓		
F70G30 U28								✓		
F70G25M5 U28								✓		
F70G20M10 U28								✓		
F70G15M15 U28								✓		
F70G10M20 U28								✓		
F70G5M25 U28								✓		
F70M30 U28								✓		
F70G30 U56						✓	✓	✓	✓	✓
F70G25M5 U56						✓	✓	✓	✓	✓
F70G20M10 U56						✓	✓	✓	✓	✓
F70G15M15 U56						✓	✓	✓	✓	✓
F70G10M20 U56	✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓
F70G5M25 U56						✓	✓	✓	✓	✓
F70M30 U56						✓	✓	✓	✓	✓

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Produk Geopolimer

Mortar geopolimer pada penelitian ini didapatkan dari hasil sintesis fly ash, GGBFS, dan Metakaolin menggunakan larutan alkali ($\text{NaOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$) yang dicuring pada temperatur 60°C selama 24 jam. Dilakukan pengamatan visual untuk mengetahui bentuk visual dan warna dari masing-masing sampel. Berikut adalah penampilan visual dari mortar geopolimer dengan F70G30, F70G25M5, F70G20M10, F70G15M15, F70G10M20, F70G5M25, dan F70M30.



Gambar 4.1 Gambar sample mortar 1. F70G30 2. F70G25M5 3. F70G20M10 4. F70G15M15 5. F70G10M20 6. F70G5M25 7. F70M30

Pada **Gambar 4.1** sampel mortar berbentuk kubus ukuran $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ yang akan diuji kuat tekan mortar, densitas mortar, water absorption test, dan karakterisasi berupa XRD, FTIR, dan SEM-EDX pada sampel tersebut. Dari tampilan secara visual mortar geopolimer tidak menunjukkan perbedaan fisik secara signifikan. Hanya saja mortar dengan rasio GGBFS yang lebih banyak memiliki tampilan yang lebih terang karena material GGBFS yang digunakan berwarna putih dan mortar dengan rasio metakaolin lebih tinggi memiliki tampilan warna lebih gelap. Perbedaan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.1 dimana seiring dengan penambahan metakaolin maka warna dari sample mortar juga akan bertambah gelap. Selain itu, Pori yang terbentuk juga bertambah seiring dengan penambahan massa metakaolin.

4.2 Hasil Pengujian XRF

Uji XRF pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui unsur-unsur kimia yang terkandung pada material prekursor (fly ash, GGBFS, dan Metakaolin). Tabel 4.1 menunjukkan hasil uji XRF dari material prekursor. Pada Tabel tersebut menunjukkan bahwa komponen utama pozzolan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (ASTM C618-92a) untuk fly ash, dan Metakaolin masing-masing adalah 66,5%, dan 90,12%.

Tabel 4.1 Hasil Uji XRF pada Prekursor

Senyawa	Conc%		
	Fly Ash	GGBFS	Metakaolin
Al ₂ O ₃	10,00	7,19	26,0
SiO ₂	29,0	23,5	59,0
Fe ₂ O ₃	26,40	1,38	5,12
P ₂ O ₅	-	-	2,0
SO ₃	0,97	1,4	-
K ₂ O	2,14	0,31	1,90
CaO	24,5	62	0,49
TiO ₂	1,85	1,2	5,05
V ₂ O ₅	0,085	0,02	0,12
Cr ₂ O ₃	0,03	-	0,044
MnO	0,51	0,58	-
BaO	0,61	0,3	-
CuO	0,12	-	-
ZnO	0,04	-	0,03
SrO	0,669	-	0,028
Rb ₂ O	0,046	-	0,023
ZrO ₂	0,1	-	0,31

Fly ash yang digunakan pada penelitian ini didapat dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap Paiton Probolinggo. Dari **Tabel 4.1** tersebut, fly ash yang digunakan tergolong dalam fly ash tipe C karena memenuhi persyaratan ASTM C618 19 dengan kadar CaO didalamnya lebih dari 18% (CaO>18%) dan kadar SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ ≥50%. Telah tercantum pada Tabel 4.1 di dapatkan kadar CaO pada fly ash sebesar 24,5%, dan kadar SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ = 66,5%.

GGBFS pada penelitian ini merupakan produk yang didapatkan dari PT. Krakatau Semen Indonesia. Menurut ASTM C 989, GGBFS terutama terdiri dari silikat dan aluminosilikat kalsium. Dan agar dapat digunakan GGBFS harus memiliki persyaratan kimia seperti kadar S dengan batas maksimum 2,5% dan SO₃ maksimum 4%. Pada hasil XRF GGBFS kadar SO₃ sebesar 1,4%, tidak melebihi batas maksimum yang ditetapkan. Kadar terbesar yang didapatkan adalah CaO sebesar 62%. GGBFS pada prekursor digunakan sebagai addition CaO yang dapat mempercepat proses pengerasan pasta geopolimer dan meningkatkan kuat tekan mortar.(Özbay et al., 2016)

Material Metakaolin pada penelitian ini didapatkan dari distributor PTMBA yang ada di Indonesia. Metakaolin yang digunakan pada penelitian ini termasuk Metakaolin jenis Argical M-1000. Kadar Oksida yang paling banyak jumlahnya di metakaolin adalah Silikat dengan nilai 59% dan Alumina dengan nilai 26%, dan kadar SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ 90,12%. Metakaolin pada prekursor digunakan sebagai material untuk menadsorpsi Metilen biru dan juga untuk memperbanyak komponen aluminosilikat.(Albidah et al., 2021)

Berdasarkan ASTM C-618 suatu material dapat memiliki sifat pozzolan apabila memiliki kandungan senyawa SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ minimum 70%, CaO maksimum 5%, dan SO₃ maksimum 4%. Senyawa SiO₂ memegang peranan lebih penting dibandingkan dua senyawa lain, karena senyawa SiO₂ mampu bereaksi dengan Ca(OH)₂ membentuk CSH yang mampu meningkatkan kekuatan campuran beton/mortar (Sithole & Mashifana, 2020). dilihat dari kandungan metakaolin pada **Tabel 4.1**, metakaolin yang digunakan pada

penelitian ini dapat digunakan sebagai pozzolan karena mengandung $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ sebesar 90,12% sesuai mutu pozzolan yang disyaratkan. Pada dasarnya metakaolin tidak memiliki kemampuan mengikat seperti halnya semen. Namun, dengan penambahan air dan aktivator akan menimbulkan reaksi kimia antara oksida silikat metakaolin dengan aktivator. Reaksi kimia tersebut, senyawa alumino silikat pada metakaolin akan memiliki kemampuan mengikat layaknya semen Portland (Papa et al., 2017).

Dari data Hasil uji XRF tersebut kita dapat juga menentukan Perbandingan antara SiO_2 dan Al_2O_3 . Untuk mendapatkan Perbandingan antara SiO_2 dan Al_2O_3 dapat dilakukan dengan cara yaitu mencari kuantitas SiO_2 dan Al_2O_3 dari setiap precursor. Dimana didapatkan Perbandingan antara SiO_2 dan Al_2O_3 dari Fly ash senilai 1.71, GGBFS senilai 1.92, dan dari Metakaolin senilai 1.33. Perbandingan antara SiO_2 dan Al_2O_3 dari setiap variasi adalah pada **Tabel 4.2** berikut.

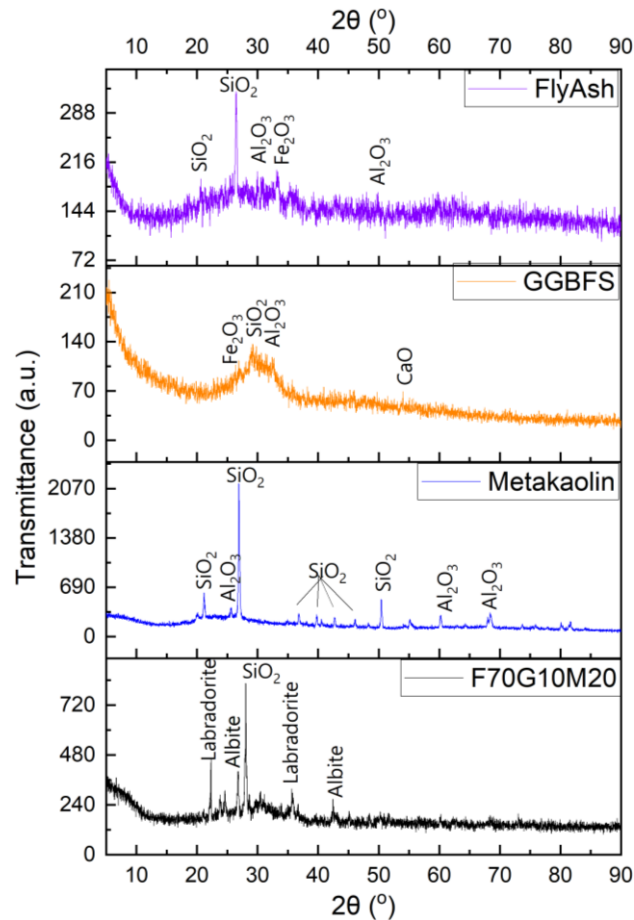
Tabel 4.2 Rasio SiO_2 Al_2O_3 .

Material	SiO_2	Al_2O_3	Rasio
Fly Ash	17,42445	10,19613	1,70893
GGBFS	14,11981	7,33102	1,92604
Metakaolin	35,44974	26,50993	1,33722
F70G30	16,43306	12,08317	1,36000
F70G25M5	17,49955	10,29554	1,69972
F70G20M10	18,56605	11,25449	1,64966
F70G15M15	19,63255	12,21343	1,60746
F70G10M20	20,69904	13,17238	1,57140
F70G5M25	21,76554	14,13132	1,54023
F70M30	22,83203	15,09027	1,51303

4.3 Hasil Pengujian XRD

Pengujian XRD bertujuan untuk menganalisis suatu unsur atau senyawa yang terkandung pada material FA, GGBFS, dan Matsksolin, dan pada sampel hasil sintesis mortar geopolimer. Kemudian diuji dengan menggunakan alat XRD PANanalytical dengan range sudut $2\theta = 10^\circ - 90^\circ$ dan panjang gelombang $\text{Cu-K}\alpha$ $1,54060\text{\AA}$. Hasil dari pengujian dianalisis menggunakan software High Score Plus untuk membandingkan puncak yang terbentuk sesuai dengan standar Inorganic Crystal Structure Database (ICSD) dan Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS) yang sesuai dengan fasa tersebut. Sehingga didapatkan hasil pola XRD sebagai berikut.

Pada **Gambar 4.2** menunjukkan pola XRD dari tiap material prekursor yaitu, fly ash, GGBFS, dan Metakaolin. Pola XRD fly ash terdiri dari fasa amorf dengan fasa kristal quartz/kuarsa (SiO_2)(ICSD# 01-089-8939). Fase-fase yang terbentuk sesuai dengan Fly ash tipe C. Pada **Gambar 4.2** menunjukkan peak dengan intensitas tinggi pada $2\theta = 20,649^\circ$, $26,415^\circ$ dan $49,712^\circ$ berupa quartz (SiO_2) (ICSD# 01-089-8939). Pada rentang 17° sampai 50° ada semacam bentuk seperti punuk dimana ini menunjukkan fase amorf dari aluminosilicate. Tidak ada peak CaO yang teridentifikasi dalam pola XRD, menunjukkan bahwa CaO dalam FA terutama dalam fasa amorf. Fly ash yang berfasa amorf lebih reaktif sehingga lebih mudah mengalami pelarutan Si dan Al oleh larutan alkali. (M. Zhang et al., 2013)



Gambar 4.2 Uji XRD.

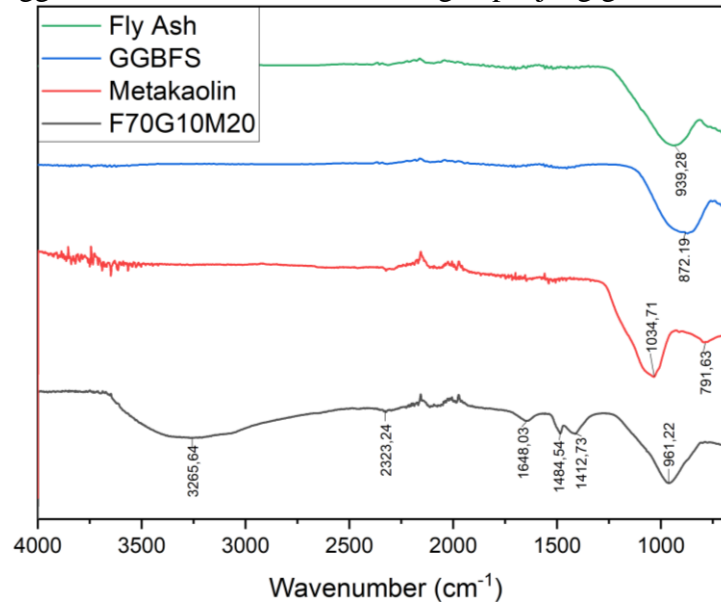
Hasil XRD dari GGBFS menunjukkan sifat yang sangat amorf, yang efektif untuk mengontrol reaksi geopolimer. Pada GGBFS terdeteksi peak dengan intensitas lemah yang menunjukkan fasa quartz (SiO_2) (ICSD# 01-075-1381), peak tersebut terdeteksi pada $2\theta = 28,9^\circ$. Pada $2\theta = 20^\circ$ sampai 39° adanya gundukan yang menunjukkan material GGBFS memiliki fase amorf yang paling banyak didominasi oleh Quartz, Alumina, dan CaO (Sithole & Mashifana, 2020). Hasil tersebut sesuai dengan hasil uji komposisi dengan metode XRF, GGBFS yang digunakan pada penelitian ini kaya akan kalsium.

Hasil XRD dari Metakaolin menunjukkan sifat yang crystalline dimana peak-peak yang dihasilkan tersebar dari rentang 2θ : 21° sampai 61° . Peak yang dihasilkan, yaitu senilai 2θ : 21° , $26,86^\circ$, $50,56^\circ$ dan $60,55^\circ$. Dimana hasil dari XRD tersebut sesuai dengan peak-peak yang ada pada Metakaolin yang menunjukkan fasa Quartz (SiO_2) (ICSD# 01-083-2467).

Hasil XRD dari komposit geopolimer F70G10M20 menunjukkan adanya karakteristik dari ketiga material penyusun, dimana terdapat peak utama komposit geopolimer F70G10M20 pada 2θ : $22,3^\circ$ dan 28° dari metakaolin yang berupa SiO_2 (ICSD# 01-078-1254). Pada 2θ : $22,03^\circ$, $23,65^\circ$, $23,99^\circ$, $24,34^\circ$, $27,88^\circ$ dan $28,02^\circ$ terbentuk ($\text{Al}_{1,2}\text{Ca}_{0,2}\text{Na}_{0,8}\text{O}_8\text{Si}_{2,8}$) (*albite*) (ICSD# 00-041-1480) dan ($\text{Ca}_{0,68}\text{Na}_{0,30}(\text{Al}_{1,66}\text{Si}_{2,34}\text{O}_8)$) (*labradorite*) (ICSD# 01-083-1372). Lalu juga lengkungan fasa amorf dari CaO pada 2θ : 20° hingga 40° yang berasal dari material GGBFS dan Fly Ash. Hal tersebut dapat terjadi karena proses aktivasi, fase kristal yang terbentuk dilarutkan dalam larutan basa dan fasa aluminosilikat terbentuk melalui reaksi geopolimerisasi pembentukan produk baru dengan struktur berbeda (El Alouani et al., 2019).

4.4 Hasil Pengujian FTIR

Pengujian FTIR bertujuan untuk mengetahui gugus fungsi pada material prekursor yang digunakan, yaitu fly ash tipe C, GGBFS dan Metakaolin. Pengujian FTIR pada penelitian ini menggunakan alat Nicolet IS10 dengan panjang gelombang 4000-650 cm^{-1} .



Gambar 4.3 Hasil uji FTIR pada material Fly Ash, GGBFS, Metakaolin, dan F70G10M20.

Analisis pada **Gambar 4.3** dari hasil FTIR Fly Ash menunjukkan adanya peak pada titik 939,28 cm^{-1} yang terjadi karena vibrasi asimetrik Si-O-T (T = Si atau Al) *Stretching*. Begitu pula pada material GGBFS yang memiliki peak pada titik 872,19 cm^{-1} karena vibrasi asimetrik Si-O-T (T = Si atau Al) *Stretching* (El Alouani et al., 2019). Perbedaan antara puncak pita dari Fly ash dan GGBFS disebabkan oleh sifat dari Aluminosilikat yang amorf.

Tabel 4.3 Daerah serapan dan ikatan pada mortar geopolimer dan material penyusunnya.

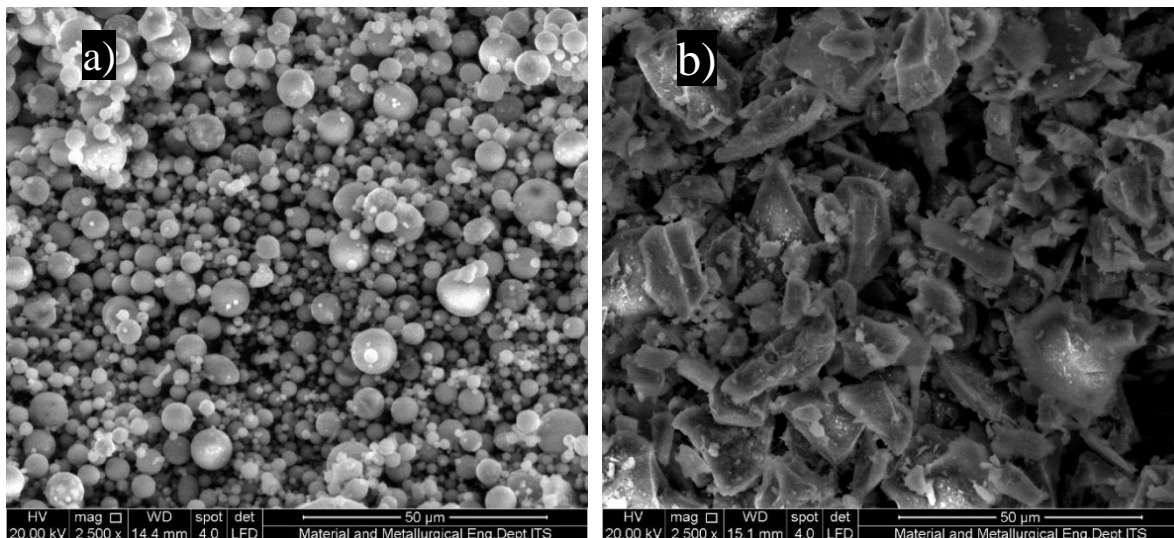
Sampel	Daerah Serapan (cm^{-1})	Ikatan Gugus Fungsi
Fly Ash	939,28	Si-O-T (T = Si atau Al) <i>Stretching</i>
GGBFS	872,19	Si-O-T (T = Si atau Al) <i>Stretching</i>
Metakaolin	1034,71	Si-O-Al <i>Stretching</i>
	791,63	Si-O-Al <i>Stretching</i>
F70G10M20	3265,64 - 1648,03	OH <i>Stretching</i>
	1484,54 - 1412,73	O-C-O <i>Stretching</i>
	961,22	Si-O-Al <i>Stretching</i>

Analisis pada **Tabel 4.3** dari hasil FTIR Metakaolin yang memiliki peak di titik 1034,71 cm^{-1} dan 791,63 cm^{-1} yang terjadi karena vibrasi Si-O-Al *Stretching*. Identifikasi pada Gambar 4.3 dari FTIR komposit geopolimer F70G10M20 menunjukkan terbentuknya lengkungan peak antara 3265,64 cm^{-1} hingga 1648,03 cm^{-1} yang merujuk dengan adanya OH *Stretching* dan deformasi gugus hidroksil, masing-masing. Peak juga muncul pada 1484,54 cm^{-1} hingga 1412,73 cm^{-1} terkait dengan vibrasi O-C-O *Stretching*. Perubahan struktur dari prekursor dapat terlihat dengan jelas akibat dari reaksi geopolymerisasi pada rentang 1300-600 cm^{-1} dimana pada rentang ini material alumino silikat dapat terkarakterisasi dengan jelas. Jika kita membandingkan puncak utama dari material

precursor Fly Ash, GGBFS dan dengan ditambahkan Metakaolin menjadikan produk geopolimer yang menjadikan adanya perpindahan dari $939,28\text{cm}^{-1}$, $879,58\text{ cm}^{-1}$ dan $1034,71\text{ cm}^{-1}$ menjadi $938,6189\text{ cm}^{-1}$, hal ini dapat terjadi karena pergeseran puncak di Spektrum FTIR menegaskan terbentuknya rantai poli(sialate-siloxo) dalam struktur melalui reaksi geopolimerisasi (El Alouani et al., 2019).

4.5 Hasil Pengujian SEM-EDX

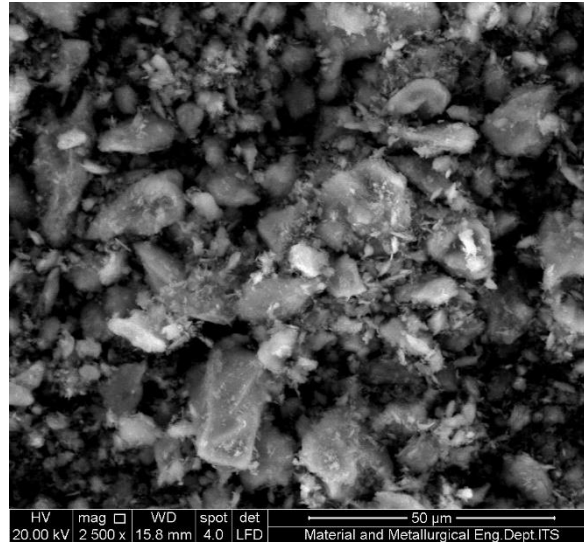
Pengujian SEM pada penelitian ini menggunakan FEI tipe INSPECT S50 pada material penyusun mortar geopolimer yang bertujuan untuk menganalisis struktur morfologi yang dimiliki oleh material-material tersebut.



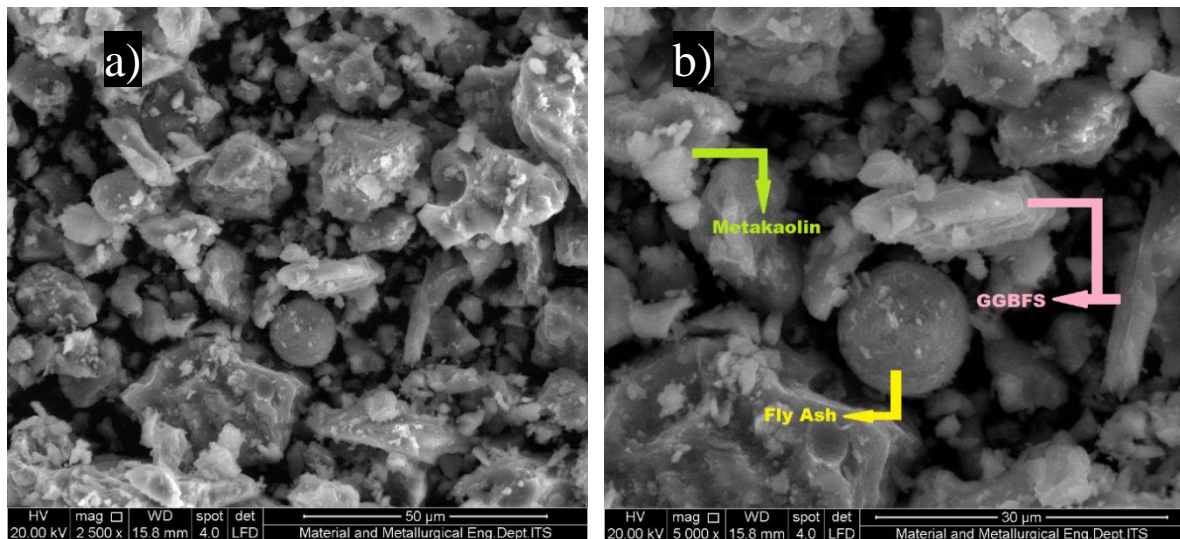
Gambar 4.4 Morfologi dari (a) fly ash dan (b) GGBFS dengan perbesaran 2500 \times .

Morfologi fly ash pada perbesaran 2500 \times , seperti hasil yang ditunjukkan pada **Gambar 4.4 (a)**, tersusun dari serangkaian partikel berbentuk bola dengan ukuran yang berbeda-beda. Gambar 4.3 menunjukkan bahwa sampel fly ash tersebut memiliki ukuran partikel $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$. Maka dari itu, dapat disimpulkan bahwa fly ash yang digunakan pada penelitian ini tergolong ke dalam fly ash dengan ukuran partikel yang halus. Pada **Gambar 4.4 (b)**, GGBFS dengan perbesaran 2500 \times dapat dilihat memiliki partikel-partikel yang berbentuk tidak beraturan dengan tepian yang tajam. Karena bentuknya yang tidak beraturan tersebut, ukuran partikel GGBFS sulit untuk dihitung dengan akurat. Menurut Perez-Garcia et al., 2020, partikel GGBFS memiliki ukuran $\pm 9,2\text{ }\mu\text{m}$.

Morfologi yang ditunjukkan oleh SEM dari material metakaolin pada **Gambar 4.5** adalah butiran berbentuk seperti kapas dengan struktur yang tidak beraturan, dan juga tidak terlihat ujung yang tajam seperti GGBFS. Diameter butir rata-rata pada metakaolin adalah $12,0\text{ }\mu\text{m}$ hingga $23,5\text{ }\mu\text{m}$. Metakaolin memiliki partikel dengan diameter lebih kecil dari $30,0\text{ }\mu\text{m}$ dan $50,8\text{ }\mu\text{m}$ pada kuantitas kecil. Berdasarkan hal ini, metakaolin dianggap memiliki ukuran partikel yang kecil (Gonçalves et al., 2022).

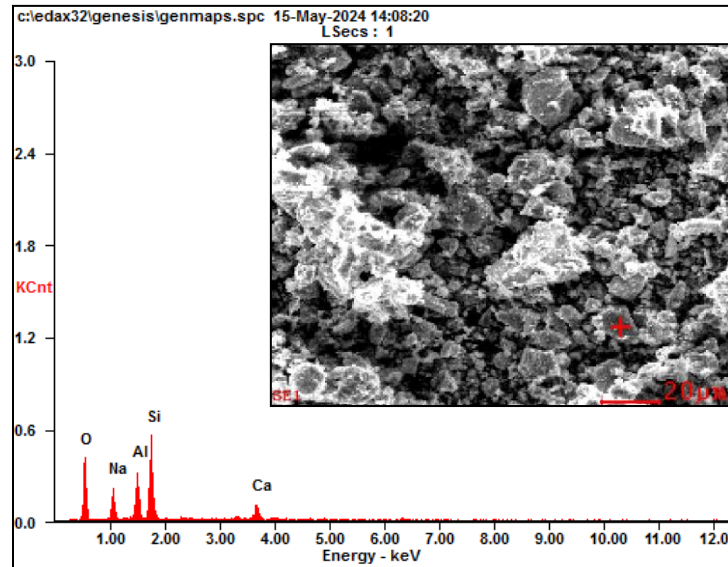


Gambar 4.5 Morfologi dari Metakaolin perbesaran 2500x.



Gambar 4.6 Morfologi dari Variasi F70G10M20 perbesaran (a) 2500x (b) 5000x.

Hasil SEM pada **Gambar 4.6 (a)** dan **(b)** diambil dari sampel mortar geopolimer F70G10M20 yang sudah dihaluskan. Pengujian SEM pada sampel mortar geopolimer bertujuan untuk menganalisis struktur morfologi yang dimiliki oleh sampel tersebut. Ditunjukkan adanya partikel penyusun mortar berasal dari prekursor berupa fly ash, GGBFS, dan metakaolin. Pengujian karakterisasi dengan EDX juga dilakukan pada sampel geopolimer yang sama untuk mengetahui komposisi senyawa khususnya unsur Si dan Al didalamnya. Selain untuk mengetahui komposisi unsur karakteristik EDX pada sampel geopolimer juga bertujuan untuk mengetahui berapa besar kandungan oksida yang terdapat di dalam sampel geopolimer dimana senyawa ini merupakan senyawa yang berperan penting dalam pembentukan ikatan geopolimer Si-O-Al dan juga untuk mengetahui sebaran senyawa pada geopolimer yang dihasilkan dari kombinasi fly ash, GGBFS, dan metakaolin yang diaktivasi menggunakan larutan silikat berupa NaOH (16M) dan Na₂SiO₃.



Gambar 4.7 Hasil pengujian EDX sampel F70G10M20.

Dari hasil karakterisasi EDX yang terdapat pada **Gambar 4.7** dan **Tabel 4.4** berupa kandungan unsur-unsur utama di dalam sampel geopolimer. Kandungan unsur Si yang terkandung dalam sampel sebesar 25,67 %wt, unsur Al 12,8 %wt. Sehingga ditemukan rasio Si/Al yang ada pada sampel mortar F70G10M20 sebesar 2. Dengan melakukan penambahan larutan aktivator alkali tinggi pada proses pembuatannya, dapat menghasilkan rantai polimer ikatan Si–O–Al–O. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Liu et al., 2022 mengenai studi intensif yang telah membuktikan peran penting rasio Si/Al, dan hasil penelitian mengenai nominal rasio Si/Al optimal pada angka 1,5 hingga 2,5 telah menunjukkan kelayakan penggunaan rasio molar sebagai prinsip desain campuran.

Tabel 4.4 Komposisi unsur sampel F70G10M20.

Unsur	Wt%	At%
OK	43,21	56,88
NaK	10,88	09,97
AlK	12,80	09,99
SiK	25,67	19,25
CaK	07,43	03,91

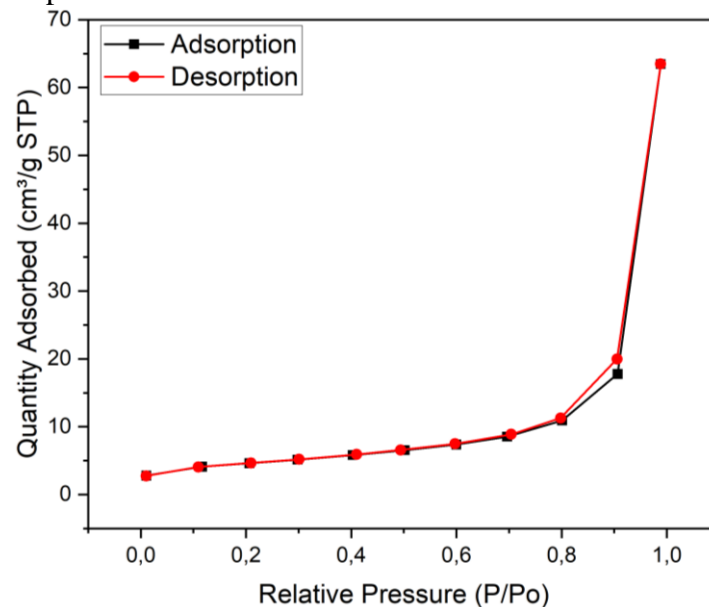
4.6 Hasil Pengujian BET SAA

Telah dilakukan pengujian BET untuk mengetahui diameter pori, volume pori dan luas permukaan dari Metakaolin. Pengujian ini menggunakan alat Quantachrome NovaWin. Prinsip kerja dari alat ini adalah adsorpsi-desorpsi gas adsorbat pada permukaan suatu bahan padat yang akan dikarakterisasi pada suhu tetap. Untuk nilai diameter pori, volume pori, dan luas permukaan dari Metakaolin ini bisa dilihat pada **Tabel 4.5** dibawah ini.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian BET Metakaolin.

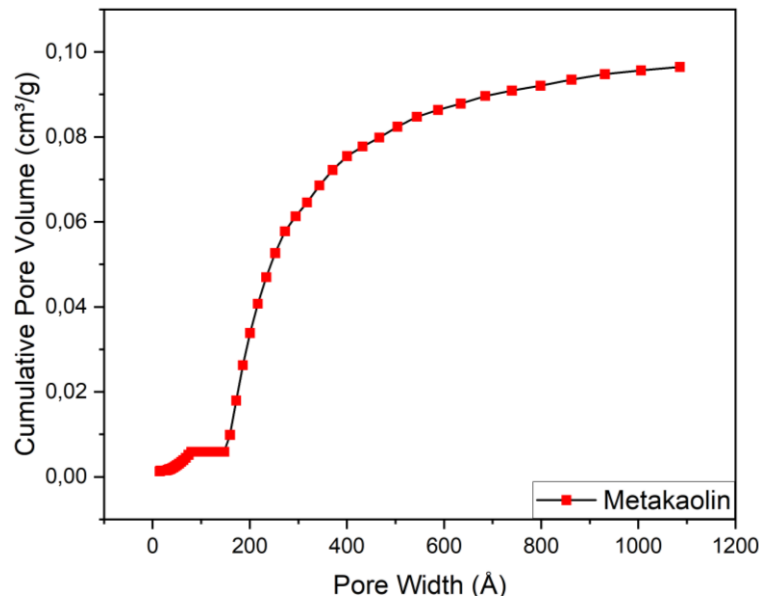
Material	Surface Area (m ² /g)	Pore Volume (cm ³ /g)	Pore Diameter (Å)
Metakaolin	15.9080	0.098181	246.8705

Hasil ini sesuai dengan penelitian Pan et al (2017) yang menyatakan bahwa rentang nilai dari luas permukaan, volume dan diameter pori dari metakaolin adalah sesuai data yang tersaji. Hal ini juga sesuai dengan teori adsorpsi nitrogen mikropori metakaolin. Dapat diketahui juga bahwa ukuran pori dari metakaolin ini dapat dikategorikan sebagai mikropori dan kemungkinan adanya mesopori (< 2,5 nm). Menurut Cychosz & Thommes (2018), metode yang direkomendasi dalam mengetahui nilai ukuran pori adalah metode DFT. Adapun grafik isothermal yang didapatkan dari hasil pengujian BET yang disajikan pada **Gambar 4.8** dibawah ini.



Gambar 4.8 Grafik isothermal dari pengujian BET Metakaolin.

Gambar 4. 5 Grafik isothermal dari pengujian BET metakaolin Pada hasil pengujian ini grafik adsorpsi-desorpsi dari metakaolin masuk ke dalam kurva isotherm gabungan. Dapat dikatakan gabungan karena adanya percabangan pada kurva adsorpsi-desorpsi. Percabangan yang terjadi ini disebut dengan hysteresis. Pada kasus ini kurva yang terbentuk merupakan kurva tipe III. Pada tipe ini, isotherm adsorpsi menunjukkan peningkatan yang lambat pada awalnya, tetapi pada tekanan tertentu, isotherm adsorpsi menunjukkan lonjakan tajam dalam jumlah adsorpsi. Ini mengindikasikan terbentuknya kondensat dalam pori-pori yang lebih kecil, seperti fenomena kapiler.



Gambar 4.9 Hubungan diameter pori dengan volume pori metakaolin.

Adapun pada **Gambar 4.9** menjelaskan mengenai hubungan diameter pori dengan volume pori dari metakaolin. Dari Gambar dapat diketahui bahwa adanya ketidaklinearan antara diameter dan volume pori. Dapat diketahui bahwa semakin tinggi diameter pori maka semakin besar juga volume pori. Hal ini mengartikan bahwa pori yang memiliki diameter yang besar lebih dapat mengakses atau melakukan adsorpsi dengan baik. Juga semakin besar diameter pori akan membuat pori semakin banyak sehingga semakin besar luas permukaannya.

4.7 Hasil Pengujian Densitas

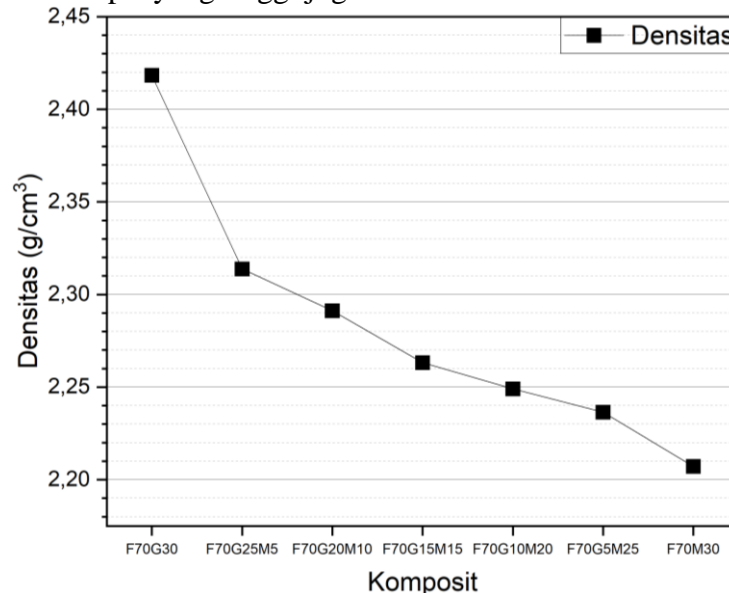
Pengujian Densitas merupakan parameter penting dalam mengukur kerapatan massa suatu benda atau zat. Pada dasarnya, densitas dihitung dengan membagi massa benda dengan volume yang dimilikinya, di mana kerapatan massa objek tersebut didefinisikan sebagai rasio antara massa objek dan volume yang dimilikinya. Keterkaitan antara massa dan volume mortar memiliki dampak signifikan terhadap nilai densitasnya. Pengujian densitas dilakukan pada sampel mortar variasi umur 56 hari, dan mengacu pada standar ASTM C 905-01, untuk hasil dari densitas pada setiap mortar geopolimer dapat dilihat pada **Gambar 4.10** dan **Tabel 4.6** dibawah ini.

Tabel 4.6 Hasil densitas setiap variasi mortar geopolimer.

Variasi	Densitas (g/cm ³)
F70G30	2,41834
F70G25M5	2,31371
F70G20M10	2,29121
F70G15M15	2,26313
F70G10M20	2,249
F70G5M25	2,23639
F70M30	2,20713

Pada **Tabel 4.6** diatas, terlihat bahwa nilai densitas yang tercatat berada dalam rentang 2,2 hingga 2,42 g/cm³ untuk setiap variasi, yang kemudian direpresentasikan dalam bentuk

diagram batang untuk mengamati pengaruh penambahan metakaolin terhadap densitas. Dari visualisasi tersebut, terlihat bahwa penurunan komposisi metakaolin menunjukkan kecenderungan peningkatan nilai densitas tetapi tidak begitu signifikan, hal tersebut dikarenakan *specific surface area* dari metakaolin yang bisa dibilang kecil yaitu di angka $15.9080 \text{ m}^2/\text{g}$, sehingga hal tersebut juga berbanding terbalik dengan densitas mortar dimana kapasitas adsorpsi dari mortar dengan variasi metakaolin yang lebih banyak memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi juga.



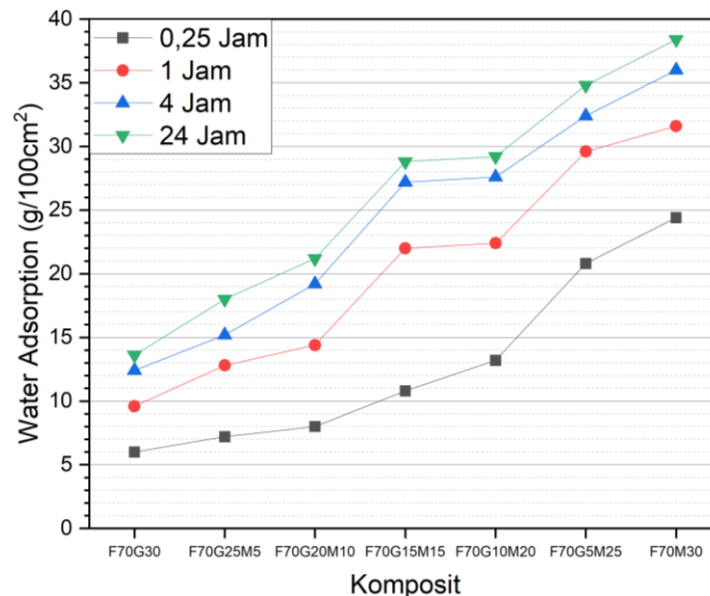
Gambar 4.10 Grafik Densitas Mortar Geopolimer.

Pada **Gambar 4.10** memperlihatkan densitas mortar geopolymer dengan penambahan GGBFS 30% digunakan sebagai mortar control. Pada mortar tersebut dihasilkan densitas senilai $2,42 \text{ gr/cm}^3$. Mortar geopolimer dengan variasi penambahan metakaolin 5% (F70G25M5), 10% (F70G20M10), 15% (F70G15M15), 20% (F70G10M20), 25% (F70G5M25) dan 30% (F70M30) ditunjukkan pada **Gambar 4.10**. Dari variasi tersebut secara berurutan, semakin meningkat penambahan metakaolin, semakin turun pula densitasnya. Pada mortar F70G25M5 didapatkan densitas sebesar $2,31371 \text{ gr/cm}^3$, nilai kuat tekannya pun paling tinggi diantara variasi penambahan metakaolin lain sebesar $50,37 \text{ MPa}$. Densitas pada mortar F70G20M10 sebesar $2,29121 \text{ gr/cm}^3$. Pada mortar F70G15M15 sebesar $2,26313 \text{ gr/cm}^3$. Pada mortar F70G10M20 sebesar $2,249 \text{ gr/cm}^3$. Pada mortar F70G5M25 sebesar $2,23639 \text{ gr/cm}^3$. Dan hasil densitas terendah sebesar $2,20713 \text{ gr/cm}^3$ oleh sampel F70M30 seiring dengan rendahnya nilai kuat tekan yakni $41,58 \text{ MPa}$. Densitas mortar mempengaruhi kuat tekan mortar, sehingga mortar dengan nilai densitas yang tinggi akan memiliki kuat tekan yang paling besar seperti pada mortar dengan substitusi metakaolin dalam mortar 5%.

4.8 Hasil Pengujian *Water Absorption*

Pengujian *water absorption* pada sampel uji menggunakan standar ASTM C1403, yang menetapkan prosedur pengujian untuk mengetahui jumlah air yang diserap oleh masing-masing sampel selama rentang waktu 0,25, 1, 4, dan 24 jam. Tujuan dari pengujian absorpsi air adalah untuk menentukan seberapa mudah air dapat meresap ke dalam material geopolimer. Absorpsi air merupakan parameter kritis dalam pembuatan geopolimer karena

memberikan informasi mengenai permeabilitas dan laju reaksi geopolimer tersebut. Absorpsi air yang rendah menunjukkan permeabilitas yang rendah, sementara laju geopolimerisasi yang tinggi dapat menghasilkan matriks geopolimer dengan pori yang minim dan permeabilitas yang rendah (Mustofa et al, 2016). Besarnya nilai water absorption dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 3.3, Hasil perhitungan data dari tiap-tiap variasi ditampilkan dan diplot dalam bentuk diagram untuk memvisualisasikan pengaruh penambahan metakaolin terhadap nilai water absorption dan, secara tidak langsung, daya tahan mortar.



Gambar 4.11 Grafik *Water Adsorption* Mortar Geopolimer.

Pada **Gambar 4.11** dari Gambar diatas nilai Water Absorption didapatkan oleh Variasi F70M30, serta variasi yang memiliki kandungan metakolin lebih banyak akan bertambah nilai Water Absorptionnya, seiring dengan bertambahnya massa metakaolin. Variasi F70G30 adalah variasi dengan nilai Water Absorption terendah dibandingkan variasi lainnya.

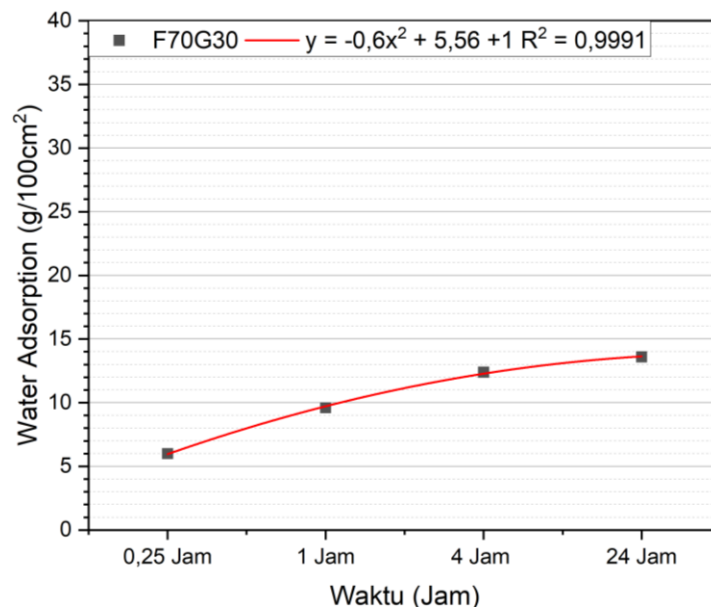
Tabel 4.7 Tabel *Water Adsorption* Mortar Geopolimer.

Variasi	Water Adsorption (g/100cm ²)			
	0,25 Jam	1 Jam	4 Jam	24 Jam
F70G30	6	9.6	12.4	13.6
F70G25M5	7.2	12.8	15.2	18
F70G20M10	8	14.4	19.2	21.2
F70G15M15	10.8	22	27.2	28.8
F70G10M20	13.2	22.4	27.6	29.2
F70G5M25	20.8	29.6	32.4	34.8
F70M30	24.4	31.6	36	38.4

Ditinjau dari **Tabel 4.7**, hasil *water adsorption* pada waktu 4 jam adalah; 12,4 gr/100cm², 15,2 gr/100cm², 19,2 gr/100cm², 27,2 gr/100cm², 27,6 gr/100cm², 32,4 gr/100cm² dan 36 gr/100cm². nilai water absorption paling tinggi didapatkan oleh F70M30 senilai 36 gr/100cm² dan paling rendah oleh F70G30 senilai 12,4 gr/100cm². Hasil yang diperoleh ini linear dengan hasil uji Densitas dan uji Kuat Tekan dimana material yang memiliki luas permukaan yang sangat tinggi akan memiliki kuat tekan yang rendah, tetapi memiliki kemampuan absorpsi yang tinggi.

Pada studi Ahmari et al menjelaskan dampak tekanan dalam proses pembuatan geopolimer terhadap daya serap air. Peningkatan daya serap air seiring dengan peningkatan tekanan menyebabkan peningkatan jumlah larutan NaOH yang terdorong keluar. Dalam kondisi tersebut, reaksi geopolimerisasi terhambat sehingga pembentukan gel geopolimer menjadi kurang signifikan, dan pada akhirnya menghasilkan matriks geopolimer dengan porositas yang tinggi. Dengan kata lain, proses geopolimerisasi yang lebih tinggi terhambat sehingga struktur geopolimer yang dihasilkan menjadi kurang homogen. Akibat dari terbatasnya reaksi terhadap precursor yang tidak terlibat dalam proses tersebut. Setelah direndam selama 24 jam, daya serap air geopolimer mengalami peningkatan seiring dengan penambahan metakaolin. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan rasio Si/Al berperan dalam pembentukan struktur mikro yang homogen sehingga mengurangi daya serap air (Mustofa et al, 2016).

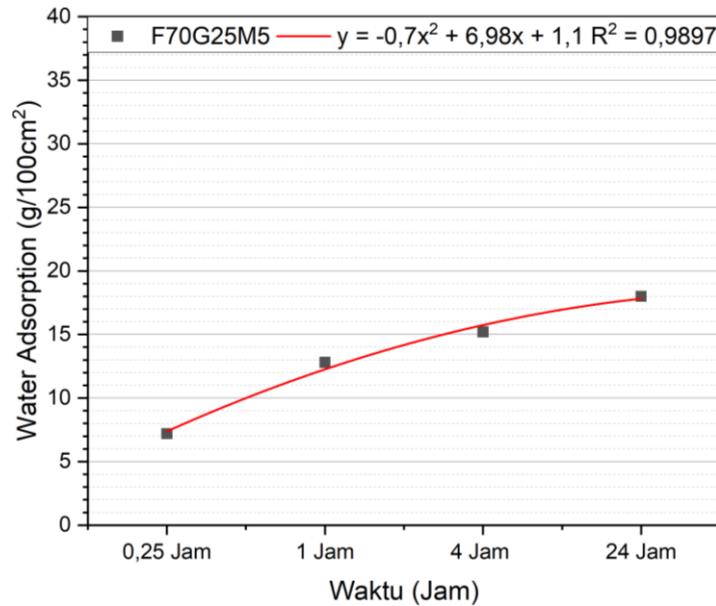
4.8.1 Hasil Uji *Water Adsorption* F70G30



Gambar 4.12 Hasil Uji *Water Adsorption* pada Mortar F70G30.

Pada **Gambar 4.12** mortar F70G30 didapatkan kurva nilai water absorption berada pada rentang 6-13,6 g/100cm². Hasil dari masing masing waktu ditunjukkan dengan angka dari 6 g/100cm² pada waktu 0,25 jam, 9,6 g/100cm² pada 1 jam, 12,4 g/100cm² pada 4 jam, dan 13,6 g/100cm² pada 24 jam. Dengan persamaan polinomial orde dua $y = -0,6x^2 + 5,56x + 1$ dan $R^2 = 0,9991$.

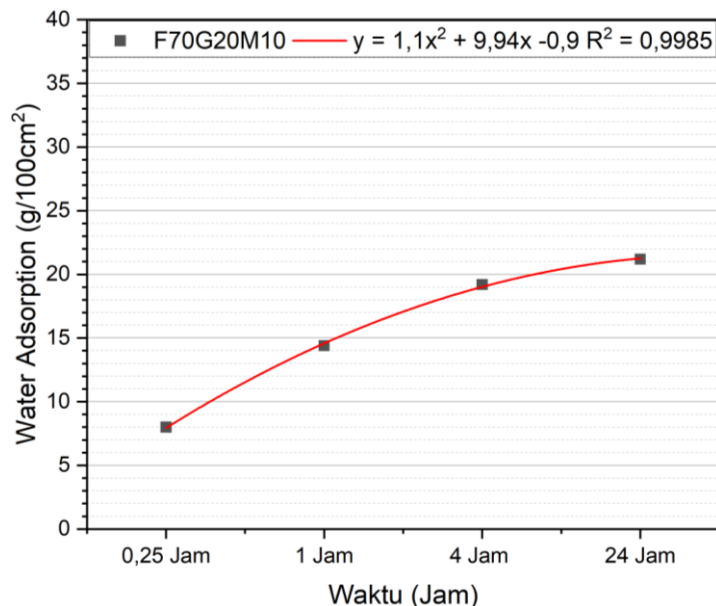
4.8.2 Hasil Uji *Water Adsorption* F70G25M5



Gambar 4.13 Hasil Uji *Water Adsorption* pada Mortar F70G25M5.

Pada **Gambar 4.13** mortar F70G25M5 didapatkan kurva nilai *water adsorption* berada pada rentang 7,2-18 g/100cm². Hasil dari masing masing waktu ditunjukkan dengan angka dari 7,2 g/100cm² pada waktu 0,25 jam, 12,8 g/100cm² pada 1 jam, 15,2 g/100cm² pada 4 jam, dan 18 g/100cm² pada 24 jam. Dengan persamaan polinomial orde dua $y = -0,7x^2 + 6,98x + 1,1$ dan $R^2 = 0,9897$.

4.8.3 Hasil Uji *Water Adsorption* F70G20M10

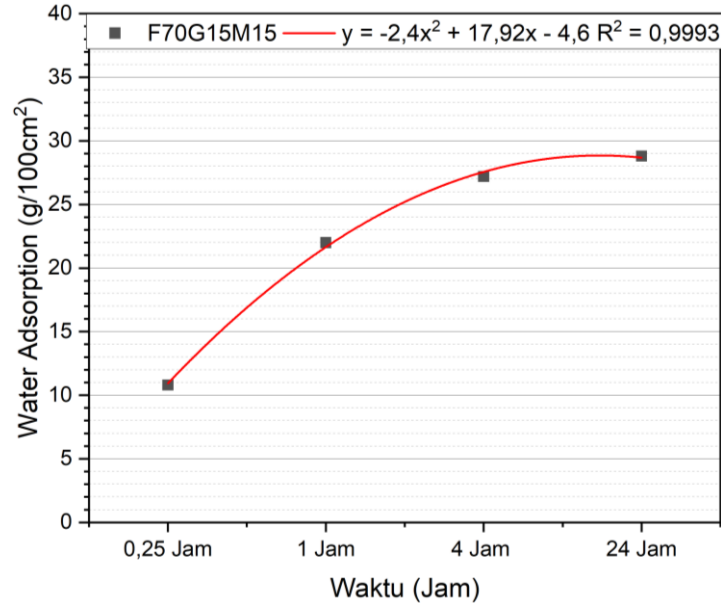


Gambar 4.14 Hasil Uji *Water Adsorption* pada Mortar F70G20M10.

Pada **Gambar 4.14** mortar F70G20M10 didapatkan kurva nilai *water adsorption* berada pada rentang 8-21,2 g/100cm². Hasil dari masing masing waktu ditunjukkan dengan angka dari 8 g/100cm² pada waktu 0,25 jam, 14,4 g/100cm² pada 1 jam, 19,2 g/100cm²

pada 4 jam, dan 21,2 g/100cm² pada 24 jam. Dengan persamaan polinomial orde dua $y = 1,1x^2 + 9,94x - 0,9$ dan $R^2 = 0,9985$.

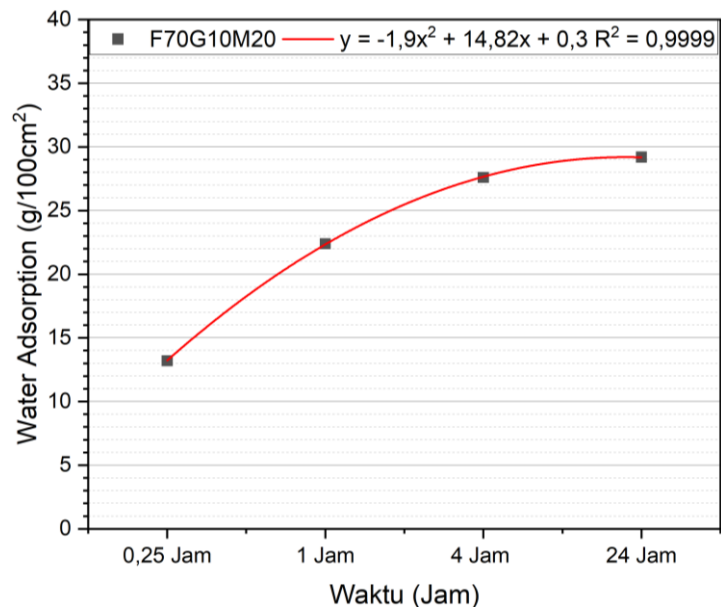
4.8.4 Hasil Uji Water Absorption F70G15M15



Gambar 4.15 Hasil Uji *Water Adsorption* pada Mortar F70G15M15.

Pada **Gambar 4.15** mortar F70G15M15 didapatkan kurva nilai water absorption berada pada rentang 10,8-28,8 g/100cm². Hasil dari masing masing waktu ditunjukkan dengan angka dari 10,8 g/100cm² pada waktu 0,25 jam, 22 g/100cm² pada 1 jam, 27,2 g/100cm² pada 4 jam, dan 28,8 g/100cm² pada 24 jam. Dengan persamaan polinomial orde dua $y = -2,4x^2 + 17,92x + 4,6$ dan $R^2 = 0,9993$.

4.8.5 Hasil Uji Water Absorption F70G10M20

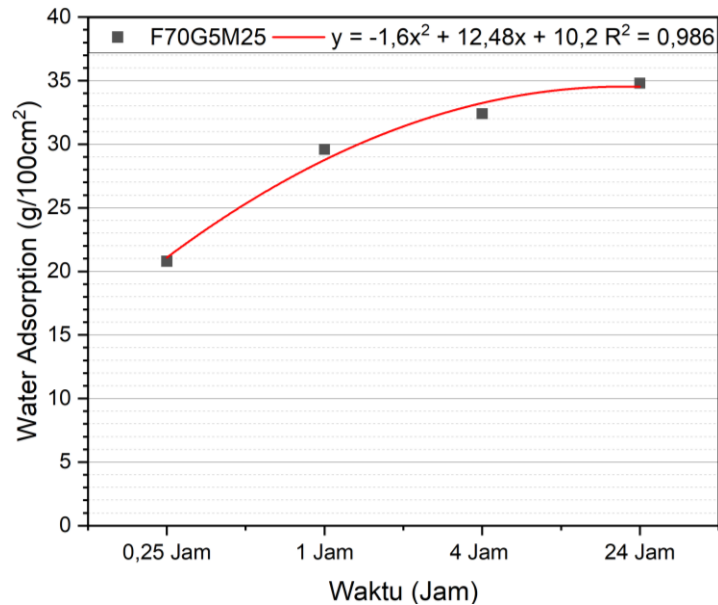


Gambar 4.16 Hasil Uji *Water Adsorption* pada Mortar F70G10M20.

Pada **Gambar 4.16** mortar F70G10M20 didapatkan kurva nilai water absorption berada pada rentang 13,2-29,2 g/100cm². Hasil dari masing masing waktu ditunjukkan

dengan angka dari 13,2 g/100cm² pada waktu 0,25 jam, 22,4 g/100cm² pada 1 jam, 27,6 g/100cm² pada 4 jam, dan 29,2 g/100cm² pada 24 jam. Dengan persamaan polinomial orde dua $y = -1,9x^2 + 14,82x + 0,3$ dan $R^2 = 0,9999$.

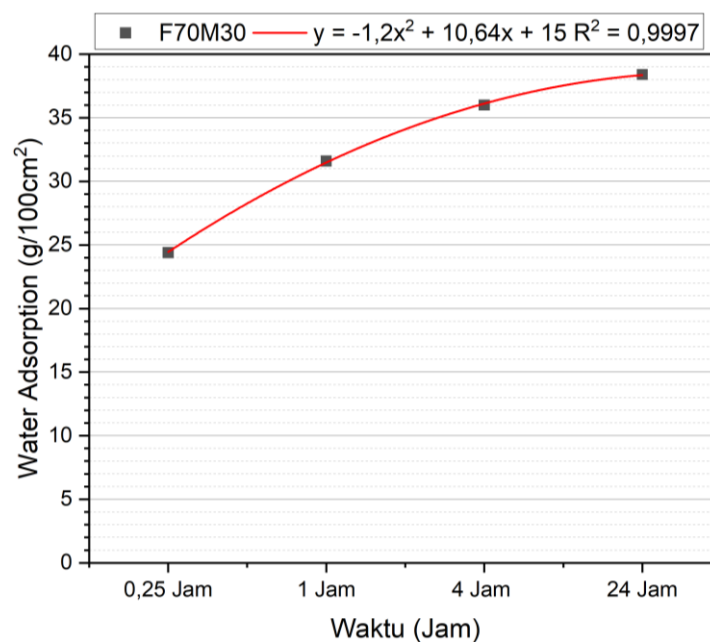
4.8.6 Hasil Uji Water Adsorption F70G5M25



Gambar 4.17 Hasil Uji Water Adsorption pada Mortar F70G5M25.

Pada **Gambar 4.17** mortar F70G5M25 didapatkan kurva nilai water adsorption berada pada rentang 20,8-34,8 g/100cm². Hasil dari masing masing waktu ditunjukkan dengan angka dari 20,8 g/100cm² pada waktu 0,25 jam, 29,6 g/100cm² pada 1 jam, 32,4 g/100cm² pada 4 jam, dan 34,8 g/100cm² pada 24 jam. Dengan persamaan polinomial orde dua $y = -1,6x^2 + 12,48x + 10,2$ dan $R^2 = 0,986$.

4.8.7 Hasil Uji Water Adsorption F70M30



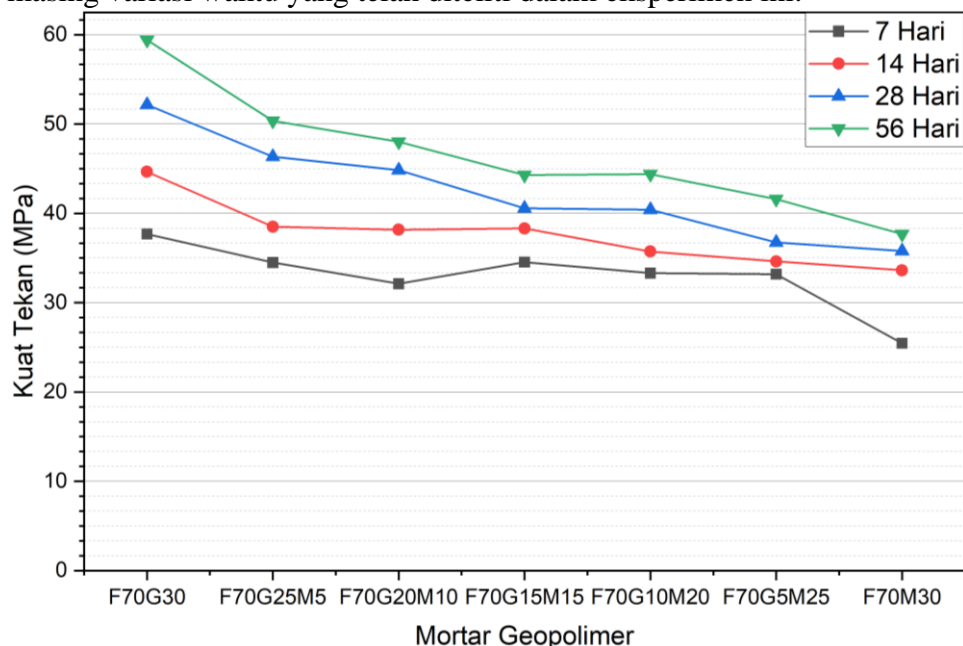
Gambar 4.18 Hasil Uji Water Adsorption pada Mortar F70M30.

Pada **Gambar 4.18** mortar F70M30 didapatkan kurva nilai water absorption berada pada rentang 24,4-38,4 g/100cm². Hasil dari masing masing waktu ditunjukkan dengan angka dari 24,4 g/100cm², 31,6 g/100cm², 36 g/100cm², dan 38,4 g/100cm². Dengan persamaan polinomial orde dua $y = -1,2x^2 + 10,64x + 15$ dan $R^2 = 0.9997$.

4.9 Hasil Pengujian *Compressive test*

Kuat tekan mortar mengacu pada kemampuan campuran mortar menahan tekanan atau beban sebelum strukturnya terdeformasi. Ini menggambarkan kekuatan tekan atau ketahanan material mortar terhadap tekanan yang dihasilkannya. Pengukuran ini melibatkan pengujian sampel mortar, yang seringkali berbentuk kubik atau silinder, dengan menerapkan gaya tekan bertahap hingga sampel retak atau pecah.

Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian kuat tekan mortar pada empat periode umur yang berbeda, yaitu pada 7 hari, 14 hari, 28 hari, dan 56 hari. Tiap periode umur tersebut dievaluasi dengan enam variasi komposisi yang berbeda, yaitu F70G30, F70G25M5, F70G20M10, F70G15M15, F70G10M20, F70G5M25, dan F70M30. Masing-masing variasi komposisi ini direpresentasikan oleh tiga sampel mortar yang dibuat sesuai dengan periode umur yang ditetapkan. Setelah pengujian, nilai kuat tekan dari tiap sampel di setiap variasi waktu tersebut dijumlahkan dan dihitung rata-ratanya untuk setiap kombinasi komposisi dan periode umur. Hal ini dilakukan untuk memperoleh nilai representatif dari masing-masing variasi waktu yang telah diteliti dalam eksperimen ini.



Gambar 4.19 Grafik Kuat Tekan Mortar Geopolimer.

Grafik pada **Gambar 4.19** menunjukkan kuat tekan terbesar terdapat pada mortar geopolimer dengan kode F70G30 dikarenakan banyaknya kandungan CaO yang terdapat pada Fly Ash dan GGBFS, sedangkan kuat tekan terendah terdapat pada mortar geopolimer dengan kode F70M30.

Tabel 4.8 Hasil Kuat Tekan Mortar Geopolimer.

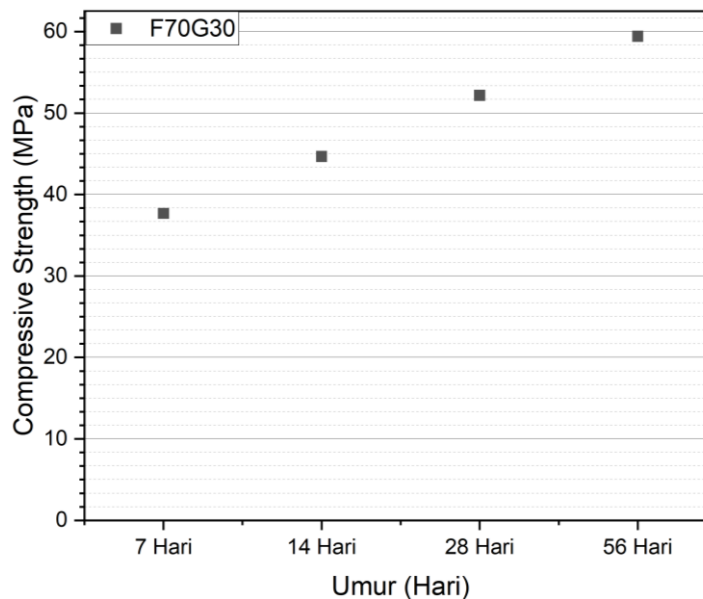
Variasi	Kuat Tekan (MPa)			
	7 Hari	14 Hari	28 Hari	56 Hari
F70G30	37,68	44,66	52,16	59,42
F70G25M5	34,5	38,5	46,33	50,37
F70G20M10	32,12	38,16	44,85	48,03
F70G15M15	34,54	38,32	40,56	44,28
F70G10M20	33,3	35,73	40,4	44,38
F70G5M25	33,2	34,625	36,75	41,58
F70M30	25,46	33,63	35,78	37,69

Pada **Tabel 4.8** diatas dapat dilihat bahwa kuat tekan menurun seiring dengan pengurangan GGBFS dan penambahan Metakaolin. Hal tersebut dapat terjadi karena penambahan massa GGBFS akan mempengaruhi nilai kuat tekan dari mortar dikarenakan larutan alkali yang akan mendorong proses hidrolisis pada silikat dan aluminat yang ada dalam bahan prekursor, sehingga menyediakan anion silikat tambahan untuk bereaksi dengan Ca^{2+} yang terlarut dari prekursor, membentuk ikatan C-S-H (Ding et al, 2018).

Dapat dilihat setiap variasi nilai kuat tekannya selalu bertambah seiring dengan bertambahnya waktu curing dari mortar tersebut. Mengacu pada Standar (SNI-036882, 2014) mengenai spesifikasi mortar. Setiap Variasi dapat dikategorikan sebagai mortar tipe M dimana setiap variasi tersebut memiliki nilai kuat tekan lebih dari 17,2 Mpa.

Pada seluruh variasi, didapatkan nilai kuat tekan tertinggi pada variasi waktu 56 hari. Hal ini dapat terjadi dimana waktu berperan sangat penting terhadap meningkatnya nilai kuat tekan pada geopolimer yang dibiarkan pada temperatur ruang menjadi sumber pelepasan molekul air yang mengakibatkan terjadinya porositas. Karena porositas merupakan parameter kunci yang mengatur kekuatan dalam reaksi pembentukan C-S-H dan C-A-H (Lootens & Bentz, 2016).

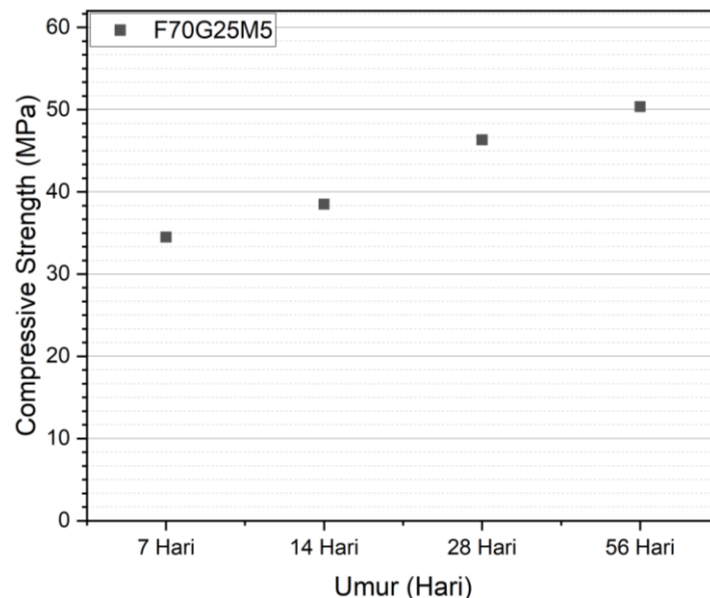
4.9.1 Hasil Uji *Compressive test* F70G30



Gambar 4.20 Grafik uji kuat tekan F70G30.

Pada **Gambar 4.20** menunjukkan grafik kurva hasil uji kuat tekan pada mortar F70G30. Dimana pada umur 7 hari didapatkan nilai kuat tekan sebesar 37,68 MPa, pada umur 14 hari 44,66 MPa, Pada 28 hari 52,16 MPa, dan pada 56 hari 59,42 MPa. Berdasarkan Gambar diatas didapatkan Terdapat persamaan polinomial orde dua, yaitu $y = 0,07x^2 + 6,922x + 30,65$ dan $R^2 = 0,9998$.

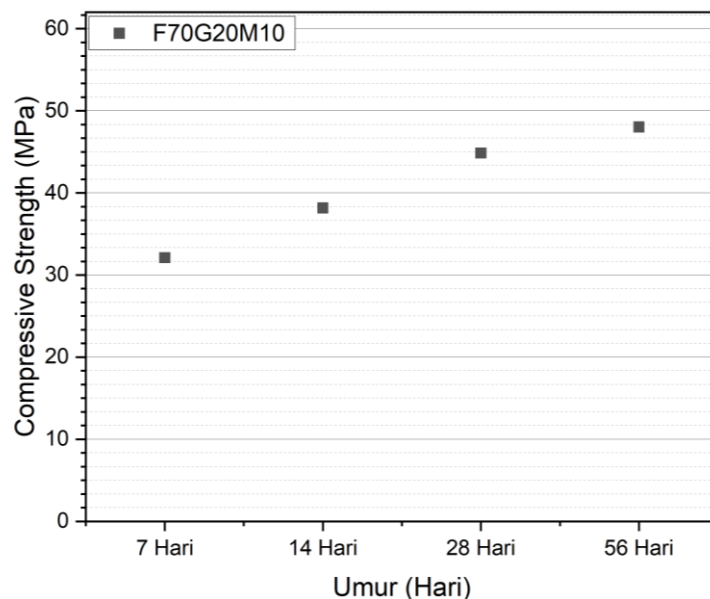
4.9.2 Hasil Uji *Compressive test* F70G25M5



Gambar 4.21 Grafik uji kuat tekan F70G25M5.

Pada **Gambar 4. 21** menunjukkan grafik kurva hasil uji kuat tekan pada mortar F70G30. Dimana pada umur 7 hari didapatkan nilai kuat tekan sebesar 34,5 MPa, pada umur 14 hari 38,5 MPa, Pada 28 hari 46,33 MPa, dan pada 56 hari 50,37 MPa. Berdasarkan Gambar diatas didapatkan Terdapat persamaan linear, yaitu $y = 5,544x + 28,565$ dan $R^2 = 0,9814$.

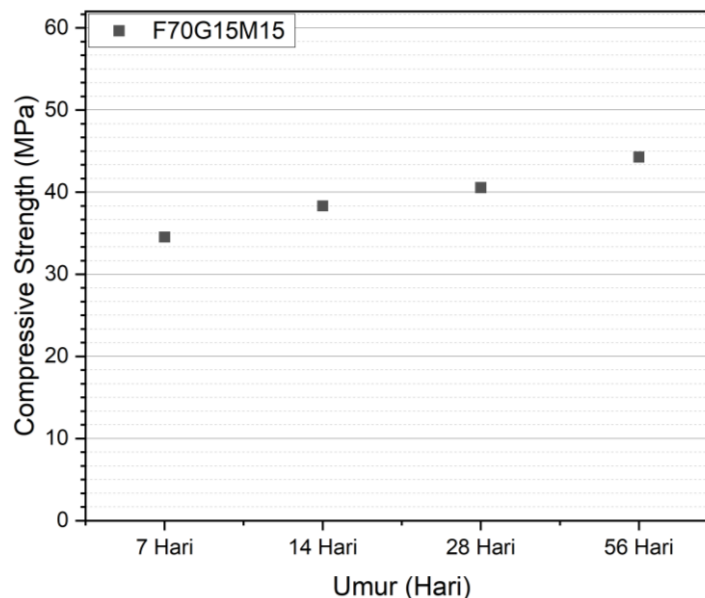
4.9.3 Hasil Uji *Compressive test* F70G20M10



Gambar 4.22 Grafik uji kuat tekan F70G20M10.

Pada **Gambar 4.22** menunjukkan grafik kurva hasil uji kuat tekan pada mortar F70G30. Dimana pada umur 7 hari didapatkan nilai kuat tekan sebesar 32,12 MPa, pada umur 14 hari 38,16 MPa, Pada 28 hari 44,85 MPa, dan pada 56 hari 48,03 MPa. Berdasarkan Gambar diatas didapatkan Terdapat persamaan polinomial orde dua, yaitu $y = -0,715x^2 + 9,017x + 23,61$ dan $R^2 = 0,9942$.

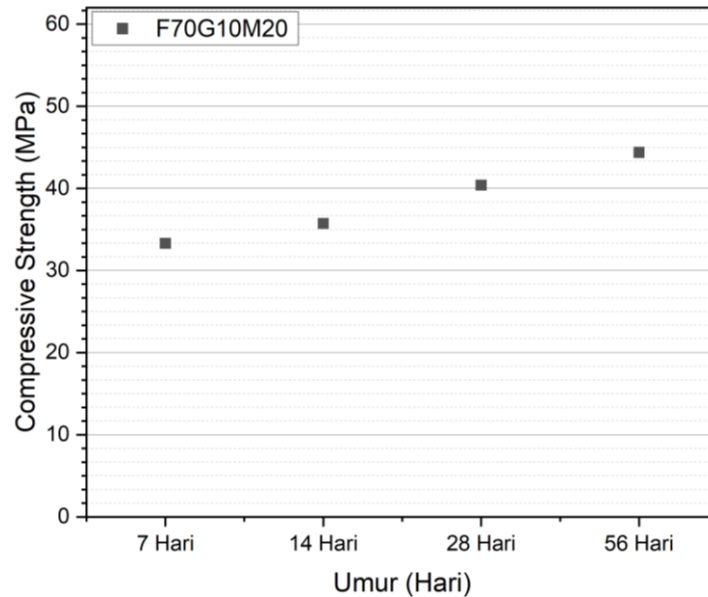
4.9.4 Hasil Uji *Compressive test* F70G15M15



Gambar 4.23 Grafik uji kuat tekan F70G15M15.

Pada **Gambar 4.23** menunjukkan grafik kurva hasil uji kuat tekan pada mortar F70G30. Dimana pada umur 7 hari didapatkan nilai kuat tekan sebesar 34,54 MPa, pada umur 14 hari 38,32 MPa, Pada 28 hari 40,56 MPa, dan pada 56 hari 44,28 MPa. Berdasarkan Gambar diatas didapatkan Terdapat persamaan polinomial orde dua, yaitu $y = -0,015x^2 + 3,221x + 31,485$ dan $R^2 = 0,9908$.

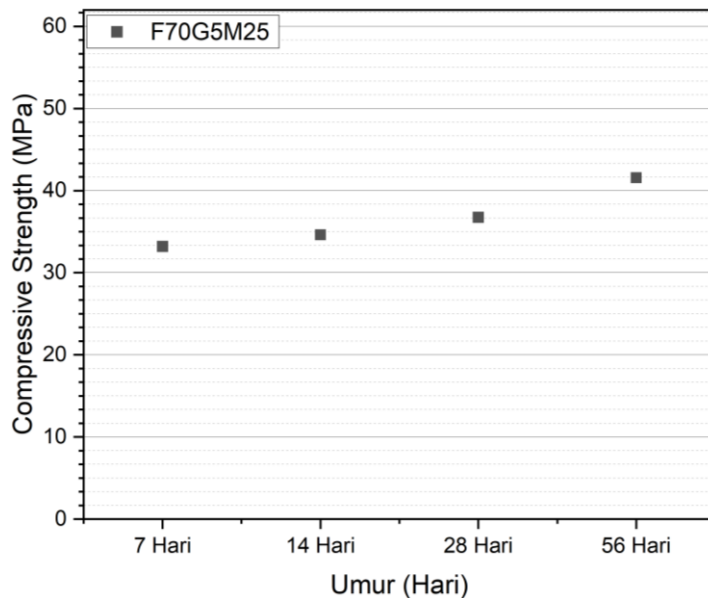
4.9.5 Hasil Uji *Compressive test* F70G10M20



Gambar 4.24 Grafik uji kuat tekan F70G10M20.

Pada **Gambar 4.24** menunjukkan grafik kurva hasil uji kuat tekan pada mortar F70G30. Dimana pada umur 7 hari didapatkan nilai kuat tekan sebesar 33,3 MPa, pada umur 14 hari 35,73 MPa, Pada 28 hari 40,4 MPa, dan pada 56 hari 44,38 MPa. Berdasarkan Gambar diatas didapatkan Terdapat persamaan polinomial orde dua, yaitu $y = 0,3875x^2 + 1,8535x + 30,9125$ dan $R^2 = 0,9941$.

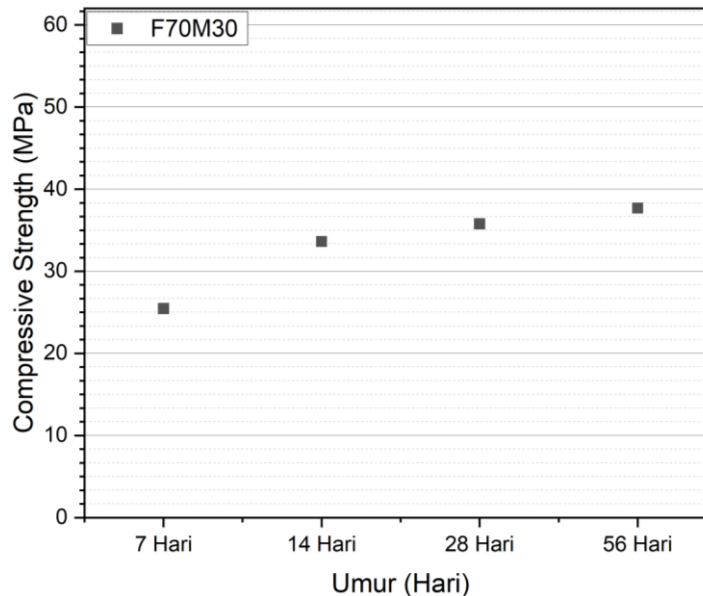
4.9.6 Hasil Uji *Compressive test* F70G5M25



Gambar 4.25 Grafik uji kuat tekan F70G25M5.

Pada **Gambar 4.25** menunjukkan grafik kurva hasil uji kuat tekan pada mortar F70G30. Dimana pada umur 7 hari didapatkan nilai kuat tekan sebesar 33,2 MPa, pada umur 14 hari 34,625 MPa, Pada 28 hari 36,75 MPa, dan pada 56 hari 41,58 MPa. Berdasarkan Gambar diatas didapatkan Terdapat persamaan polinomial orde dua, yaitu $y = 0,85125x^2 - 1,52975x + 33,97875$ dan $R^2 = 0,995$.

4.9.7 Hasil Uji *Compressive test* F70M30



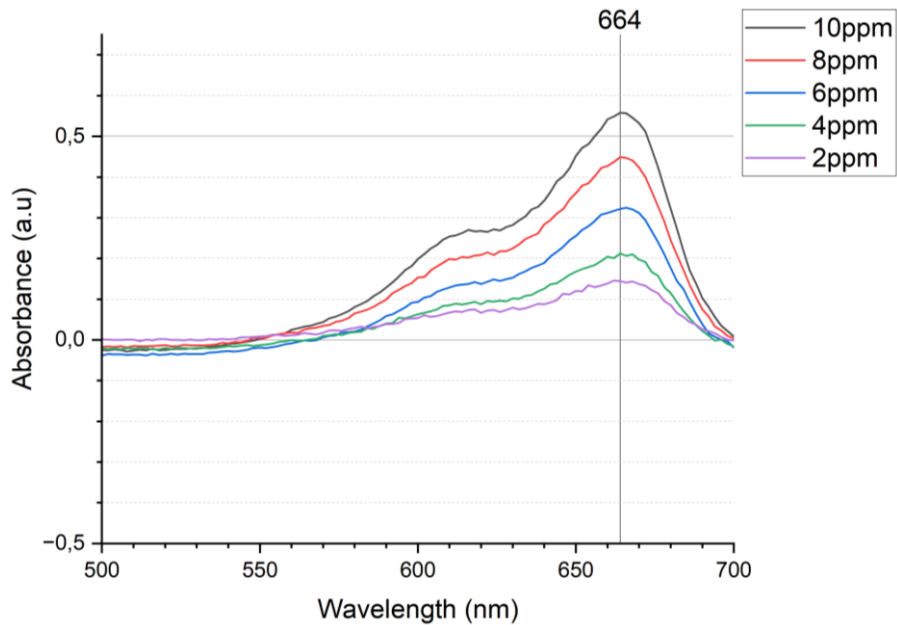
Gambar 4.26 Grafik uji kuat tekan F70M30.

Pada **Gambar 4.26** menunjukkan grafik kurva hasil uji kuat tekan pada mortar F70G30. Dimana pada umur 7 hari didapatkan nilai kuat tekan sebesar 25,46 MPa, pada umur 14 hari 33,63 MPa, Pada 28 hari 35,78 MPa, dan pada 56 hari 37,69 MPa. Berdasarkan Gambar diatas didapatkan Terdapat persamaan polinomial orde dua, yaitu $y = -1,565x^2 + 11,709x + 15,605$ dan $R^2 = 0,9807$.

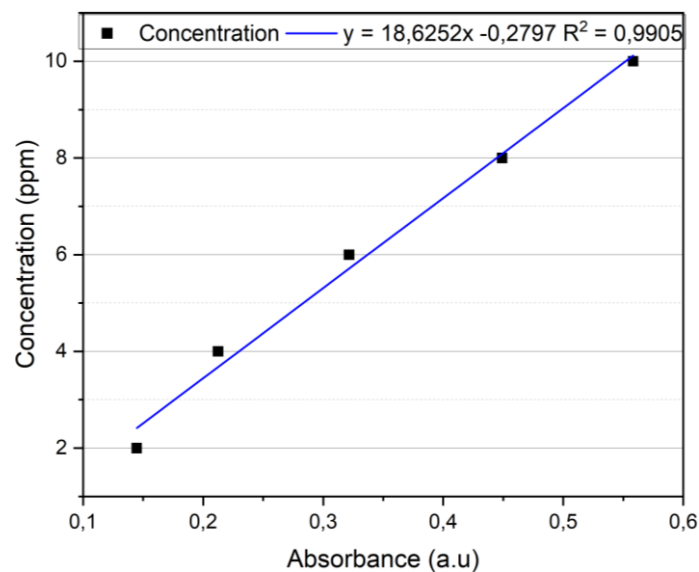
4.10 Hasil Pengujian UV-Vis

Pengujian UV-Vis dilakukan untuk mengetahui konsentrasi standar larutan yang digunakan untuk pengujian adsorpsi *methylene blue*. Larutan standar yang digunakan menggunakan *methylene blue* yang didapat dari RofaLab yang terdapat di toko *e-commerce*. Untuk menentukan regresi linier pada larutan standar *methylene blue* maka digunakanlah konsentrasi sebesar 10, 8, 6, 4 dan 2 ppm yang akan diuji UV-Vis menggunakan spektrofotometer GENESYS 150-700 nm.

Pada **Gambar 4.27** menunjukkan grafik kurva hasil UV-Vis larutan standar *methylene blue*. Untuk mengetahui angka absorbansi, pewarna *methylene blue* dianalisis dengan spektrofotometer UV-Vis pada $\lambda = 664$ nm (Karuppaiyan et al., 2023). Pada 10 ppm didapatkan absorbansi sebesar 0,55815, pada 8 ppm sebesar 0,44901, pada 6 ppm sebesar 0,32157, pada 4 ppm sebesar 0,21246 dan 2ppm sebesar 0,14462. Setelah itu absorbansi dimasukan pada grafik untuk mengetahui persamaan regresi linear dari larutan standar *methylene blue*.



Gambar 4.27 Grafik UV-Vis kalibrasi larutan standar *methylene blue*.



Gambar 4.28 Grafik regresi linear larutan standar *methylene blue*.

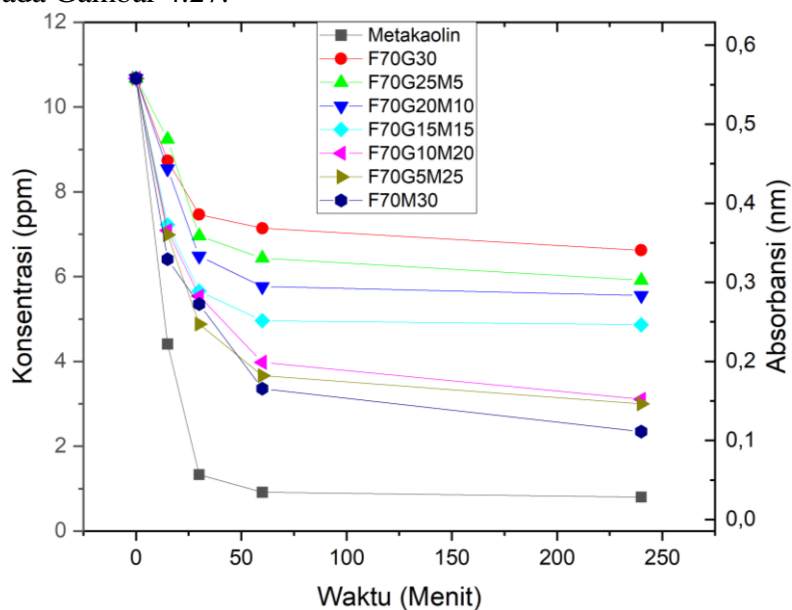
Pada **Gambar 4.28** didapatkan kurva regresi linear larutan standar *methylene blue* dengan rumus linear $y = 18,625x - 0,2797$ dengan $R^2 = 0,9905$. Jika disimak pada grafik larutan standar *methylene blue*, semakin besar konsentrasi maka semakin besar pula absorbansi, yang dimana hal tersebut sesuai dengan hukum *Lambert-Beer* (Lewis & Gagg, 2010). Kurva regresi linier ini yang akan digunakan nanti pada saat menghitung konversi nilai absorbansi ke konsentrasi.

Tabel 4.9 Hasil konversi absorbansi ke konsentrasi larutan adsorpsi *methylene blue*.

Komposit	Waktu (Menit)	Konsentrasi (ppm)	Absorbansi (nm)
F70G30	15	8,73177	0,4538
	30	7,46284	0,38567
	60	7,14108	0,3684

	240	6,62166	0,34051
F70G25M5	15	9,24149	0,48117
	30	6,96116	0,35874
	60	6,43806	0,33065
	240	5,91436	0,30253
F70G20M10	15	8,54101	0,44356
	30	6,48306	0,33307
	60	5,76514	0,29452
	240	5,55635	0,28331
F70G15M15	15	7,2214	0,37271
	30	5,65562	0,28864
	60	4,96258	0,25143
	240	4,86324	0,2461
F70G10M20	15	7,08732	0,36551
	30	5,53679	0,28226
	60	3,97918	0,19863
	240	3,10698	0,1518
F70G5M25	15	6,98354	0,35994
	30	4,87877	0,24693
	60	3,66479	0,18175
	240	3,00323	0,14623
F70M30	15	6,411	0,3292
	30	5,35222	0,27235
	60	3,35897	0,16533
	240	2,34503	0,11089

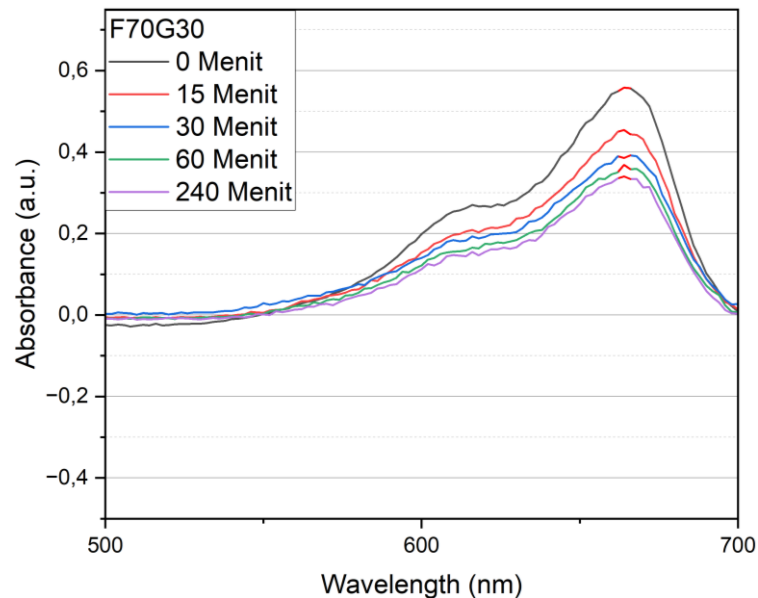
Pada **Tabel 4.9** menunjukkan hasil konversi absorbansi ke konsentrasi pada larutan adsorpsi *methylene blue*, yang dimana pergerakan angka dari absorbansi berjalan lurus dan sejajar dengan konsentrasinya. Tampilan visual dari data **Tabel 4.9** akan diGambarkan dalam grafik pada Gambar 4.27.



Gambar 4.29 Grafik konversi absorbansi ke konsentrasi larutan adsorpsi *methylene blue*.

Analisis **Gambar 4.29** adalah terjadinya penurunan nilai absorbansi seiring bertambahnya waktu adsorpsi. Sehingga bisa disimpulkan bahwa semakin lama waktu kontak geopolimer dengan larutan *methylene blue* maka semakin rendah juga nilai absorbansinya.

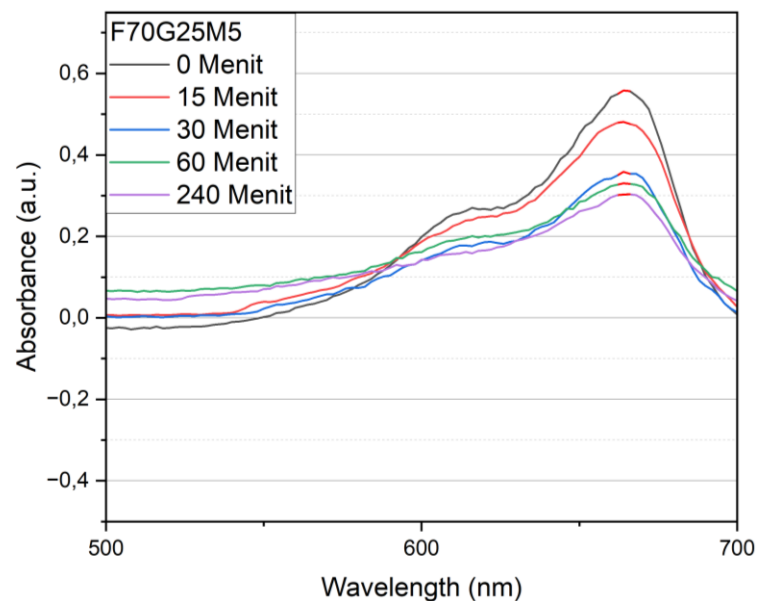
4.10.1 Hasil Pengujian UV-Vis *Methylene Blue* F70G30



Gambar 4.30 Grafik absorbansi UV-Vis F70G30.

Pada **Gambar 4.30** menunjukkan grafik absorbansi UV-Vis F70G30 nilai absorbansi yang diamati ada pada puncak $\lambda = 664$, dimana masing-masing nilai absorbansi berada pada nilai 0,4538 pada 15 menit, 0,38567 pada 30 menit, 0,3684 pada 60 menit dan 0,34051 pada 240 menit.

4.10.2 Hasil Pengujian UV-Vis *Methylene Blue* F70G25M5

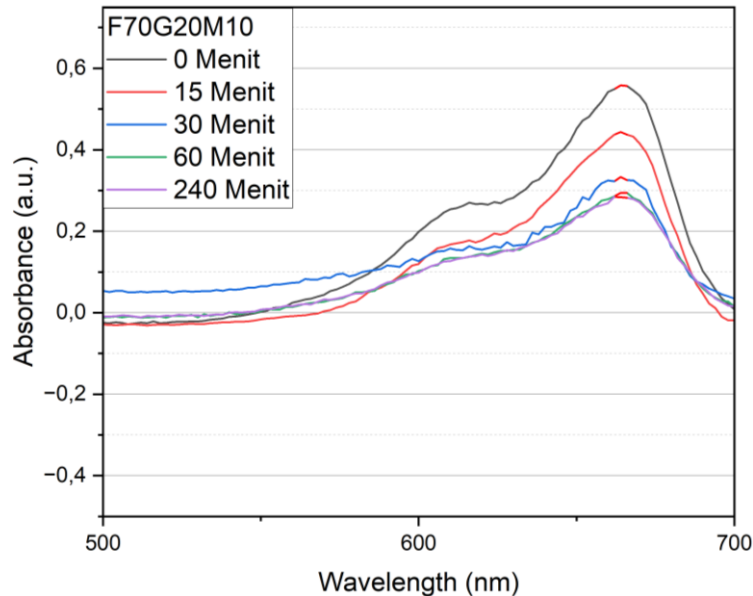


Gambar 4.31 Grafik absorbansi UV-Vis F70G25M5.

Pada **Gambar 4.31** menunjukkan grafik absorbansi UV-Vis F70G25M5 nilai absorbansi yang diamati ada pada puncak $\lambda = 664$, dimana masing-masing nilai absorbansi

berada pada nilai 0,48117 pada 15 menit, 0,35874 pada 30 menit, 0,33065 pada 60 menit dan 0,30253 pada 240 menit.

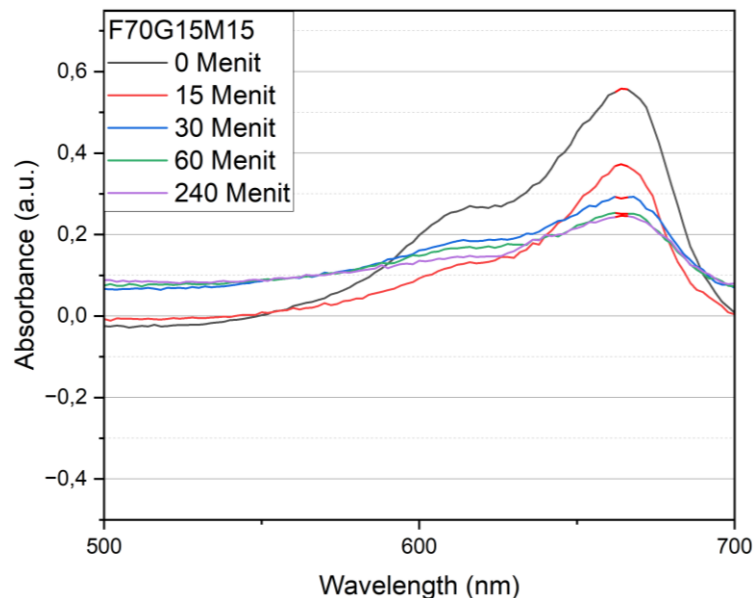
4.10.3 Hasil Pengujian UV-Vis *Metylene Blue* F70G20M10



Gambar 4.32 Grafik absorptansi UV-Vis F70G20M10.

Pada **Gambar 4.32** menunjukkan grafik absorptansi UV-Vis F70G20M10 nilai absorptansi yang diamati ada pada puncak $\lambda = 664$, dimana masing-masing nilai absorptansi berada pada nilai 0,44356 pada 15 menit, 0,33307 pada 30 menit, 0,29452 pada 60 menit dan 0,28331 pada 240 menit.

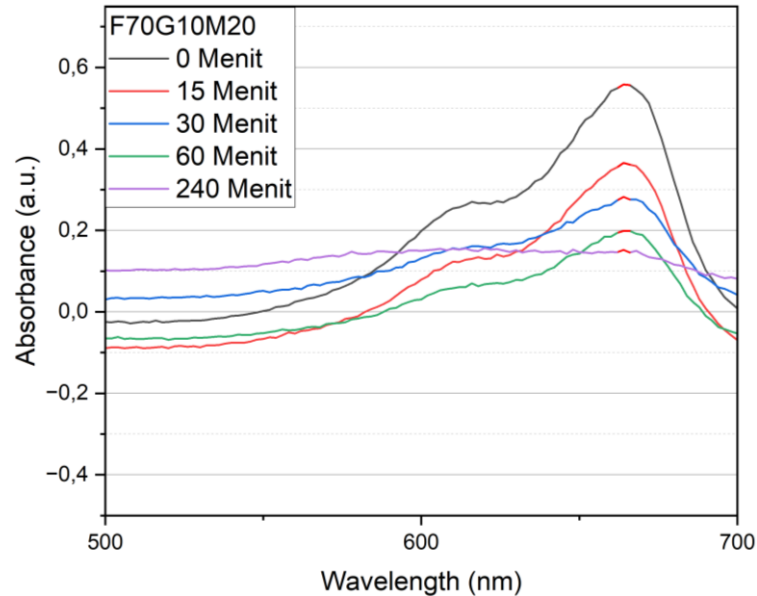
4.10.4 Hasil Pengujian UV-Vis *Metylene Blue* F70G15M15



Gambar 4.33 Grafik absorptansi UV-Vis F70G15M15.

Pada **Gambar 4.33** menunjukkan grafik absorptansi UV-Vis F70G15M15 nilai absorptansi yang diamati ada pada puncak $\lambda = 664$, dimana masing-masing nilai absorptansi berada pada nilai 0,37271 pada 15 menit, 0,28864 pada 30 menit, 0,25143 pada 60 menit dan 0,2461 pada 240 menit.

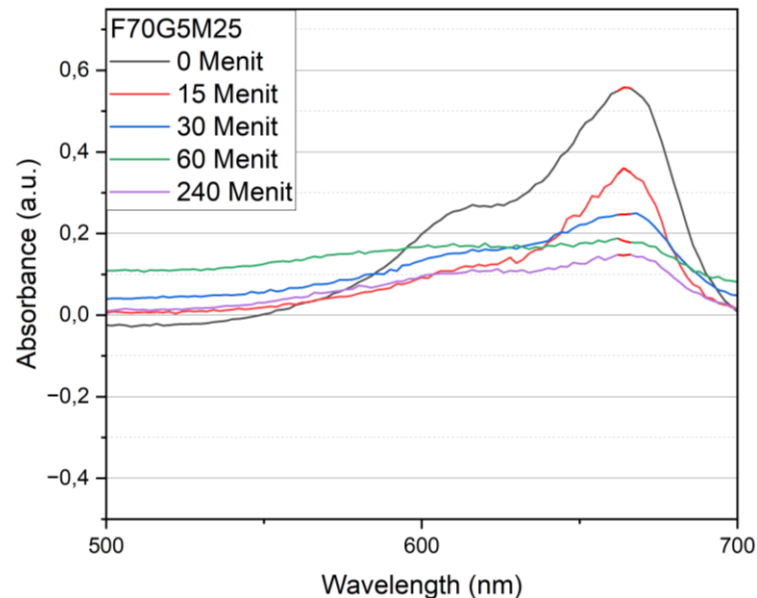
4.10.5 Hasil Pengujian UV-Vis *Metylene Blue* F70G10M20



Gambar 4.34 Grafik absorbansi UV-Vis F70G10M20.

Pada **Gambar 4.34** menunjukkan grafik absorbansi UV-Vis F70G10M20 nilai absorbansi yang diamati ada pada puncak $\lambda = 664$, dimana masing-masing nilai absorbansi berada pada nilai 0,36551 pada 15 menit, 0,28226 pada 30 menit, 0,19863 pada 60 menit dan 0,1518 pada 240 menit.

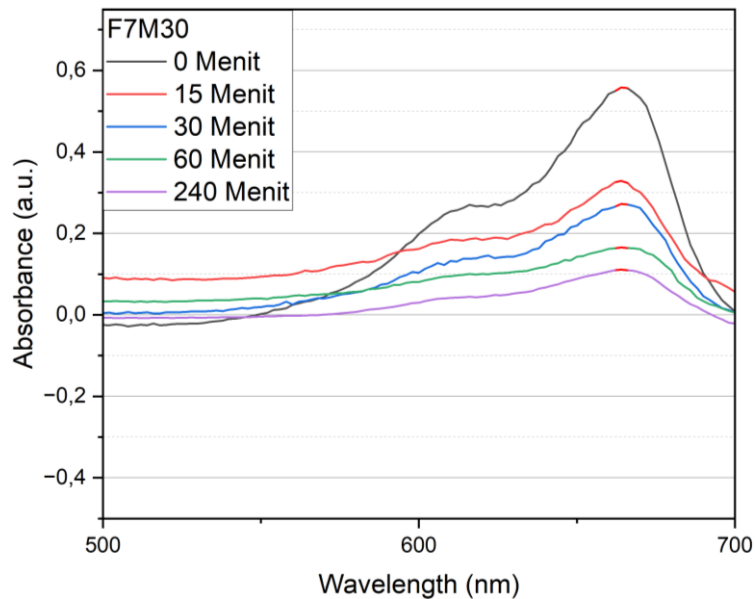
4.10.6 Hasil Pengujian UV-Vis *Metylene Blue* F70G5M25



Gambar 4.35 Grafik absorbansi UV-Vis F70G5M25.

Pada **Gambar 4.35** menunjukkan grafik absorbansi UV-Vis F70G5M25 nilai absorbansi yang diamati ada pada puncak $\lambda = 664$, dimana masing-masing nilai absorbansi berada pada nilai 0,35994 pada 15 menit, 0,24693 pada 30 menit, 0,18175 pada 60 menit dan 0,14623 pada 240 menit.

4.10.7 Hasil Pengujian UV-Vis *Metylene Blue* F70M30

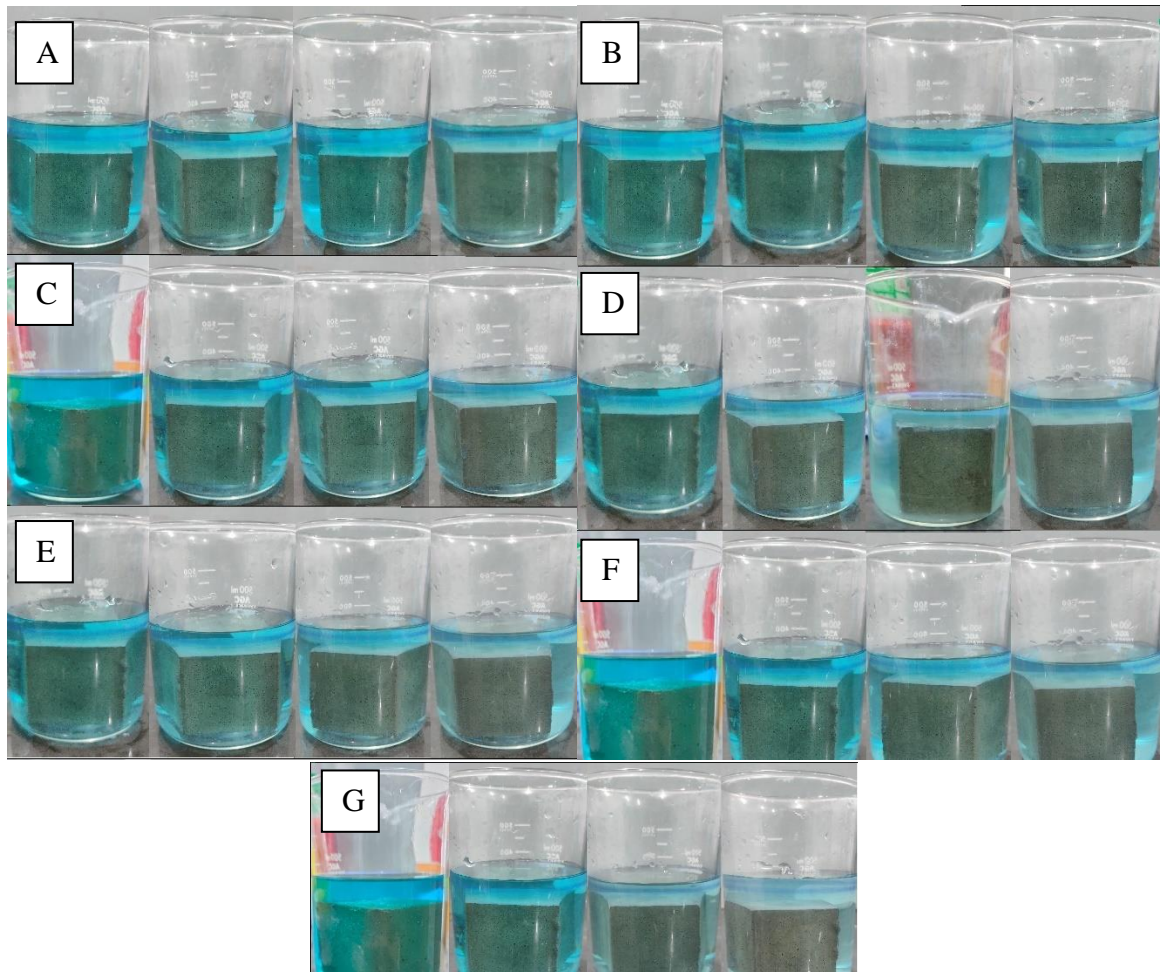


Gambar 4.36 Grafik absorbansi UV-Vis F70M30.

Pada **Gambar 4.36** menunjukkan grafik absorbansi UV-Vis F70M30 nilai absorbansi yang diamati ada pada puncak $\lambda = 664$, dimana masing-masing nilai absorbansi berada pada nilai 0,3292 pada 15 menit, 0,27235 pada 30 menit, 0,16533 pada 60 menit dan 0,11089 pada 240 menit.

4.11 Hasil Pengujian Adsorpsi *Metylene Blue*

Pengujian adsorpsi limbah *methylene blue* dilakukan dengan tujuan mengetahui *removal efficiency* (RE) dan *sorption capacity* (SC) mortar geopolimer sebagai adsorben dan *methylene blue* sebagai adsorbat. Metode adsorpsi yang dilakukan pada penelitian ini adalah dengan menyiapkan 250 ml larutan *methylene blue* yang dilarutkan pada aquades dengan konsentrasi awal 10 ppm pada gelas *baker*, lalu mortar geopolimer yang sudah ditimbang berat awalnya hingga 0,1 g direndamkan kedalam gelas *baker* yang berisi larutan awal. Variasi waktu perendaman yang digunakan adalah 15 menit, 30 menit, 60 menit dan 240 menit. Variasi waktu tersebut dipilih atas pertimbangan dosis adsorben terhadap adsorbat.



Gambar 4.37 Proses adsorpsi limbah *methylene blue* pada a) F70G30 b) F70G25M5 c) F70G10M20 d) F70G15M15 e) F70G10M20 f) F70G5M25 g) F70M30.

Pada **Gambar 4.37** menunjukkan hasil adsorpsi limbah *methylene blue*. Pengamatan visual pada waktu 4 jam menunjukkan perubahan warna biru terang jika dibandingkan waktu sebelumnya yang terjadi akibat proses adsorpsi pada larutan. Adsorpsi *methylene blue* dapat terjadi antara geopolimer dan larutan *methylene blue* (MB).

Pada penelitian ini, hasil akhir dari proses adsorpsi limbah *methylene blue* pada mortar geopolimer adalah dengan menghitung nilai *removal efficiency* (RE) dan *sorption capacity* (SC) yang akan dihitung pada waktu kontak mulai dari 15 menit, 30 menit, 60 menit hingga 240 menit dan tujuh variasi *mix design* yaitu F70G30, F70G25M5, F70G20M10, F70G15M15, F70G10M20, F70G5M25 dan F70M30 menggunakan persamaan 4.1 dan persamaan 4.2, masing-masing. Dimana C_i (mg/L) adalah konsentrasi awal larutan *methylene blue*, C_t (mg/L) adalah konsentrasi larutan *methylene blue* pada waktu t , m (g) adalah berat mortar geopolimer di udara dan V (L) adalah volume awal larutan *methylene blue*.

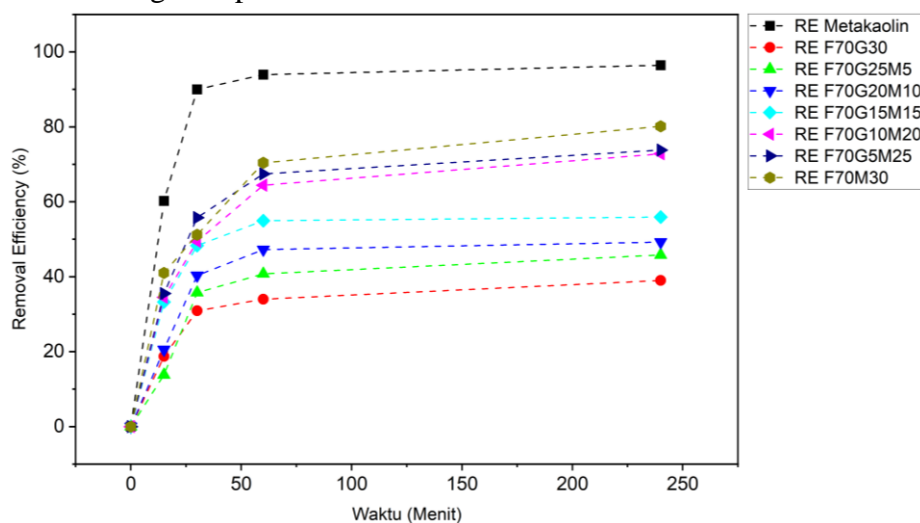
$$RE (\%) = \frac{100(C_i - C_t)}{C_i} \dots\dots\dots(4.1)$$

$$SC \left(\frac{mg}{g}\right) = \frac{V(C_i - C_t)}{m} \dots\dots\dots(4.2)$$

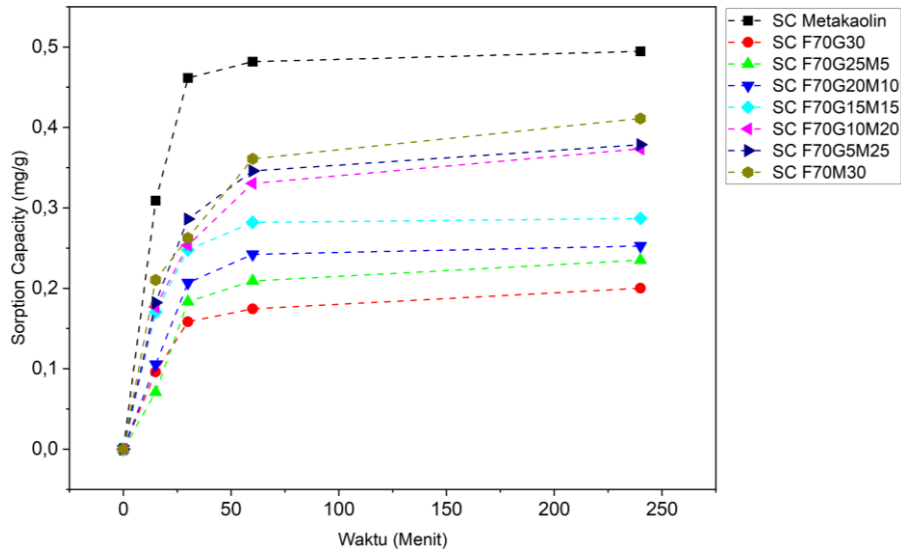
Tabel 4.10 Hasil perhitungan *removal efficiency* dan *sorption capacity* mortar geopolimer.

Komposit	Waktu (Menit)	RE (%)	SC (mg/g)
F70G30	15	18,69529	0,09591
	30	30,90173	0,15853
	60	33,99695	0,17441
	240	38,99346	0,20004
F70G25M5	15	13,79199	0,07075
	30	35,72767	0,18328
	60	40,75965	0,2091
	240	45,79737	0,23494
F70G20M10	15	20,53032	0,10532
	30	40,32675	0,20688
	60	47,23282	0,24231
	240	49,24124	0,25261
F70G15M15	15	33,22425	0,17044
	30	48,2863	0,24771
	60	54,95297	0,28191
	240	55,90863	0,28681
F70G10M20	15	34,51402	0,17706
	30	49,42936	0,25358
	60	64,41279	0,33044
	240	72,80301	0,37348
F70G5M25	15	35,51234	0,18218
	30	55,7592	0,28605
	60	67,43707	0,34596
	240	73,80095	0,3786
F70M30	15	41,01989	0,21043
	30	51,20487	0,26268
	60	70,37893	0,36105
	240	80,13258	0,41108

Pada **Tabel 4.10** menunjukkan hasil perhitungan *removal efficiency* dan *sorption capacity* pada mortar geopolimer, yang dimana pergerakan angka dari absorbansi berjalan lurus dan sejajar dengan konsentrasinya. Tampilan visual dari data **Tabel 4.10** akan digambarkan dalam grafik pada **Gambar 4.38** dan **Gambar 4.39**.

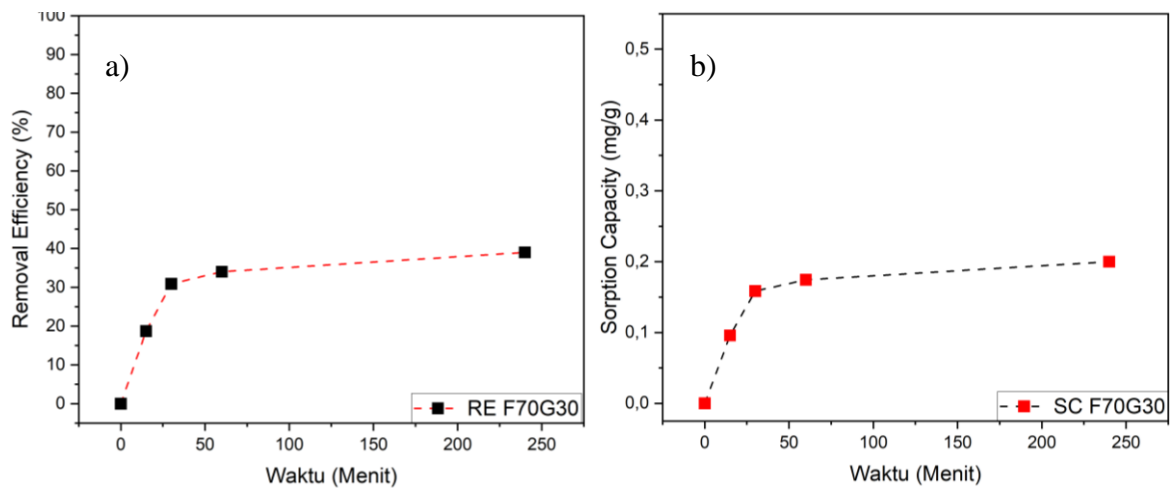


Gambar 4.38 Grafik *methylene blue waste removal efficiency* pada mortar geopolimer.



Gambar 4.39 Grafik *methylene blue* waste sorption capacity pada mortar geopolimer.

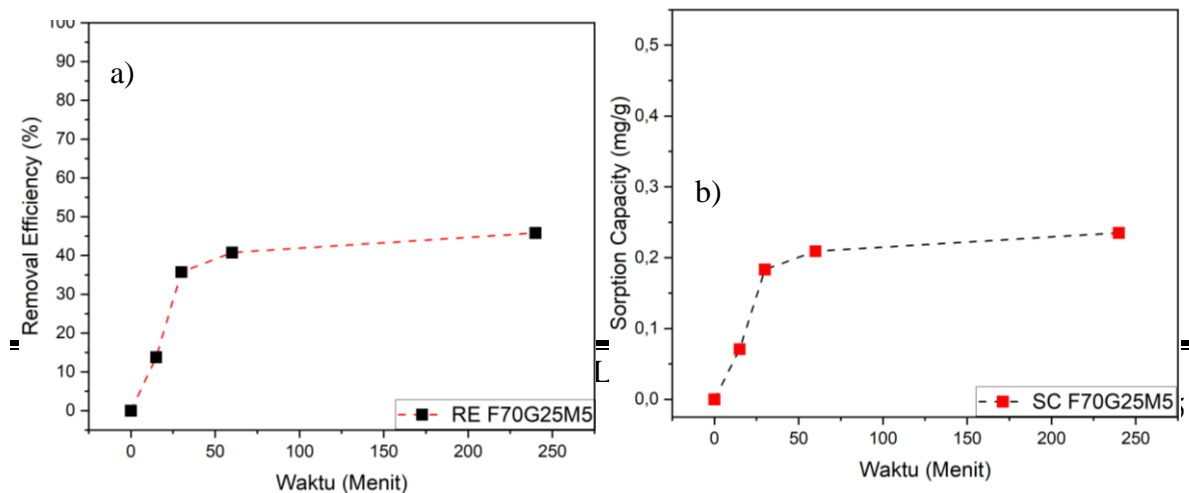
4.11.1 Hasil Pengujian Adsorpsi *Methylene Blue* F70G30



Gambar 4.40 Grafik a) RE dan b) SC F70G30.

Grafik RE dan SC F70G30 pada **Gambar 4.40** (a) dan (b) memiliki nilai *removal efficiency* dengan angka 18,69529 % pada waktu 15 menit, 30,90173 % pada 30 menit, 33,99695 % pada 60 menit dan 38,99346 % pada 240 menit. Sementara sorption capacity didapatkan pada angka 0,09591 mg/g pada waktu 15 menit, 0,15853 mg/g pada 30 menit, 0,17441 mg/g pada 60 menit dan 0,20004 mg/g pada 240 menit.

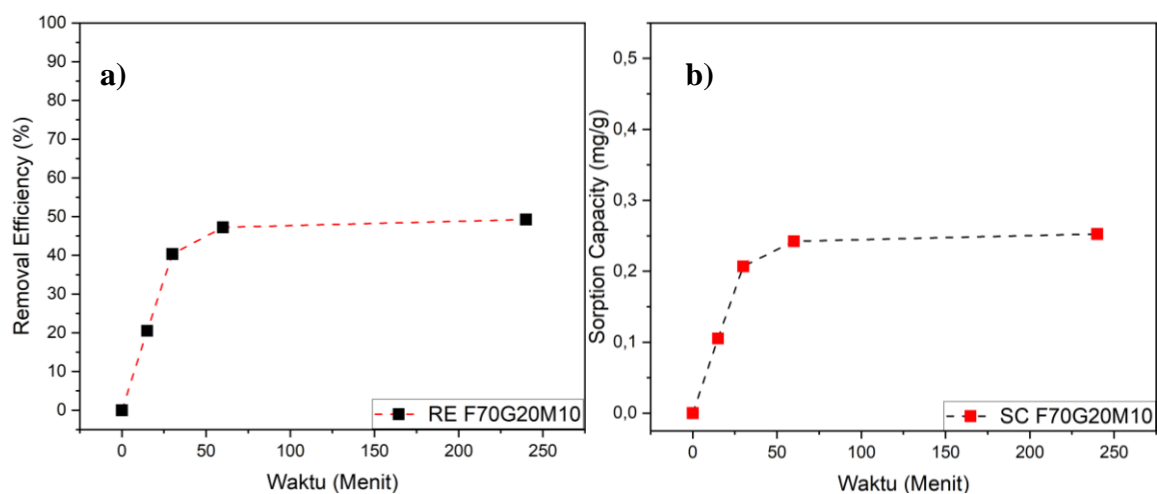
4.11.2 Hasil Pengujian Adsorpsi *Methylene Blue* F70G25M5



Gambar 4.41 Grafik a) RE dan b) SC F70G25M5.

Grafik RE dan SC F70G25M5 pada **Gambar 4.41 (a)** dan **(b)** memiliki nilai *removal efficiency* dengan angka 13,79199 % pada waktu 15 menit, 35,72767 % pada 30 menit, 40,75965 % pada 60 menit dan 45,79737 % pada 240 menit. Sementara sorption capacity didapatkan pada angka 0,07075 mg/g pada waktu 15 menit, 0,18328 mg/g pada 30 menit, 0,2091 mg/g pada 60 menit dan 0,23494 mg/g pada 240 menit.

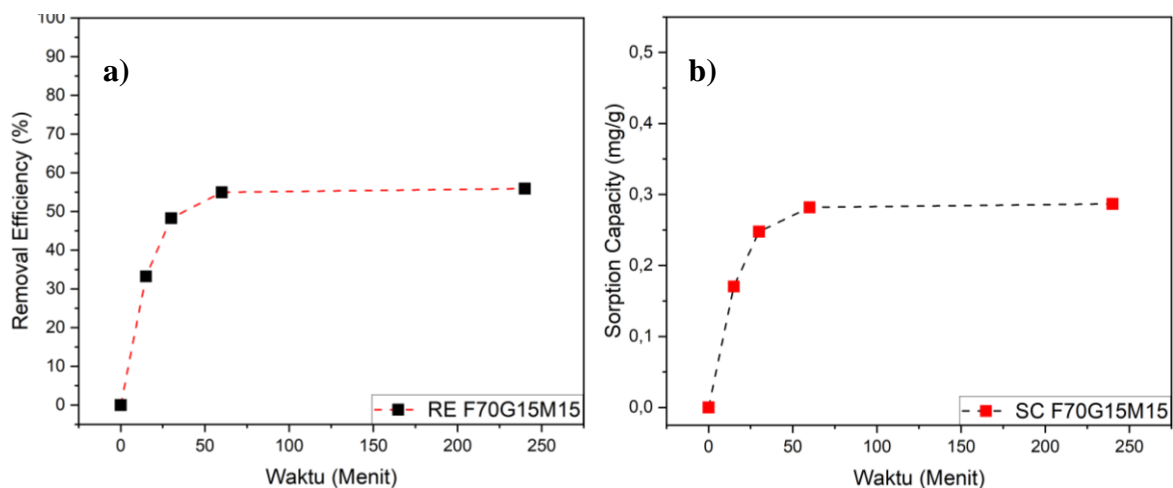
4.11.3 Hasil Pengujian Adsorpsi *Metylene Blue* F70G20M10



Gambar 4.42 Grafik a) RE dan b) SC F70G20M10.

Grafik RE dan SC F70G20M10 pada **Gambar 4.42 (a)** dan **(b)** memiliki nilai *removal efficiency* dengan angka 20,53032 % pada waktu 15 menit, 40,32675 % pada 30 menit, 47,23282 % pada 60 menit dan 49,24124 % pada 240 menit. Sementara sorption capacity didapatkan pada angka 0,10532 mg/g pada waktu 15 menit, 0,20688 mg/g pada 30 menit, 0,24231 mg/g pada 60 menit dan 0,25261 mg/g pada 240 menit.

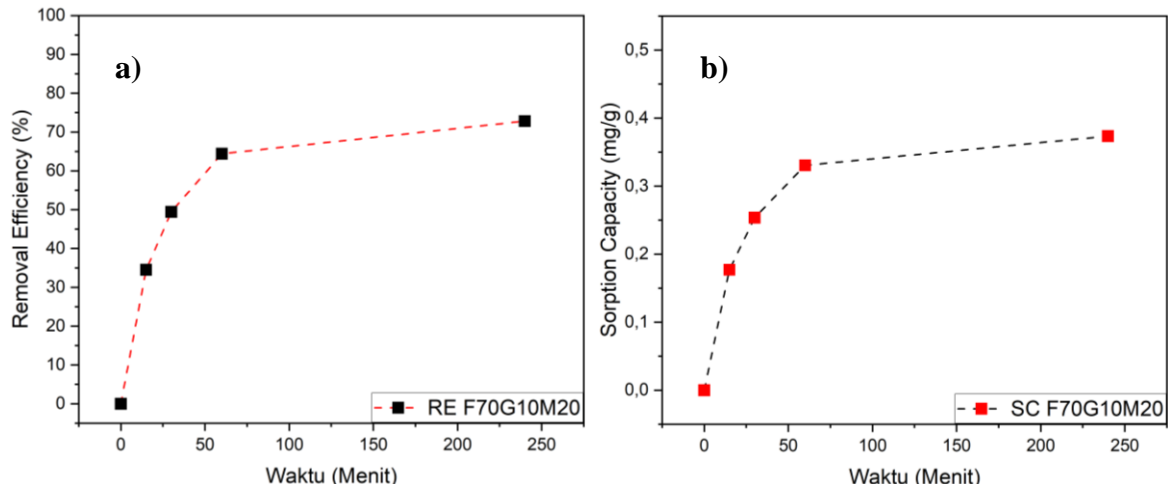
4.11.4 Hasil Pengujian Adsorpsi *Metylene Blue* F70G15M15



Gambar 4.43 Grafik a) RE dan b) SC F70G15M15.

Grafik RE dan SC F70G15M15 pada **Gambar 4.43 (a)** dan **(b)** memiliki nilai *removal efficiency* dengan angka 33,22425 % pada waktu 15 menit, 48,2863 % pada 30 menit, 54,95297 % pada 60 menit dan 55,90863 % pada 240 menit. Sementara sorption capacity didapatkan pada angka 0,17044 mg/g pada waktu 15 menit, 0,24771 mg/g pada 30 menit, 0,28191 mg/g pada 60 menit dan 0,28681 mg/g pada 240 menit.

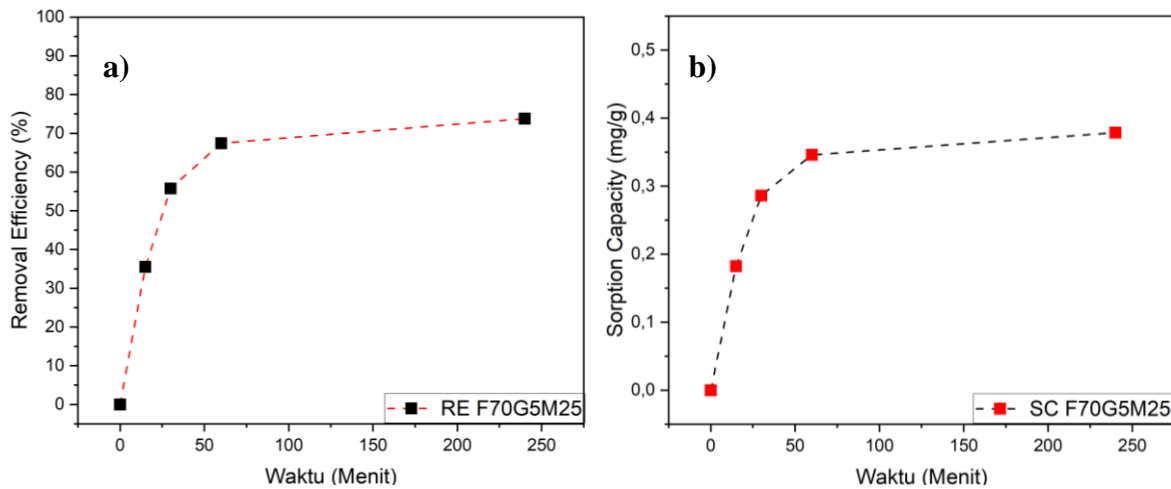
4.11.5 Hasil Pengujian Adsorpsi *Metylene Blue* F70G10M20



Gambar 4.44 Grafik a) RE dan b) SC F70G10M20.

Grafik RE dan SC F70G10M20 pada **Gambar 4.44 (a)** dan **(b)** memiliki nilai *removal efficiency* dengan angka 34,51402 % pada waktu 15 menit, 49,42936 % pada 30 menit, 64,41279 % pada 60 menit dan 72,80301 % pada 240 menit. Sementara sorption capacity didapatkan pada angka 0,17706 mg/g pada waktu 15 menit, 0,25358 mg/g pada 30 menit, 0,33044 mg/g pada 60 menit dan 0,37348 mg/g pada 240 menit.

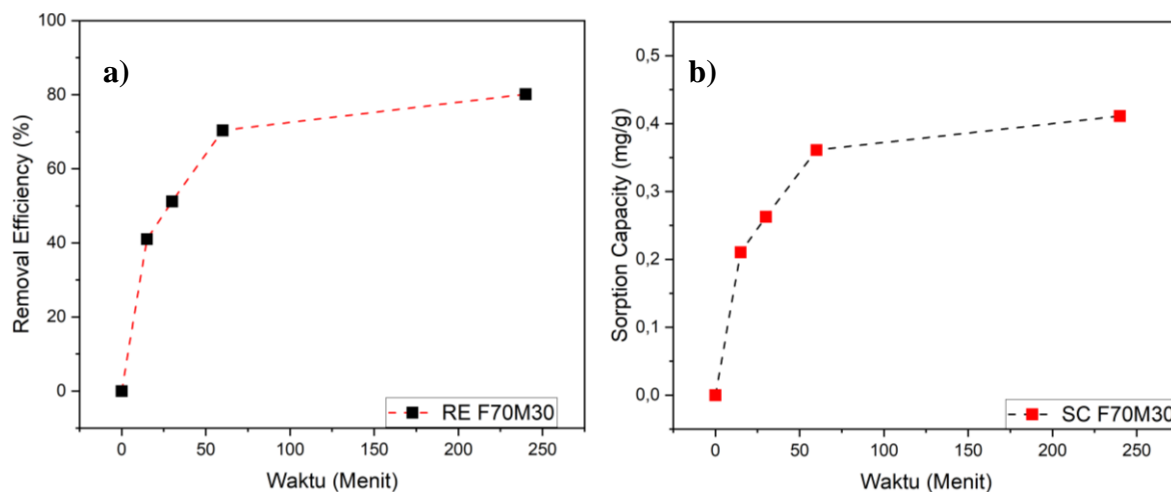
4.11.6 Hasil Pengujian Adsorpsi *Metylene Blue* F70G5M25



Gambar 4.45 Grafik a) RE dan b) SC F70G5M25.

Grafik RE dan SC F70G5M25 pada **Gambar 4.45 (a)** dan **(b)** memiliki nilai *removal efficiency* dengan angka 35,51234 % pada waktu 15 menit, 55,7592 % pada 30 menit, 67,43707 % pada 60 menit dan 73,80095 % pada 240 menit. Sementara sorption capacity didapatkan pada angka 0,18218 mg/g pada waktu 15 menit, 0,28605 mg/g pada 30 menit, 0,34596 mg/g pada 60 menit dan 0,3786 mg/g pada 240 menit.

4.11.7 Hasil Pengujian Adsorpsi *Metylene Blue* F70M30



Gambar 4.46 Grafik a) RE dan b) SC F70M30.

Grafik RE dan SC F70M30 pada **Gambar 4.46 (a)** dan **(b)** memiliki nilai *removal efficiency* dengan angka 41,01989 % pada waktu 15 menit, 51,20487 % pada 30 menit, 70,37893 % pada 60 menit dan 80,13258 % pada 240 menit. Sementara sorption capacity didapatkan pada angka 0,21043 mg/g pada waktu 15 menit, 0,26268 mg/g pada 30 menit, 0,36105 mg/g pada 60 menit dan 0,41108 mg/g pada 240 menit.

Hasil pengujian yang telah dilakukan menunjukkan angka yang sangat bervariasi, dikarenakan penambahan unsur metakaolin dan pengurangan unsur GGBFS. Hal tersebut memengaruhi penurunan kuat tekan seiring ditambahkannya metakaolin dikarenakan berkurangnya kadar CaO pada GGBFS yang berfungsi meningkatkan kuat tekan. Pengurangan GGBFS juga berpengaruh pada berkurangnya densitas pada mortar geopolimer dikarenakan kerapatan struktur yang berkurang. Karena menurunnya tingkat

kerapatan pada setiap sampel, berpengaruh baik kepada pengujian adsorpsi limbah *methylene blue* maupun *Water Adsorption*. Ketika mortar geopolimer mengalami penurunan nilai densitas akan menyebabkan nilai penyerapan limbah air dan *methylene blue* semakin meningkat. Data rekap dari pengujian yang telah dilakukan dan dijelaskan diatas disajikan dalam **Tabel 4.11** dibawah berikut.

Tabel 4.11 Rekap hasil pengujian dari tiap variasi mortar geopolimer.

Variasi	Kuat Tekan 56 Hari (MPa)	Densitas (g/cm ³)	Water <i>Adsorption</i> 24 jam (g/100cm ²)	Methylene Blue Removal Efficiency (%)	Methylene Blue Sorption Capacity (mg/g)
F70G30	59,42	2,41834	13.6	38,99346	0,20004
F70G25M5	50,37	2,31371	18	45,79737	0,23494
F70G20M10	48,03	2,29121	21.2	49,24124	0,25261
F70G15M15	44,28	2,26313	28.8	55,90863	0,28681
F70G10M20	44,38	2,249	29.2	72,80301	0,37348
F70G5M25	41,58	2,23639	34.8	73,80095	0,3786
F70M30	37,69	2,20713	38.4	80,13258	0,41108

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini, mortar geopolimer berbahan dasar fly ash dan GGBFS berhasil diproduksi dengan memvariasikan komposisi metakaolin yang ditambahkan ke prekursor. Proses utama dalam produksi mortar geopolimer adalah reaksi geopolimerisasi alumina dan silika membentuk ikatan polimer Si-O-Al yang diaktivasi oleh larutan basa. Berdasarkan hasil yang diperoleh, kesimpulan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Pada mortar geopolimer berbasis fly ash dan GGBFS dengan penambahan metakaolin ke dalam prekursor mortar geopolimer dengan variasi F70G30, F70G25M5, F70G20M10, F70G15M15, F70G10M20, F70G5M25, dan F70M30 diperoleh variasi *mix design* yang paling baik nilai kuat tekannya adalah variasi F70G25M5 dengan penambahan metakaolin sebanyak 5%, dengan nilai kuat tekan pada umur 56 hari sebesar 50,37 MPa. Penambahan metakaolin pada mortar geopolimer berbasis fly ash dan GGBFS mempengaruhi nilai kuat tekan mortar tersebut, di mana semakin banyak metakaolin yang ditambahkan, maka nilai kekuatan tekan mortar akan semakin menurun.
2. Pada mortar geopolimer berbasis fly ash dan GGBFS dengan penambahan metakaolin ke dalam prekursor mortar geopolimer dengan variasi F70G30, F70G25M5, F70G20M10, F70G15M15, F70G10M20, F70G5M25, dan F70M30 diperoleh hasil adsorpsi limbah *methylene blue* pada mortar geopolimer yang paling bagus adalah variasi F70G5M25 dengan penambahan metakaolin sebanyak 25%, dengan nilai *Removal Efficiency* sebesar 73,80095 % dan nilai *Sorption Capacity* sebesar 0,3786 mg/g. Penambahan metakaolin pada mortar geopolimer berbasis fly ash dan GGBFS memiliki nilai *Removal Efficiency* yang berbanding terbalik dengan nilai kuat tekannya. Dimana semakin tinggi penambahan metakaolin, maka persentase *Removal Efficiency* juga akan meningkat.

5.2 Saran

Dalam sebuah penelitian dibutuhkan beberapa saran yang perlu diperhatikan untuk kelancaran penelitian selanjutnya, saran berdasarkan penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Kualitas cetakan mortar atau trigang perlu dikalibrasi dan ditinjau sebelum pembuatan mortar geopolimer dengan tujuan agar hasil mortar geopolimer yang diproduksi memiliki volume yang sesuai dengan standar pembuatan mortar dan yang paling penting memiliki permukaan yang rata agar dapat menghasilkan nilai yang lebih baik pada pengujian kuat tekan.
2. Saat awal pembuatan larutan adsorpsi *Methylene Blue* diperlukan kalibrasi ulang dengan pengujian UV-Vis agar larutan memiliki standar awal yang sama dengan larutan standar yang dibuat sebelumnya, dan juga untuk mengurangi toleransi *human error*.
3. Perhatikan molaritas larutan alkali yang digunakan pada saat proses produksi mortar geopolimer, karena salah satu faktor nilai kuat tekan yang baik adalah molaritas dari larutan alkali yang digunakan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M. M. A. B., Ming, L. Y., Yong, H. C., & Tahir, M. F. M. (2018). Clay-Based Materials in Geopolymer Technology. In *Cement Based Materials*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74438>
- Albidah, A., Alghannam, M., Abbas, H., Almusallam, T., & Al-Salloum, Y. (2021). Characteristics of metakaolin-based geopolymer concrete for different mix design parameters. *Journal of Materials Research and Technology*, *10*, 84–98. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.104>
- Alterary, S. S., & Marei, N. H. (2021a). Fly ash properties, characterization, and applications: A review. *Journal of King Saud University - Science*, *33*(6), 101536. <https://doi.org/10.1016/J.JKSUS.2021.101536>
- Alterary, S. S., & Marei, N. H. (2021b). Fly ash properties, characterization, and applications: A review. *Journal of King Saud University - Science*, *33*(6), 101536. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101536>
- Alzeebaree, R. (n.d.). *Mechanical Performance and Durability of Confined and Unconfined Geopolymer Concrete Exposed to Severe Environments*. <https://www.researchgate.net/publication/340436680>
- Artioli, Y. (2008). Adsorption. In *Encyclopedia of Ecology* (pp. 60–65). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00252-4>
- Benavent, V., Lahalle, H., Patapy, C., Renaudin, G., & Cyr, M. (2022). Microstructural evolution of a sodium metakaolin-based geopolymer paste in neutral and CEM V basic environment. *Cement and Concrete Research*, *161*, 106897. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2022.106897>
- Cong, P., & Cheng, Y. (2021). Advances in geopolymer materials: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, *8*(3), 283–314. <https://doi.org/10.1016/J.JTTE.2021.03.004>
- Curcio, F., DeAngelis, B. A., & Pagliolico, S. (1998). Metakaolin as a pozzolanic microfiller for high-performance mortars. *Cement and Concrete Research*, *28*(6), 803–809. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00045-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00045-3)
- da Silva Godinho, D. dos S., Pelisser, F., & Bernardin, A. M. (2022). High temperature performance of geopolymers as a function of the Si/Al ratio and alkaline media. *Materials Letters*, *311*, 131625. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2021.131625>
- Davidovits, J. (n.d.-a). *Geopolymer Chemistry and Applications*, 5th edition. <https://www.researchgate.net/publication/265076752>
- Davidovits, J. (n.d.-b). *PROPERTIES OF GEOPOLYMER CEMENTS*. www.geopolymer.org
- El Alouani, M., Alehyen, S., El Achouri, M., & Taibi, M. (2019). Preparation, Characterization, and Application of Metakaolin-Based Geopolymer for Removal of

- Methylene Blue from Aqueous Solution. *Journal of Chemistry*, 2019, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2019/4212901>
- Eshghabadi, F., & Javanbakht, V. (2024). Preparation of porous metakaolin-based geopolymer foam as an efficient adsorbent for dye removal from aqueous solution. *Journal of Molecular Structure*, 1295, 136639. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.136639>
- Gameiro, A., Santos Silva, A., Faria, P., Grilo, J., Branco, T., Veiga, R., & Velosa, A. (2014). Physical and chemical assessment of lime–metakaolin mortars: Influence of binder:aggregate ratio. *Cement and Concrete Composites*, 45, 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.06.010>
- Garg, N. (2016). *Raman spectroscopy for characterizing and determining the pozzolanic reactivity of fly ashes*. <https://www.researchgate.net/publication/258694643>
- Gohain Henry Jackson Foundation, N. M. (2009). *Studies on the structure and function of phenazine modifying enzymes PhzM and PhzS involved in the biosynthesis of pyocyanin*. <https://doi.org/10.17877/DE290R-8364>
- Gonçalves, D. K. C., Lana, S. L. B., Sales, R. B. C., & Aguilar, M. T. P. (2022). Study of metakaolins with different amorphities and particle sizes activated by KOH and K₂SiO₃. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00778. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00778>
- He, P., Wang, M., Fu, S., Jia, D., Yan, S., Yuan, J., Xu, J., Wang, P., & Zhou, Y. (2016). Effects of Si/Al ratio on the structure and properties of metakaolin based geopolymer. *Ceramics International*, 42(13), 14416–14422. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2016.06.033>
- Ilic, B., Mitrovic, A., & Milicic, L. (2010). Thermal treatment of kaolin clay to obtain metakaolin. *Hemijska Industrija*, 64(4), 351–356. <https://doi.org/10.2298/HEMIND100322014I>
- Jin, H., Zhang, Y., Wang, Q., Chang, Q., & Li, C. (2021). Rapid removal of methylene blue and nickel ions and adsorption/desorption mechanism based on geopolymer adsorbent. *Colloids and Interface Science Communications*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2021.100551>
- Jindal, B. B. (2019). Investigations on the properties of geopolymer mortar and concrete with mineral admixtures: A review. *Construction and Building Materials*, 227, 116644. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.08.025>
- Johan Soentpiet Steenie Wallah, B. E., & Manalip, H. (2018). MODULUS ELASTISITAS BETON GEOPOLYMER BERBASIS FLY ASH DARI PLTU AMURANG. *Jurnal Sipil Statik*, 6(7), 517–526.
- Karuppaiyan, J., Jeyalakshmi, R., Kiruthika, S., Wadaan, M. A., Khan, M. F., & Kim, W. (2023). A study on the role of surface functional groups of metakaolin in the removal of methylene blue: Characterization, kinetics, modeling and RSM optimization. *Environmental Research*, 226, 115604. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115604>

- Katheresan, V., Kansedo, J., & Lau, S. Y. (2018). Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 4676–4697. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2018.06.060>
- Khatib, J. M., Baalbaki, O., & ElKordi, A. A. (2018). Metakaolin. *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete: Characterisation, Properties and Applications*, 493–511. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00015-8>
- Kumar, S., Gautam, P. D., & Sarath Chandra Kumar, B. (2019). Effect of alkali activator ratio on mechanical properties of GGBS based geopolymer concrete. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(12), 947–952. <https://doi.org/10.35940/ijitee.J9539.1081219>
- Lewis, P. R., & Gagg, C. (2010). Examination and analysis of failed components. In *Forensic Polymer Engineering* (pp. 42–88). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781845697808.42>
- Liang, K., Wang, X. Q., Chow, C. L., & Lau, D. (2022). A review of geopolymer and its adsorption capacity with molecular insights: A promising adsorbent of heavy metal ions. *Journal of Environmental Management*, 322, 116066. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116066>
- Liu, J., Doh, J.-H., Dinh, H. L., Ong, D. E. L., Zi, G., & You, I. (2022). Effect of Si/Al molar ratio on the strength behavior of geopolymer derived from various industrial waste: A current state of the art review. *Construction and Building Materials*, 329, 127134. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127134>
- Lootens, D., & Bentz, D. P. (2016). On the relation of setting and early-age strength development to porosity and hydration in cement-based materials. *Cement and Concrete Composites*, 68, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.02.010>
- Mabroum, S., Moukannaa, S., El Machi, A., Taha, Y., Benzaazoua, M., & Hakkou, R. (2020). Mine wastes based geopolymers: A critical review. *Cleaner Engineering and Technology*, 1, 100014. <https://doi.org/10.1016/J.CLET.2020.100014>
- Matinfar, M., & Nychka, J. A. (2023). A review of sodium silicate solutions: Structure, gelation, and syneresis. *Advances in Colloid and Interface Science*, 322, 103036. <https://doi.org/10.1016/J.CIS.2023.103036>
- Mussa, Z. H., Al-Ameer, L. R., Al-Qaim, F. F., Deyab, I. F., Kamyab, H., & Chelliapan, S. (2023). A comprehensive review on adsorption of methylene blue dye using leaf waste as a bio-sorbent: isotherm adsorption, kinetics, and thermodynamics studies. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(8), 940. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11432-1>
- Oladoye, P. O., Ajiboye, T. O., Omotola, E. O., & Oyewola, O. J. (2022a). Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater. *Results in Engineering*, 16, 100678. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2022.100678>

- Oladoye, P. O., Ajiboye, T. O., Omotola, E. O., & Oyewola, O. J. (2022b). Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater. *Results in Engineering*, *16*, 100678. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2022.100678>
- Özbay, E., Erdemir, M., & Durmuş, H. I. (2016). Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review. *Construction and Building Materials*, *105*, 423–434. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.12.153>
- Perez-Garcia, F., Rubio-Cintas, M. D., Parron-Rubio, M. E., & Garcia-Manrique, J. M. (2020). Advances in the Analysis of Properties Behaviour of Cement-Based Grouts with High Substitution of Cement with Blast Furnace Slags. *Materials*, *13*(3), 561. <https://doi.org/10.3390/ma13030561>
- Poon, C.-S., Lam, L., Kou, S. C., Wong, Y.-L., & Wong, R. (2001). Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes. *Cement and Concrete Research*, *31*(9), 1301–1306. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00581-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00581-6)
- Priastiwi, Y. A., Hidayat, A., Daryanto, D., & Salamasyah, Z. (2020). Pengaruh Substitusi Tanah Putih pada Mortar Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash dengan Aktifator Natrium Hidroksida. In *Media Komunikasi Teknik Sipil* (Vol. 26, Issue 1).
- Putero, S. H., Rosita, W., Santosa, H. B., & Budiarto, R. (2013). The Performance of Various Pozzolanic Materials in Improving Quality of Strontium Liquid Waste Cementation. *Procedia Environmental Sciences*, *17*, 703–710. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.087>
- Saloma, Hanafiah, Elysandi, D. O., & Meykan, D. G. (2017). *Effect of Na₂SiO₃/NaOH on mechanical properties and microstructure of geopolymer mortar using fly ash and rice husk ash as precursor*. 050013. <https://doi.org/10.1063/1.5011552>
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, *114*, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Silva, M., Caro, V., Guzmán, C., Perry, G., Areche, C., & Cornejo, A. (2020). *α -Synuclein and tau, two targets for dementia* (pp. 1–25). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819483-6.00001-1>
- Sithole, N. T., & Mashifana, T. (2020). Geosynthesis of building and construction materials through alkaline activation of granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, *264*, 120712. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120712>
- Vandhiyan, R., Vijay, T. J., & Manoj Kumar, M. (2021). Effect of Fine Aggregate Properties on Cement Mortar Strength. *Materials Today: Proceedings*, *37*(Part 2), 2019–2026. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.07.498>

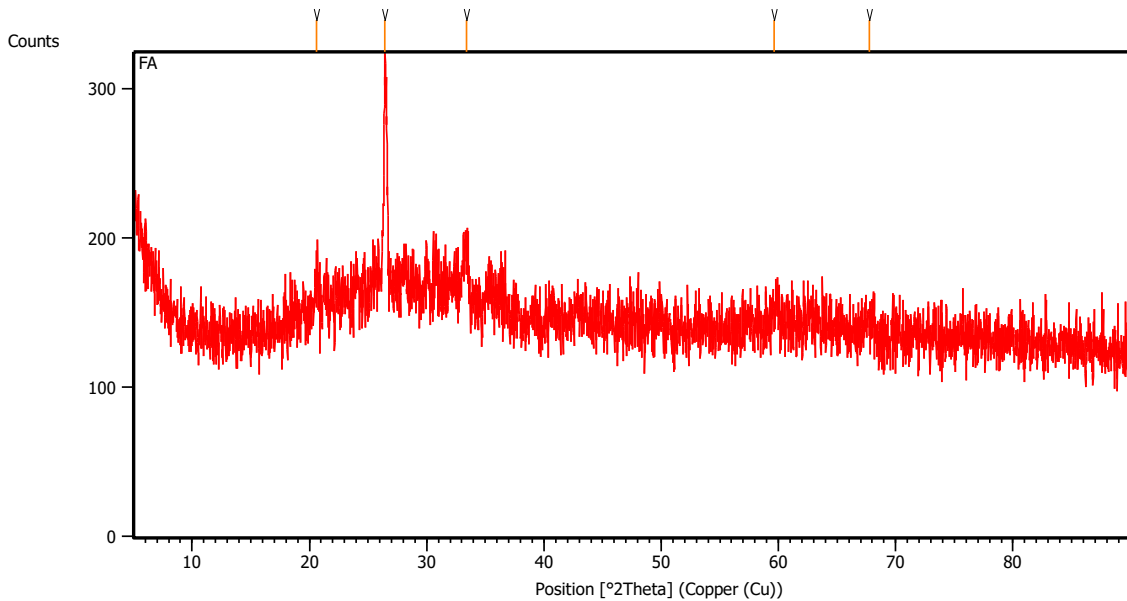
- Wahid, N., & Taufan, M. (2020). Pemanfaatan GGBFS Sebagai Bahan Tambah Adukan Mortar. *Potensi : Jurnal Sipil Politeknik*, 22(1), 44–54. <https://doi.org/10.35313/potensi.v22i1.1788>
- Wubet, W. (2019). *Green Synthesis of CuO Nanoparticles for the Application of Dye Sensitized Solar Cell*. <https://www.researchgate.net/publication/334537641>
- Zhang, H. Y., Liu, J. C., & Wu, B. (2021). Mechanical properties and reaction mechanism of one-part geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 273, 121973. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121973>
- Zhang, M., Guo, H., El-Korchi, T., Zhang, G., & Tao, M. (2013). Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. *Construction and Building Materials*, 47, 1468–1478. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.017>
- Zhang, P., Zheng, Y., Wang, K., & Zhang, J. (2018). A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar. *Composites Part B: Engineering*, 152, 79–95. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.06.031>
- Zhang, Z. H., Zhu, H. J., Zhou, C. H., & Wang, H. (2016). Geopolymer from kaolin in China: An overview. *Applied Clay Science*, 119, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.04.023>
- Zhao, J., Tong, L., Li, B., Chen, T., Wang, C., Yang, G., & Zheng, Y. (2021). Eco-friendly geopolymer materials: A review of performance improvement, potential application and sustainability assessment. *Journal of Cleaner Production*, 307, 127085. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127085>

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Lampiran 1 – Hasil Uji XRD

1. Fly Ash



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
20.6069	21.33	0.4015	4.31024	15.88
26.4252	134.33	0.2007	3.37295	100.00
33.3779	30.85	0.4015	2.68455	22.97
59.6499	14.28	0.8029	1.55008	10.63
67.7702	12.50	0.8029	1.38277	9.30

Name and formula

Reference code: 01-089-8939

Mineral name: Quartz alpha
Compound name: Silicon Oxide

Empirical formula: O₂Si
Chemical formula: SiO₂

Crystallographic parameters

Crystal system: Hexagonal
Space group: P3221
Space group number: 154

a (Å): 4,9628
b (Å): 4,9628
c (Å): 5,4360
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 120,0000

Calculated density (g/cm³): 2,58

Volume of cell (10⁶ pm³): 115,95

Z: 3,00

RIR: 2,80

Status, subfiles and quality

Status: Diffraction data collected at non ambient temperature

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic

ICSD Pattern

Inorganic

Mineral

Quality: Calculated (C)

Comments

ICSD collection code: 089281

Creation Date: 01/01/1970

Modification Date: 01/01/1970

ICSD Collection Code: 089281

Calculated Pattern Original Remarks: REM TEM 773. An X-ray study of the temperature dependence of the quartz structure.

References

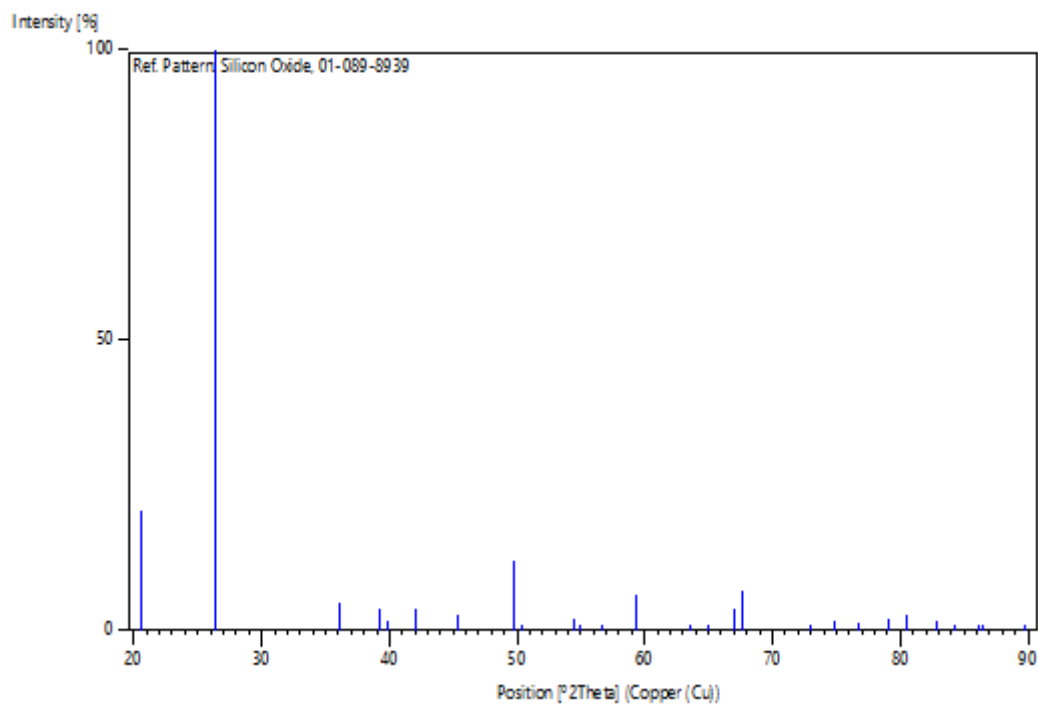
Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*
Structure: Kihara, K., *Eur. J. Mineral.*, **2**, 63, (1990)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	0	0	4,29791	20,649	20,7
2	0	1	1	3,37145	26,415	100,0
3	1	1	0	2,48140	36,170	4,8
4	1	0	2	2,29719	39,184	3,7
5	1	1	1	2,25734	39,905	1,6
6	2	0	0	2,14896	42,010	3,9
7	2	0	1	1,99846	45,343	2,6
8	1	1	2	1,83256	49,712	12,0
9	0	0	3	1,81200	50,315	0,2
10	0	2	2	1,68572	54,382	1,8
11	0	1	3	1,66968	54,948	0,9
12	2	1	0	1,62446	56,613	0,1
13	1	2	1	1,55645	59,327	6,3
14	1	1	3	1,46337	63,523	0,7
15	3	0	0	1,43264	65,052	0,6
16	1	2	2	1,39439	67,067	3,6
17	2	0	3	1,38527	67,568	7,0
18	1	0	4	1,29577	72,950	1,0
19	3	0	2	1,26736	74,861	1,8
20	2	2	0	1,24070	76,758	1,2
21	2	1	3	1,20955	79,114	1,9
22	3	1	0	1,19195	80,519	2,7
23	1	3	1	1,16436	82,839	1,7

24	2	0	4	1,14859	84,234	0,1
25	2	2	2	1,12867	86,076	0,1
26	3	0	3	1,12382	86,539	0,1
27	1	3	2	1,09166	89,760	1,1

Stick Pattern



Name and formula

Reference code:	00-013-0534
Mineral name:	Hematite, syn
Compound name:	Iron Oxide
Empirical formula:	Fe ₂ O ₃
Chemical formula:	Fe ₂ O ₃

Crystallographic parameters

Crystal system:	Rhombohedral
Space group:	R-3c
Space group number:	167
a (Å):	5,0310
b (Å):	5,0310
c (Å):	13,7370
Alpha (°):	90,0000
Beta (°):	90,0000
Gamma (°):	120,0000

Calculated density (g/cm³): 5,27
 Measured density (g/cm³): 5,26
 Volume of cell (10⁶ pm³): 301,11
 Z: 6,00
 RIR: 2,60

Status, subfiles and quality

Status: Marked as deleted by ICDD
 Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
 Forensic
 Inorganic
 Mineral
 Pharmaceutical
 Quality: Blank (B)

Comments

Color: Deep red
 Creation Date: 01/01/1970
 Modification Date: 01/01/1970
 Deleted Or Rejected By: Deleted by 33-664
 Opaque mineral optical data on specimen from Elba: $R_1R_0=30.2$, $RR_2R_e=\sim 26.1$, Disp.=16, VHN=1038 (mean at 100, 200, 300), Color values=1 .299, .309, 29.8, 2 .299, .309, 25.7, Ref.: IMA Commission on Ore Microscopy QDF. Optical Data: A=2.94, B=3.22, Sign=-. Melting Point: 1350-1360°. Color: Deep red. Unit Cell: Rhombohedral cell: a=5.4228, $\alpha=55.28$.

References

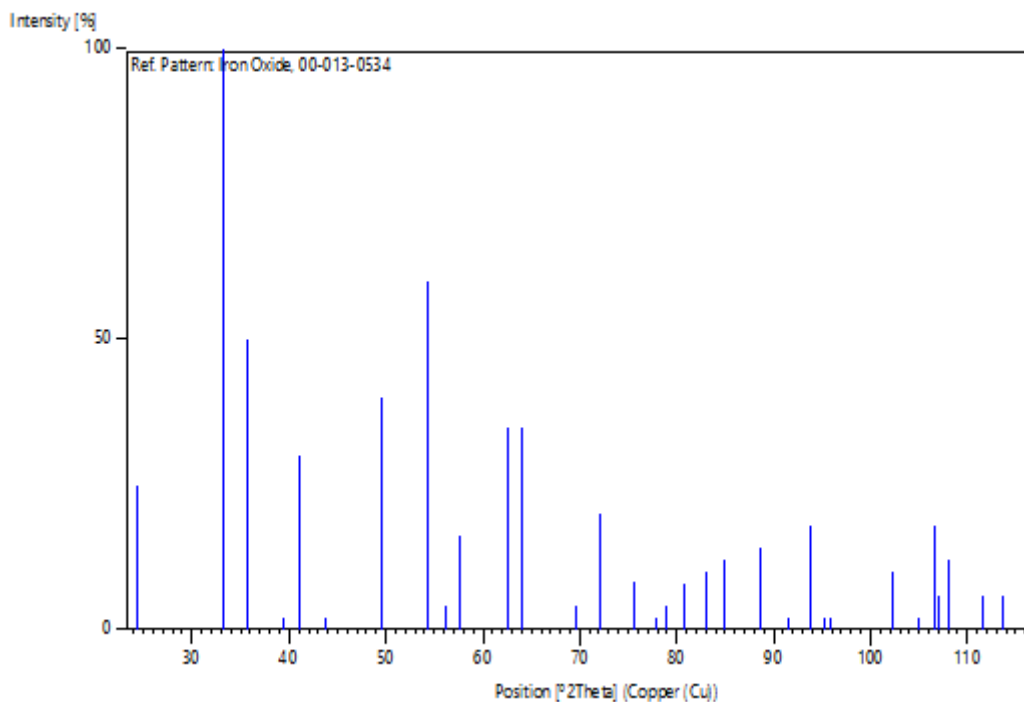
Primary reference: Aravindaksham, Ali, Council of Sci. and Ind. Res., Central Fuel Res. Inst., Bimat, India., *Private Communication*
 Unit cell: Kastalsky, et al., *Aust. J. Chem.*, **21**, 1061, (1968)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	0	1	2	3,66000	24,299	25,0
2	1	0	4	2,69000	33,280	100,0
3	1	1	0	2,51000	35,744	50,0
4	0	0	6	2,28500	39,402	2,0
5	1	1	3	2,20100	40,972	30,0
6	2	0	2	2,07000	43,694	2,0
7	0	2	4	1,83800	49,555	40,0
8	1	1	6	1,69000	54,233	60,0
9	2	1	1	1,63400	56,253	4,0
10	0	1	8	1,59600	57,716	16,0
11	2	1	4	1,48400	62,540	35,0
12	3	0	0	1,45200	64,080	35,0
13	2	0	8	1,34900	69,642	4,0

14	1	0	10	1,31000	72,033	20,0
15	2	2	0	1,25800	75,515	8,0
16	0	3	6	1,22600	77,850	2,0
17	2	2	3	1,21300	78,845	4,0
18	1	2	8	1,18900	80,760	8,0
19	0	2	10	1,16200	83,044	10,0
20	1	3	4	1,14100	84,925	12,0
21	2	2	6	1,10200	88,694	14,0
22	0	4	2	1,07600	91,433	2,0
23	2	1	10	1,05500	93,797	18,0
24	1	1	12	1,04200	95,335	2,0
25	4	0	4	1,03800	95,821	2,0
26	2	3	2	0,98900	102,314	10,0
27	2	2	9	0,97150	104,914	2,0
28	3	2	4	0,96010	106,703	18,0
29	0	1	14	0,95780	107,074	6,0
30	4	1	0	0,95120	108,157	12,0
31	4	1	3	0,93140	111,591	6,0
32	0	4	8	0,92040	113,632	6,0
33				0,90800	116,065	25,0

Stick Pattern



Name and formula

Reference code: 00-047-1771

Mineral name: Unnamed mineral [NR]
 Compound name: Aluminum Oxide
 Common name: q-alumina

Empirical formula: Al_2O_3
 Chemical formula: Al_2O_3

Crystallographic parameters

Crystal system: Unknown

RIR: -

Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic

Corrosion

Inorganic

Mineral

Quality: Low precision (O)

Comments

Color: Yellow

Creation Date: 01/01/1970

Modification Date: 01/01/1970

Color: Yellow

Sample Source or Locality: Specimen from Yakutia, Russia

Analysis: Composition analyzed by electron microprobe.

References

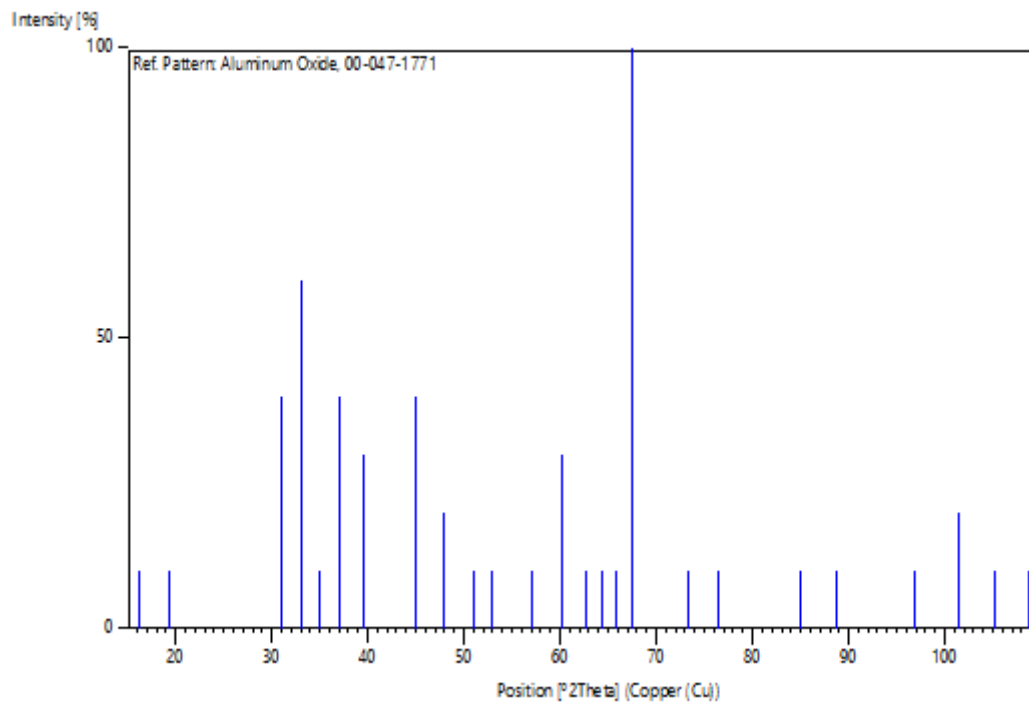
Primary reference: Zigert, Kh., Shirokov, A., Nikishova, L., Pavlova, L., Babiy, O.,
Dokl. Acad. Sci. USSR, Earth Sci. Sec. (Engl. Transl.), **313**, 221,
(1990)

Peak list

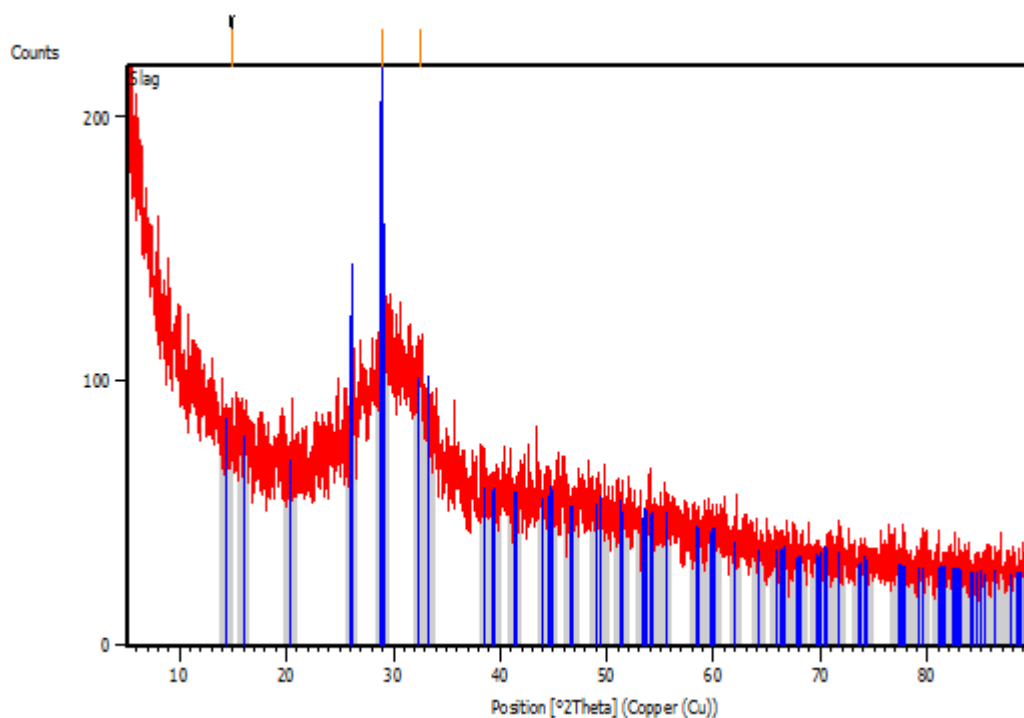
No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1				5,47000	16,191	10,0
2				4,58000	19,365	10,0
3				2,88000	31,027	40,0
4				2,71000	33,027	60,0
5				2,56000	35,023	10,0
6				2,42000	37,121	40,0
7				2,28000	39,492	30,0
8				2,01000	45,068	40,0
9				1,89500	47,969	20,0
10				1,79100	50,947	10,0
11				1,72800	52,946	10,0
12				1,61000	57,168	10,0
13				1,53700	60,155	30,0
14				1,48000	62,728	10,0
15				1,44700	64,328	10,0
16				1,41900	65,755	10,0
17				1,38600	67,528	100,0

18	1,29000	73,330	10,0
19	1,24600	76,372	10,0
20	1,14100	84,925	10,0
21	1,10200	88,694	10,0
22	1,02900	96,937	10,0
23	0,99500	101,460	20,0
24	0,96900	105,300	10,0
25	0,94800	108,692	10,0

Stick Pattern



2. GGBFS



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHMLeft [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
14,8697	3,44	0,2342	5,95786	14,97
29,0508	23,01	0,4015	3,07380	100,00
32,6423	14,15	0,8029	2,74335	61,51

Name and formula

Reference code: 01-075-1381

Mineral name: Coesite
Compound name: Silicon Oxide

Empirical formula: O₂Si
Chemical formula: SiO₂

Crystallographic parameters

Crystal system: Monoclinic
Space group: C2/c
Space group number: 15

a (Å): 7,1480
b (Å): 12,3340
c (Å): 7,1120
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 120,3000
Gamma (°): 90,0000

Calculated density (g/cm³): 2,95
Volume of cell (10⁶ pm³): 541,36

Z: 16,00

RIR: 0,67

Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
ICSD Pattern
Inorganic
Mineral
Pharmaceutical
Quality: Calculated (C)

Comments

ICSD collection code: 030869
Creation Date: 01/01/1970
Modification Date: 01/01/1970
ICSD Collection Code: 030869
Temperature Factor: ATF
Additional Patterns: See PDF 14-654. Ending the "P21/a coesite" discussion.

References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997)*
Structure: Kirfel, A., Will, G., *Z. Kristallogr.*, **167**, 287, (1984)

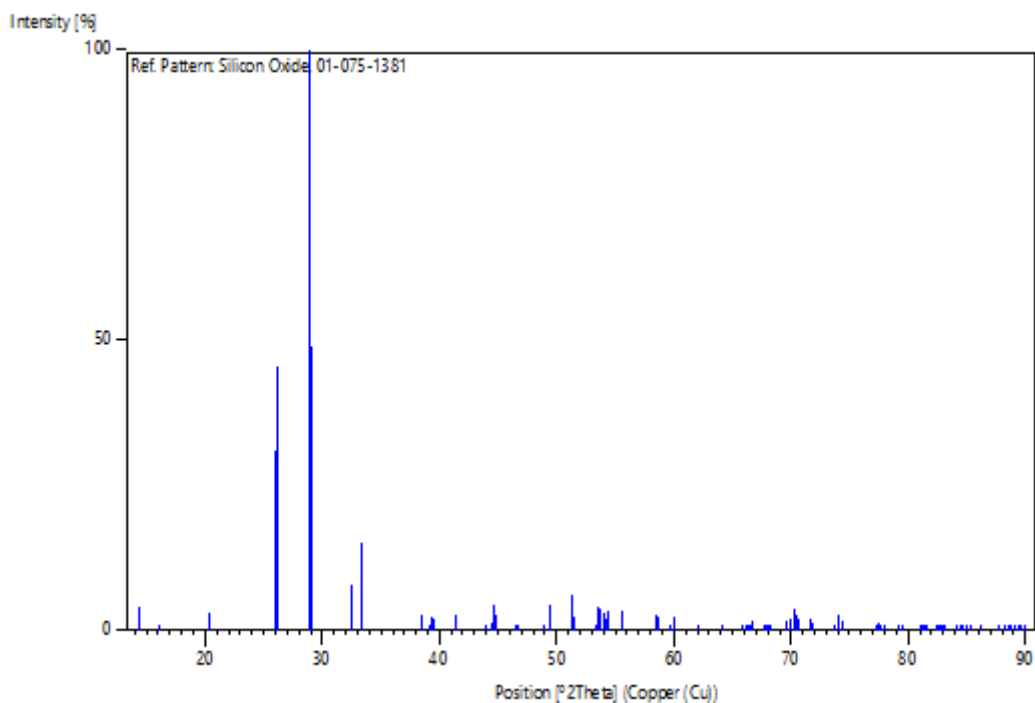
Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	2	0	6,16700	14,351	4,2
2	-1	1	1	5,52807	16,020	1,0
3	0	2	1	4,35132	20,393	2,9
4	-1	3	1	3,42161	26,021	31,0
5	-1	1	2	3,41044	26,108	45,3
6	-2	2	1	3,09199	28,852	86,6
7	2	0	0	3,08350	28,933	100,0
8	0	0	2	3,07023	29,061	49,0
9	2	2	0	2,75959	32,417	7,9
10	-1	3	2	2,68642	33,326	15,2
11	-2	4	1	2,33467	38,530	2,6
12	-3	1	2	2,29713	39,185	1,1
13	-1	5	1	2,29060	39,302	1,5
14	-1	1	3	2,28431	39,414	2,2
15	1	1	2	2,28118	39,471	2,1
16	-2	4	2	2,18336	41,318	2,6
17	2	2	1	2,17566	41,471	2,6
18	0	6	0	2,05567	44,014	0,1
19	-3	3	2	2,03371	44,515	1,4
20	1	5	1	2,02552	44,704	4,3
21	1	3	2	2,02132	44,802	2,7
22	0	6	1	1,94933	46,552	0,1
23	0	2	3	1,94262	46,722	0,1
24	2	4	1	1,85705	49,013	0,6

25	-3	3	3	1,84269	49,421	2,9
26	3	3	0	1,83973	49,505	4,2
27	-2	6	1	1,78194	51,225	3,9
28	-2	0	4	1,77794	51,349	6,1
29	2	0	2	1,77440	51,458	2,5
30	-4	2	2	1,71639	53,332	1,0
31	-2	6	2	1,71081	53,520	4,3
32	0	4	3	1,70531	53,706	3,7
33	-1	7	1	1,69430	54,084	2,9
34	-1	5	3	1,69175	54,172	2,1
35	1	1	3	1,68693	54,340	3,4
36	-4	2	3	1,65398	55,514	3,4
37	-1	7	2	1,57818	58,431	2,8
38	-1	3	4	1,57331	58,629	2,3
39	-4	4	2	1,54599	59,769	1,1
40	-2	6	3	1,54175	59,951	2,1
41	2	6	1	1,54024	60,015	2,3
42	2	4	2	1,53794	60,114	2,1
43	4	2	0	1,49534	62,013	0,9
44	0	6	3	1,45044	64,157	0,1
45	-2	8	1	1,41565	65,931	0,4
46	-5	1	3	1,41032	66,212	0,7
47	-3	7	1	1,40715	66,380	0,9
48	-1	7	3	1,40346	66,577	1,0
49	3	1	2	1,40205	66,653	1,5
50	-4	4	4	1,38202	67,749	0,1
51	-2	8	2	1,37919	67,906	0,2
52	0	8	2	1,37779	67,985	0,2
53	-2	2	5	1,37610	68,080	0,2
54	0	4	4	1,37391	68,203	0,2
55	-4	6	2	1,34865	69,663	1,5
56	-2	6	4	1,34475	69,894	1,0
57	2	6	2	1,34321	69,986	2,2
58	1	9	0	1,33786	70,307	3,6
59	3	3	2	1,33476	70,495	2,6
60	-1	1	5	1,33306	70,598	2,1
61	-4	6	1	1,31662	71,614	1,9
62	4	2	1	1,31374	71,796	1,5
63	-2	8	3	1,28512	73,654	0,5
64	-2	4	5	1,28317	73,784	1,0
65	-1	9	2	1,27876	74,081	2,6
66	-1	3	5	1,27482	74,349	1,6
67	4	6	0	1,23398	77,253	0,8
68	0	8	3	1,23148	77,439	1,4
69	5	1	0	1,22818	77,686	0,9
70	3	5	2	1,22492	77,932	0,7
71	0	10	1	1,20925	79,138	0,1
72	0	2	5	1,20444	79,517	0,1
73	-5	5	4	1,18468	81,116	0,4
74	-3	9	2	1,18257	81,291	0,8
75	1	9	2	1,18012	81,496	1,1
76	-1	5	5	1,17811	81,664	0,8
77	-6	2	3	1,16970	82,378	0,2
78	-4	8	2	1,16734	82,581	0,2
79	-2	8	4	1,16480	82,801	0,3
80	2	8	2	1,16380	82,887	0,3
81	-2	0	6	1,16226	83,021	0,2
82	2	0	4	1,16061	83,166	0,1
83	-6	2	4	1,14952	84,150	0,1
84	-6	2	2	1,14856	84,237	0,1

85	-4	2	6	1,14530	84,532	0,2
86	4	2	2	1,14297	84,745	0,1
87	0	4	5	1,14093	84,932	0,2
88	3	3	3	1,13681	85,312	0,1
89	-4	6	5	1,12707	86,228	0,4
90	-6	4	3	1,11127	87,763	0,1
91	-5	5	5	1,10547	88,343	0,3
92	1	11	0	1,10295	88,598	0,4
93	3	7	2	1,10147	88,748	0,2
94	-1	1	6	1,09831	89,071	0,1
95	-6	4	4	1,09389	89,527	0,1
96	-6	2	1	1,09224	89,699	0,1
97	-2	10	3	1,09025	89,907	0,1

Stick Pattern



Name and formula

Reference code: 01-074-1226
 Mineral name: Lime
 Compound name: Calcium Oxide
 Empirical formula: CaO
 Chemical formula: CaO

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
 Space group: F23
 Space group number: 196

a (Å): 4,7780
 b (Å): 4,7780
 c (Å): 4,7780
 Alpha (°): 90,0000
 Beta (°): 90,0000
 Gamma (°): 90,0000

Calculated density (g/cm³): 3,41
 Measured density (g/cm³): 3,30
 Volume of cell (10⁶ pm³): 109,08
 Z: 4,00

RIR: 4,51

Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
 ICSD Pattern
 Inorganic
 Mineral
 Pharmaceutical
 Quality: Calculated (C)

Comments

ICSD collection code: 026959
 Creation Date: 01/01/1970
 Modification Date: 01/01/1970
 ICSD Collection Code: 026959
 Test from ICSD: No R value given
 Test from ICSD: At least one TF missing
 Test from ICSD: Calc. density unusual but tolerable
 Additional Patterns: See PDF 43-1001. Die Gitterstruktur der Erdalkalioxyde.

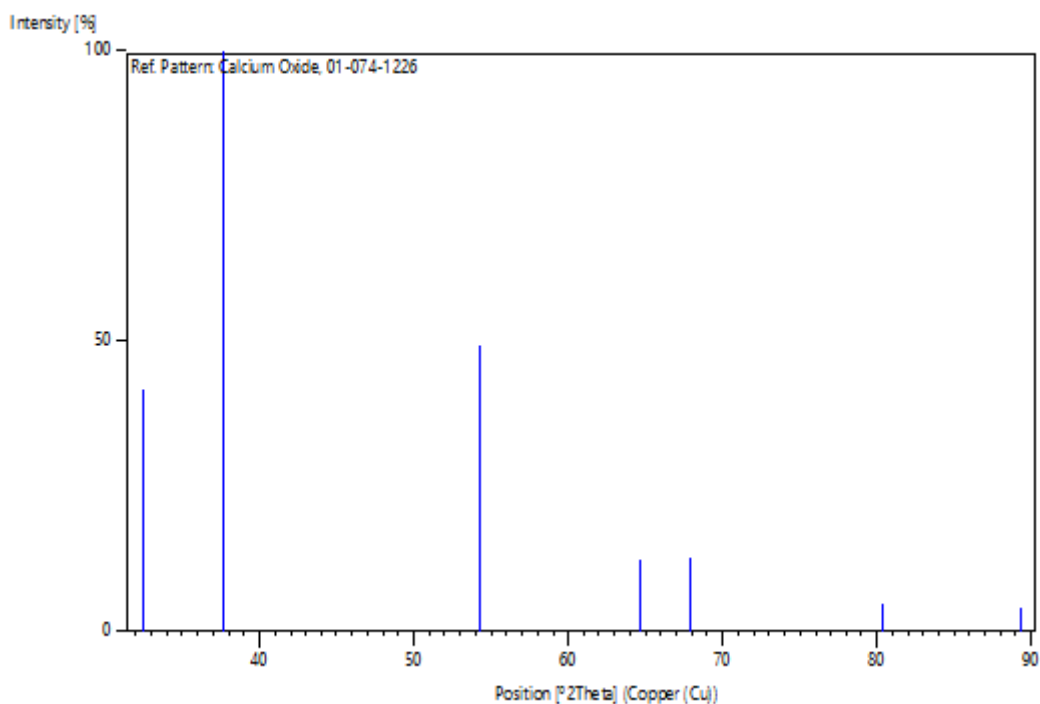
References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*
 Structure: Gerlach, W., *Z. Phys.*, **9**, 184, (1922)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	2,75858	32,429	41,8
2	2	0	0	2,38900	37,621	100,0
3	2	2	0	1,68928	54,258	49,3
4	3	1	1	1,44062	64,647	12,4
5	2	2	2	1,37929	67,901	12,7
6	4	0	0	1,19450	80,312	4,8
7	3	3	1	1,09615	89,293	4,0

Stick Pattern



Name and formula

Reference code: 03-065-0390

Compound name: Iron Oxide

Empirical formula: Fe_2O_3

Chemical formula: Fe_2O_3

Crystallographic parameters

Crystal system: Tetragonal

Space group: P41212

Space group number: 92

a (Å): 8,3396

b (Å): 8,3396

c (Å): 8,3221

Alpha (°): 90,0000

Beta (°): 90,0000

Gamma (°): 90,0000

Volume of cell (10^6 pm^3): 578,79

Z: 11,20

RIR: 2,99

Status, subfiles and quality

Status: Diffraction data collected at non ambient temperature
Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
Inorganic
NIST Pattern
Quality: Calculated (C)

Comments

Creation Date: 01/01/1970
Modification Date: 01/01/1970
N 24011 22330. Author gave Mn₅Si₂ type, but proposed space group No.96. Temperature
Factor: No TF given for entry, B=1.0 assumed
Temperature of Data Collection: Structure refined at 4 K. Low-temperature phase.

References

Primary reference: *Calculated from NIST using POWD-12++*
Structure: C.Greaves, *J. Solid State Chem.*, **49**, 325-3, (1983)

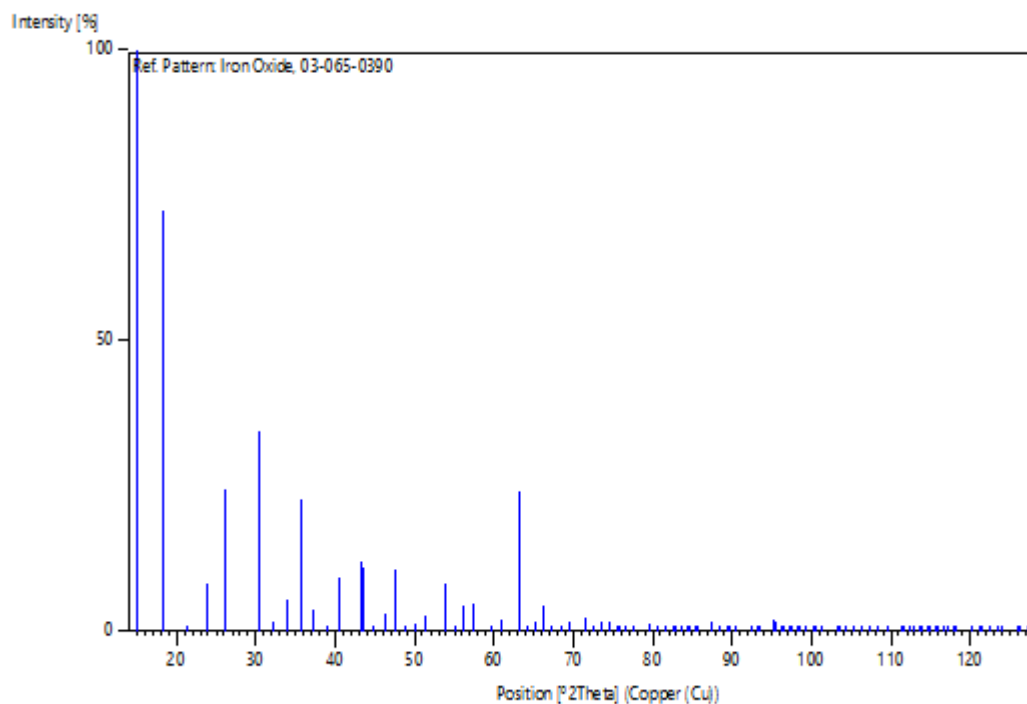
Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	0	5,89079	15,027	100,0
2	1	1	1	4,81149	18,425	72,4
3	2	0	0	4,16980	21,291	0,7
4	2	0	1	3,72332	23,880	8,1
5	2	1	1	3,40343	26,162	24,5
6	2	2	0	2,94540	30,321	34,5
7	2	2	1	2,77727	32,205	1,8
8	3	0	1	2,63223	34,032	5,3
9	3	1	1	2,51400	35,685	22,6
10	2	2	2	2,40575	37,349	3,5
11	3	2	0	2,31299	38,906	1,0
12	3	1	2	2,22584	40,494	9,4
13	4	0	0	2,08490	43,365	11,8
14	0	0	4	2,08052	43,461	10,9
15	2	2	3	2,01865	44,865	0,5
16	4	1	1	1,96360	46,194	2,9
17	3	3	1	1,91133	47,534	10,7
18	4	2	0	1,86479	48,796	0,1
19	2	0	4	1,86166	48,884	0,1
20	4	1	2	1,81912	50,105	1,4
21	3	3	2	1,77648	51,394	2,8
22	4	2	2	1,70172	53,829	8,2
23	4	0	3	1,66568	55,091	0,6
24	4	3	1	1,63540	56,201	4,4
25	5	1	1	1,60483	57,369	5,0
26	1	1	5	1,60184	57,486	3,5
27	5	0	2	1,54818	59,676	1,1
28	5	2	1	1,52249	60,789	2,1
29	2	1	5	1,51993	60,902	1,4
30	4	4	0	1,47270	63,075	24,0
31	5	2	2	1,45026	64,166	0,6
32	3	3	4	1,42802	65,288	1,5
33	5	1	3	1,40889	66,288	4,5
34	6	0	0	1,38993	67,311	0,1

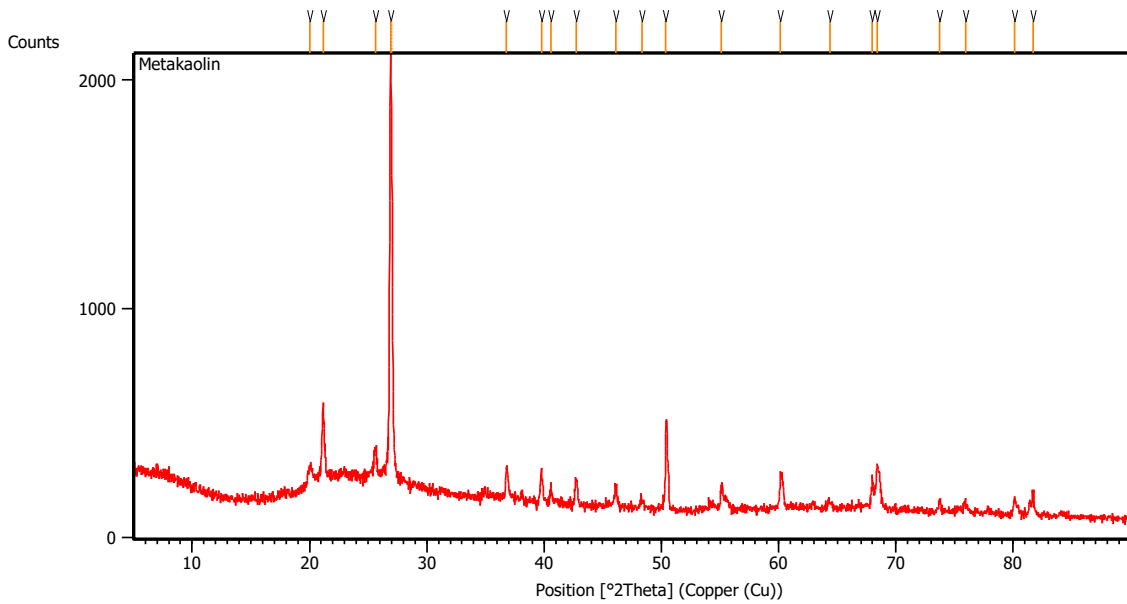
35	6	1	0	1,37102	68,367	0,2
36	1	0	6	1,36822	68,526	0,2
37	5	2	3	1,35219	69,454	1,8
38	6	2	0	1,31861	71,490	2,3
39	2	0	6	1,31612	71,646	1,6
40	4	0	5	1,30003	72,673	0,4
41	5	4	1	1,28676	73,544	0,9
42	5	1	4	1,28522	73,647	1,6
43	5	3	3	1,27122	74,595	1,5
44	6	2	2	1,25700	75,586	0,9
45	2	2	6	1,25508	75,722	0,5
46	5	4	2	1,24296	76,593	0,4
47	6	3	1	1,22910	77,617	1,1
48	4	4	4	1,20287	79,641	1,4
49	6	3	2	1,19117	80,583	0,2
50	3	2	6	1,18953	80,717	0,2
51	5	0	5	1,17816	81,660	0,8
52	7	1	1	1,16773	82,547	1,0
53	1	1	7	1,16542	82,747	0,9
54	6	4	0	1,15649	83,528	0,1
55	6	4	1	1,14549	84,515	0,1
56	4	1	6	1,14390	84,660	0,1
57	6	3	3	1,13448	85,529	0,8
58	3	3	6	1,13271	85,695	0,7
59	6	4	2	1,11426	87,468	1,6
60	5	4	4	1,10395	88,496	0,1
61	7	3	0	1,09504	89,408	0,2
62	3	0	7	1,09310	89,610	0,2
63	5	5	3	1,08476	90,488	1,1
64	6	3	4	1,06719	92,407	0,1
65	6	5	1	1,05909	93,325	0,6
66	5	1	6	1,05737	93,523	0,4
67	8	0	0	1,04245	95,281	2,0
68	0	0	8	1,04026	95,546	1,6
69	8	0	1	1,03437	96,267	0,2
70	5	2	6	1,03320	96,412	0,2
71	1	0	8	1,03226	96,529	0,2
72	8	1	1	1,02650	97,253	0,4
73	4	1	7	1,02493	97,452	0,3
74	7	3	3	1,01856	98,272	0,4
75	3	3	7	1,01728	98,439	0,3
76	6	4	4	1,01082	99,291	0,1
77	8	1	2	1,00385	100,232	0,1
78	2	1	8	1,00202	100,483	0,1
79	6	5	3	0,99650	101,249	0,3
80	6	6	0	0,98272	103,229	0,7
81	6	0	6	0,98180	103,364	0,3
82	2	2	8	0,98100	103,482	0,4
83	6	6	1	0,97605	104,222	0,1
84	6	1	6	0,97506	104,371	0,2
85	7	4	3	0,96921	105,267	0,5
86	5	0	7	0,96811	105,438	0,3
87	7	5	1	0,96295	106,249	0,5
88	6	6	2	0,95651	107,283	0,2
89	6	2	6	0,95566	107,421	0,2
90	6	5	4	0,94945	108,448	0,2
91	7	2	5	0,94303	109,539	0,3
92	8	4	0	0,93240	111,411	0,6
93	4	0	8	0,93083	111,694	0,3
94	7	4	4	0,92624	112,536	0,2

95	4	4	7	0,92509	112,750	0,1
96	9	0	1	0,92074	113,567	0,3
97	3	3	8	0,91905	113,891	0,3
98	7	5	3	0,91518	114,638	0,7
99	5	3	7	0,91425	114,820	0,5
100	1	1	9	0,91351	114,965	0,3
101	8	4	2	0,90983	115,696	0,1
102	4	2	8	0,90847	115,970	0,1
103	7	6	0	0,90447	116,786	0,1
104	2	0	9	0,90275	117,141	0,1
105	9	2	1	0,89926	117,872	0,4
106	5	5	6	0,89821	118,096	0,3
107	2	1	9	0,89750	118,246	0,2
108	6	6	4	0,88824	120,274	0,5
109	8	3	4	0,88366	121,317	0,2
110	4	3	8	0,88266	121,548	0,3
111	7	4	5	0,87856	122,512	0,4
112	9	3	1	0,87421	123,561	0,6
113	3	1	9	0,87259	123,957	0,3
114	8	5	2	0,86470	125,956	0,1
115	5	2	8	0,86353	126,262	0,1
116	9	2	3	0,85999	127,199	0,4
117	6	3	7	0,85922	127,406	0,2

Stick Pattern



3. Metakaolin



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
19.9972	84.37	0.2676	4.44027	4.50
21.1724	330.49	0.1171	4.19638	17.62
25.6038	124.80	0.2007	3.47926	6.65
26.9151	1875.34	0.1632	3.30992	100.00
27.0200	1368.20	0.1020	3.30550	72.96
36.7971	135.28	0.2448	2.44055	7.21
39.7689	136.16	0.2040	2.26476	7.26
40.5907	67.10	0.2448	2.22078	3.58
42.7556	104.14	0.2448	2.11321	5.55
46.0986	75.63	0.2040	1.96744	4.03
48.3185	36.01	0.4896	1.88211	1.92
50.3807	331.16	0.0816	1.80980	17.66
55.1009	87.28	0.2448	1.66541	4.65
60.1604	150.72	0.2040	1.53687	8.04
64.3451	31.02	0.4896	1.44665	1.65
67.9985	124.52	0.2040	1.37755	6.64
68.3959	195.57	0.1224	1.37051	10.43
73.7333	48.62	0.2448	1.28393	2.59
75.9778	36.41	0.4896	1.25148	1.94
80.1046	66.64	0.4896	1.19707	3.55
81.6982	79.39	0.2448	1.17770	4.23

Name and formula

Reference code: 01-083-2467

Mineral name: Quartz low, syn
 Compound name: Silicon Oxide

Empirical formula: O₂Si
 Chemical formula: SiO₂

Crystallographic parameters

Crystal system: Hexagonal
Space group: P3121
Space group number: 152

a (Å): 4,8691
b (Å): 4,8691
c (Å): 5,3703
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 120,0000

Calculated density (g/cm³): 2,71
Volume of cell (10⁶ pm³): 110,26
Z: 3,00

RIR: 3,06

Status, subfiles and quality

Status: Diffraction data collected at non ambient pressure
Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
ICSD Pattern
Inorganic
Mineral
Pharmaceutical
Quality: Calculated (C)

Comments

ICSD collection code: 200723
Creation Date: 01/01/1970
Modification Date: 01/01/1970
ICSD Collection Code: 200723
Calculated Pattern Original Remarks: REM PRE 1000
Calculated Pattern Original Remarks: NDP
Test from ICSD: At least one TF missing
Temperature Factor: . Compression mechanisms in alpha-quartz structures -Si O2 and Ge O2.

References

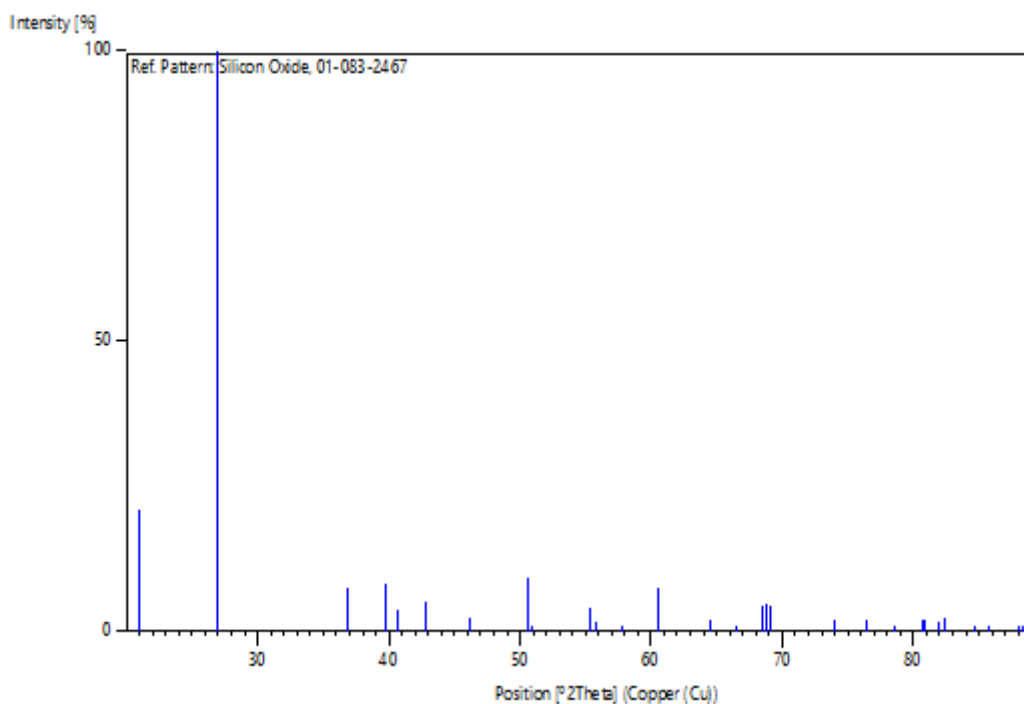
Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*
Structure: Jorgensen, J.D., *J. Appl. Phys.*, **49**, 5473, (1978)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	0	0	4,21676	21,051	21,0
2	1	0	1	3,31655	26,860	100,0

3	1	1	0	2,43455	36,891	7,6
4	0	1	2	2,26493	39,766	8,2
5	1	1	1	2,21734	40,657	3,6
6	2	0	0	2,10838	42,858	5,0
7	0	2	1	1,96255	46,220	2,3
8	1	1	2	1,80359	50,566	9,4
9	0	0	3	1,79010	50,975	0,5
10	2	0	2	1,65827	55,358	4,1
11	1	0	3	1,64777	55,742	1,5
12	2	1	0	1,59379	57,804	0,3
13	2	1	1	1,52792	60,550	7,4
14	1	1	3	1,44220	64,568	1,8
15	3	0	0	1,40559	66,463	0,1
16	2	1	2	1,37054	68,394	4,4
17	0	2	3	1,36459	68,734	4,9
18	3	0	1	1,35978	69,011	4,4
19	0	1	4	1,27930	74,045	1,9
20	0	3	2	1,24529	76,424	2,0
21	2	2	0	1,21728	78,515	0,8
22	1	2	3	1,19036	80,649	2,2
23	2	2	1	1,18716	80,911	1,9
24	1	1	4	1,17566	81,871	1,5
25	3	1	0	1,16952	82,393	2,3
26	3	1	1	1,14274	84,766	0,7
27	0	2	4	1,13247	85,718	0,2
28	2	2	2	1,10867	88,022	0,1
29	0	3	3	1,10552	88,338	0,2

Stick Pattern



Name and formula

Reference code: 01-089-3072

Mineral name: Corundum, syn
Compound name: Aluminum Oxide
Empirical formula: Al₂O₃
Chemical formula: Al₂O₃

Crystallographic parameters

Crystal system: Rhombohedral
Space group: R-3c
Space group number: 167

a (Å): 4,7600
b (Å): 4,7600
c (Å): 12,9900
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 120,0000

Calculated density (g/cm³): 3,98
Volume of cell (10⁶ pm³): 254,89
Z: 6,00

RIR: 2,63

Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
Corrosion
ICSD Pattern
Inorganic
Mineral
Quality: Calculated (C)

Comments

ICSD collection code: 043732
Creation Date: 01/01/1970
Modification Date: 01/01/1970
ICSD Collection Code: 043732
Calculated Pattern Original Remarks: REM M PDF 43-1484
Calculated Pattern Original Remarks: REM M Cell from *J. Phys. Chem*
Solids\RG, \BF12\RG 349-350 (1960): 4.7591(4), 12.9894(30)
Test from ICSD: At least one TF missing. Lattice spacings and colour in the system alumina - chromic oxide.

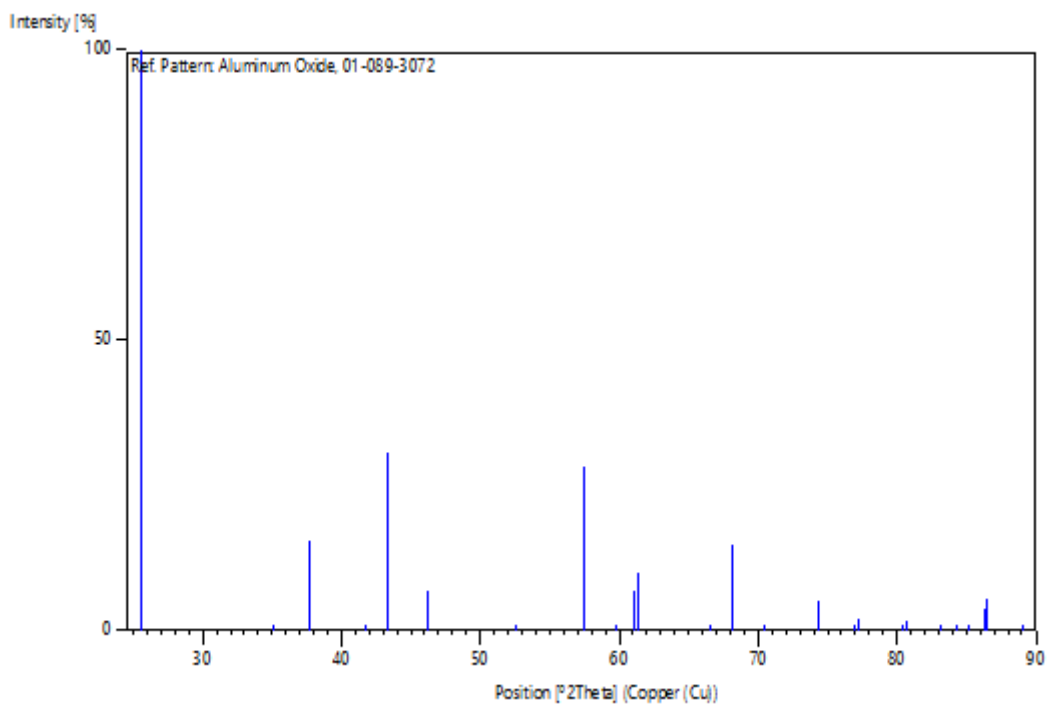
References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*
Structure: Graham, J., *J. Phys. Chem. Solids*, **17**, 18, (1960)

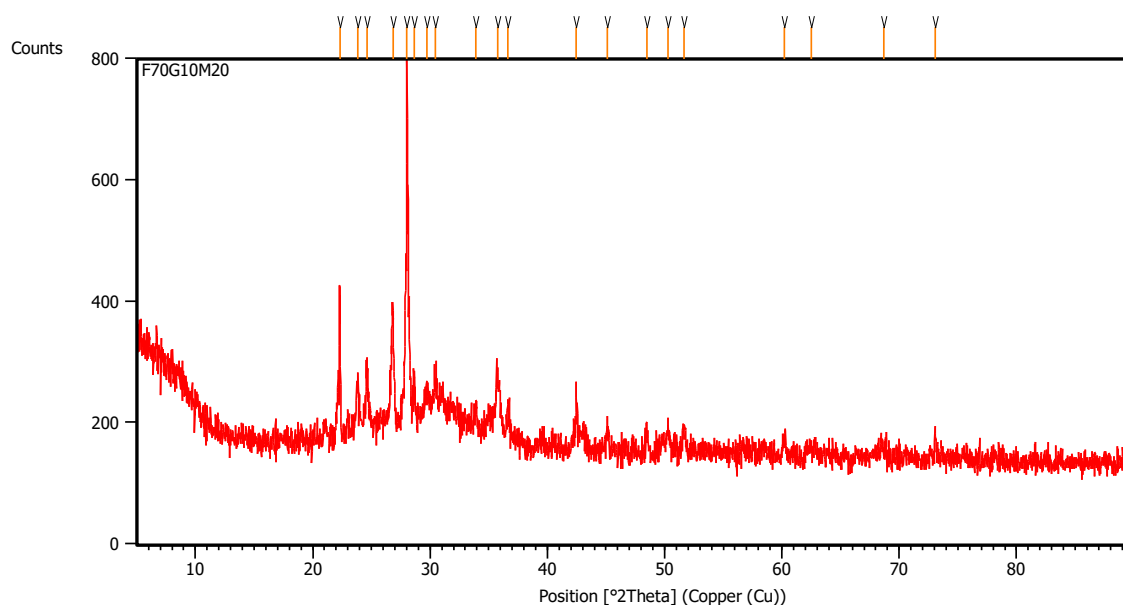
Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	0	1	2	3,48045	25,573	100,0
2	1	0	4	2,55099	35,151	0,1
3	1	1	0	2,38000	37,768	15,3
4	0	0	6	2,16500	41,685	0,1
5	1	1	3	2,08570	43,348	30,6
6	2	0	2	1,96459	46,169	6,7
7	0	2	4	1,74023	52,545	0,7
8	1	1	6	1,60151	57,499	28,2
9	2	1	1	1,54699	59,727	0,9
10	1	2	2	1,51509	61,117	7,0
11	0	1	8	1,51077	61,311	10,0
12	2	1	4	1,40476	66,508	0,2
13	3	0	0	1,37409	68,193	14,9
14	1	2	5	1,33620	70,407	0,4
15	2	0	8	1,27550	74,302	5,1
16	1	0	10	1,23894	76,887	1,0
17	1	1	9	1,23413	77,242	2,2
18	2	1	7	1,19326	80,413	0,3
19	2	2	0	1,19000	80,678	1,6
20	0	3	6	1,16015	83,206	0,2
21	2	2	3	1,14746	84,336	1,1
22	1	3	1	1,13891	85,118	0,1
23	3	1	2	1,12600	86,330	3,6
24	1	2	8	1,12423	86,500	5,6
25	0	2	10	1,09896	89,004	1,0

Stick Pattern



4. Variasi F70G10M20



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
22.2983	241.32	0.0669	3.98699	41.09
23.8172	71.39	0.1673	3.73604	12.16
24.6073	96.69	0.1673	3.61785	16.46
26.8482	173.18	0.1506	3.32075	29.49
28.0406	587.30	0.0335	3.18220	100.00
28.6457	56.22	0.1673	3.11634	9.57
29.7166	44.84	0.3346	3.00643	7.63
30.4772	54.13	0.2676	2.93311	9.22
33.8789	27.41	0.2007	2.64599	4.67
35.7718	95.52	0.3346	2.51020	16.26
36.6562	50.47	0.2007	2.45164	8.59
42.4694	72.89	0.2007	2.12855	12.41
45.1400	37.70	0.2007	2.00863	6.42
48.4690	40.67	0.2007	1.87817	6.92
50.2733	39.65	0.2676	1.81491	6.75
51.6657	35.67	0.2007	1.76923	6.07
60.2244	29.19	0.3346	1.53666	4.97
62.4943	14.92	0.8029	1.48620	2.54
68.6570	9.40	0.6691	1.36706	1.60
73.0758	49.35	0.1004	1.29492	8.40

Name and formula

Reference code: 01-083-1372

Mineral name: Labradorite
 Compound name: Calcium Sodium Aluminum Silicate

Empirical formula: $Al_{1.66}Ca_{0.68}Na_{0.3}O_8Si_{2.34}$
 Chemical formula: $Ca_{0.68}Na_{0.30} (Al_{1.66}Si_{2.34}O_8)$

Crystallographic parameters

Crystal system:	Anorthic
Space group:	C-1
a (Å):	8,1520
b (Å):	12,8340
c (Å):	7,0790
Alpha (°):	93,4900
Beta (°):	116,1300
Gamma (°):	90,4000
Calculated density (g/cm ³):	2,73
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	331,61
Z:	4,00
RIR:	0,56

Subfiles and quality

Subfiles:	Corrosion ICSD Pattern Inorganic Mineral
Quality:	Calculated (C)

Comments

ICSD collection code:	100237
Creation Date:	01/01/1970
Modification Date:	01/01/1970
ICSD Collection Code:	100237
ICSD SG:	C1- IT is: 2 SG short form: C-1. Temperature Factor: ATF. Test from ICSD: Charge sum slightly deviates from zero. Sample Source or Locality: Specimen from Sissone, Bergell Alps (Labradorite AN67). The average structure of An 62-66 labradorite.

References

Primary reference:	<i>Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997)</i>
Structure:	Wenk, H.R., Joswig, W., Tagai, T., Korekawa, M., Smith, B.K., <i>Am. Mineral.</i> , 65 , 81, (1980)

Peak list

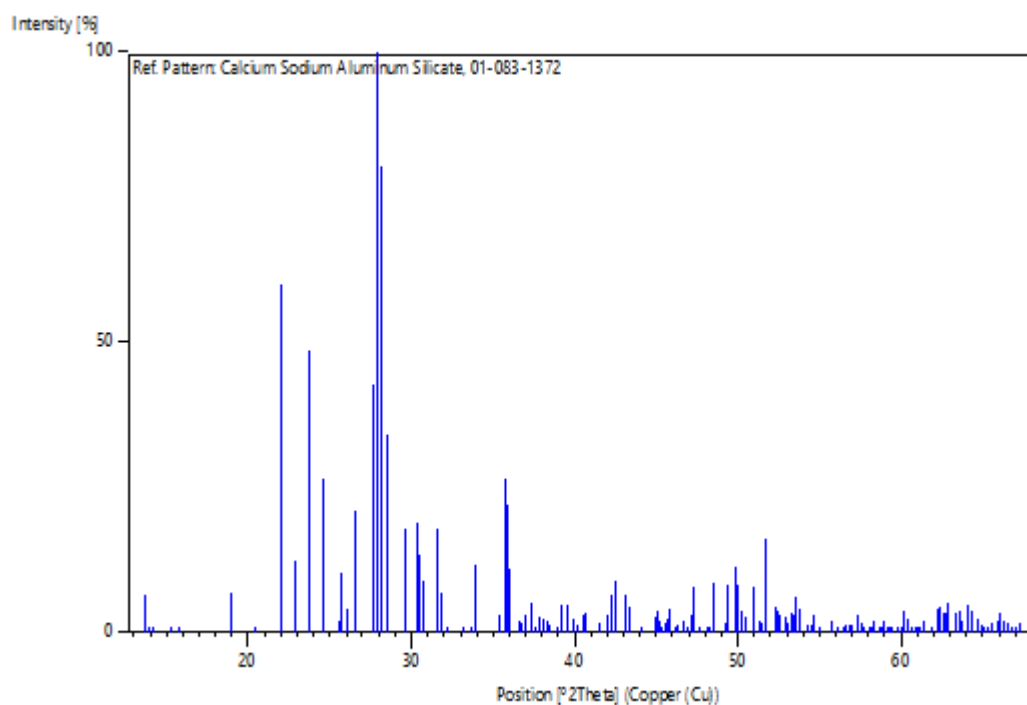
No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	-1	1	0	6,45601	13,705	6,7
2	0	0	1	6,33936	13,959	0,3
3	1	1	0	6,24959	14,160	0,4
4	-1	-1	1	5,80463	15,252	0,7
5	-1	1	1	5,62731	15,735	0,3

6	0	-2	1	4,67360	18,973	6,7
7	0	2	1	4,35177	20,391	0,1
8	-2	0	1	4,03041	22,037	60,2
9	1	-1	1	3,88743	22,858	12,4
10	-1	3	0	3,74763	23,723	48,5
11	1	3	0	3,62657	24,527	26,3
12	-1	-3	1	3,61317	24,619	22,6
13	-1	3	1	3,48581	25,533	2,0
14	-1	-1	2	3,46020	25,726	10,4
15	-2	-2	1	3,41630	26,062	4,1
16	-1	1	2	3,35328	26,561	21,2
17	-2	2	0	3,22800	27,611	42,8
18	0	4	0	3,19265	27,923	100,0
19	0	0	2	3,16968	28,130	80,5
20	2	2	0	3,12480	28,542	34,0
21	1	-3	1	3,01690	29,586	18,0
22	0	-4	1	2,94244	30,353	19,1
23	0	-2	2	2,92451	30,543	13,2
24	-2	-2	2	2,90232	30,782	9,0
25	1	3	1	2,82576	31,638	17,9
26	-1	-3	2	2,80684	31,857	6,9
27	0	4	1	2,77837	32,192	0,5
28	2	0	1	2,69417	33,227	0,2
29	-3	1	1	2,65910	33,678	1,1
30	-3	-1	1	2,64292	33,891	11,5
31	2	-2	1	2,53636	35,360	2,9
32	-3	-1	2	2,51083	35,732	26,4
33	-2	4	1	2,50174	35,866	22,0
34	-3	1	2	2,49474	35,970	11,0
35	-2	4	0	2,45457	36,580	2,0
36	1	1	2	2,44536	36,722	1,6
37	2	2	1	2,43316	36,913	2,9
38	-3	1	0	2,40884	37,299	5,1
39	1	5	0	2,38851	37,629	0,5
40	3	1	0	2,37841	37,794	2,5
41	2	4	0	2,36449	38,025	2,2
42	-1	5	1	2,34508	38,352	2,1
43	0	-4	2	2,33680	38,494	1,3
44	-1	-1	3	2,31168	38,929	0,5
45	-3	3	1	2,30068	39,122	4,6
46	-3	-3	1	2,27690	39,548	4,7
47	-1	1	3	2,25847	39,884	2,3
48	1	-3	2	2,24560	40,123	1,4
49	1	-5	1	2,22284	40,551	3,2
50	-2	4	2	2,21760	40,652	3,5
51	0	4	2	2,17588	41,467	1,5
52	-3	3	0	2,15096	41,969	3,1
53	-1	-5	2	2,13351	42,329	6,4
54	2	-4	1	2,12266	42,556	8,8
55	1	5	1	2,09428	43,161	6,6
56	-3	1	3	2,08654	43,330	4,2
57	3	3	0	2,08320	43,403	2,0
58	0	-2	3	2,05055	44,130	0,1
59	-1	5	2	2,01520	44,946	2,6
60	-4	0	1	2,00886	45,095	3,6
61	2	4	1	2,00452	45,198	1,9
62	2	0	2	1,99791	45,356	1,1
63	3	-1	1	1,99115	45,519	1,7
64	-1	3	3	1,98499	45,668	2,4
65	0	6	1	1,97989	45,792	4,0

66	0	2	3	1,96535	46,151	0,7
67	3	1	1	1,95901	46,309	1,6
68	2	-2	2	1,94371	46,695	2,0
69	-3	-3	3	1,93488	46,920	1,2
70	-4	-2	2	1,92424	47,196	2,9
71	-4	2	2	1,92013	47,303	7,8
72	-4	-2	1	1,90643	47,664	1,0
73	-2	-6	1	1,88853	48,144	0,7
74	-2	6	1	1,88272	48,302	0,5
75	2	2	2	1,87259	48,580	8,5
76	3	-3	1	1,84836	49,259	1,9
77	-4	0	3	1,84287	49,415	8,1
78	4	0	0	1,82841	49,833	11,5
79	0	-4	3	1,82415	49,957	8,0
80	2	6	0	1,81328	50,277	3,5
81	-2	-6	2	1,80659	50,477	2,9
82	1	1	3	1,79036	50,967	7,9
83	-1	-7	1	1,77640	51,396	1,9
84	3	3	1	1,77405	51,469	1,9
85	-2	0	4	1,76639	51,709	16,2
86	2	-4	2	1,74694	52,328	4,5
87	-2	6	2	1,74290	52,459	3,9
88	-1	7	1	1,73952	52,568	3,3
89	-2	-2	4	1,73010	52,877	2,5
90	1	-3	3	1,72386	53,083	1,6
91	-3	-1	4	1,71606	53,343	3,3
92	0	6	2	1,71426	53,404	3,2
93	0	4	3	1,70815	53,610	6,0
94	-4	4	2	1,70242	53,805	4,1
95	-4	-4	1	1,68716	54,331	1,2
96	-1	1	4	1,68325	54,468	1,2
97	-2	2	4	1,67664	54,701	3,1
98	-3	-5	3	1,66887	54,977	1,1
99	-1	-7	2	1,66619	55,073	0,7
100	2	4	2	1,64699	55,770	2,0
101	1	3	3	1,63750	56,122	0,2
102	-1	-3	4	1,62889	56,445	1,0
103	-3	-3	4	1,62463	56,607	1,5
104	3	-5	1	1,61796	56,861	1,3
105	-4	4	0	1,61393	57,016	1,3
106	-3	5	3	1,60633	57,311	2,9
107	0	8	0	1,60014	57,553	1,7
108	-4	0	4	1,59633	57,703	0,8
109	-2	-4	4	1,58811	58,030	0,5
110	-1	7	2	1,58484	58,162	0,7
111	-5	1	1	1,57949	58,378	2,1
112	-5	-1	1	1,57061	58,740	0,7
113	-3	3	4	1,56844	58,829	0,5
114	0	-2	4	1,56460	58,988	2,0
115	-5	-1	3	1,56095	59,139	1,1
116	-5	1	3	1,55597	59,348	0,9
117	-1	3	4	1,55381	59,438	0,8
118	3	-3	2	1,54442	59,836	1,1
119	1	-5	3	1,53937	60,053	0,8
120	3	5	1	1,53625	60,187	3,7
121	-2	6	3	1,53205	60,370	2,4
122	-5	3	2	1,52540	60,660	0,9
123	-5	-3	2	1,51993	60,902	1,1
124	4	2	1	1,51692	61,036	0,7
125	0	2	4	1,51344	61,191	1,0

126	2	-6	2	1,50845	61,415	2,2
127	-3	-7	2	1,49887	61,851	0,7
128	-2	-8	1	1,48912	62,301	3,9
129	-2	8	0	1,48667	62,415	4,5
130	3	3	2	1,48281	62,596	3,4
131	-5	-3	3	1,47964	62,745	3,5
132	-4	6	1	1,47652	62,893	5,2
133	-5	3	3	1,46775	63,312	3,3
134	-4	6	2	1,46229	63,576	3,7
135	-5	1	0	1,45949	63,712	1,9
136	-4	-4	4	1,45059	64,150	4,6
137	4	-4	1	1,44605	64,375	3,9
138	1	5	3	1,43863	64,748	2,3
139	1	7	2	1,43507	64,928	1,4
140	-5	-1	4	1,43211	65,079	0,7
141	1	-1	4	1,42666	65,358	0,8
142	-5	1	4	1,42339	65,527	1,7
143	-4	6	0	1,41495	65,967	1,9
144	2	6	2	1,41288	66,076	3,4
145	-2	8	2	1,40878	66,293	2,0
146	1	1	4	1,40446	66,524	1,8
147	-5	3	0	1,39997	66,765	1,1
148	-3	5	4	1,39570	66,996	0,4
149	4	4	1	1,38974	67,322	1,7

Stick Pattern



Name and formula

Reference code: 00-041-1480

Mineral name: Albite, calcian, ordered

Compound name: Sodium Calcium Aluminum Silicate

Empirical formula: $\text{Al}_{1.2}\text{Ca}_{0.2}\text{Na}_{0.8}\text{O}_8\text{Si}_{2.8}$
Chemical formula: $(\text{Na}, \text{Ca})\text{Al}(\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_8$

Crystallographic parameters

Crystal system: Anorthic
Space group: C-1

a (Å): 8,1610
b (Å): 12,8580
c (Å): 7,1120
Alpha (°): 93,6800
Beta (°): 116,4200
Gamma (°): 89,3900

Calculated density (g/cm³): 2,64
Measured density (g/cm³): 2,63
Volume of cell (10⁶ pm³): 333,42
Z: 4,00

RIR: 1,06

Subfiles and quality

Subfiles: Common Phase
Educational pattern
Forensic
Inorganic
Mineral

Quality: Indexed (I)

Comments

Color: White
Creation Date: 01/01/1970
Modification Date: 01/01/1970
Analysis: Chemical analysis (wt.%): SiO₂ 60.8, Al₂O₃ 24.7, CaO 5.3, Na₂O 8.6, K₂O 0.4: (Na_{0.76}Ca_{0.19}K_{0.05}) (Si_{2.8}Al_{1.2}) O₈ . Δ2θ (131 - 1-31) = 1.66; Δ2θ (-241 - -2-41) = 0.73. Sample Source or Locality: Specimen from Zdanov, Czechoslovakia. Color: White. Temperature of Data Collection: Pattern taken at 25(1) C. Additional Patterns: To replace 9-457 and validated by calculated pattern 20-548. Optical Data: A=1.527, B=1.531, Q=1.538, Sign=+, 2V=77°. Additional Patterns: See ICSD 34916 (PDF 76-926).

References

Primary reference: Sanc, I., Polytechna, Foreign Trade Corporation, Panska, Czechoslovakia., *ICDD Grant-in-Aid*, (1990)

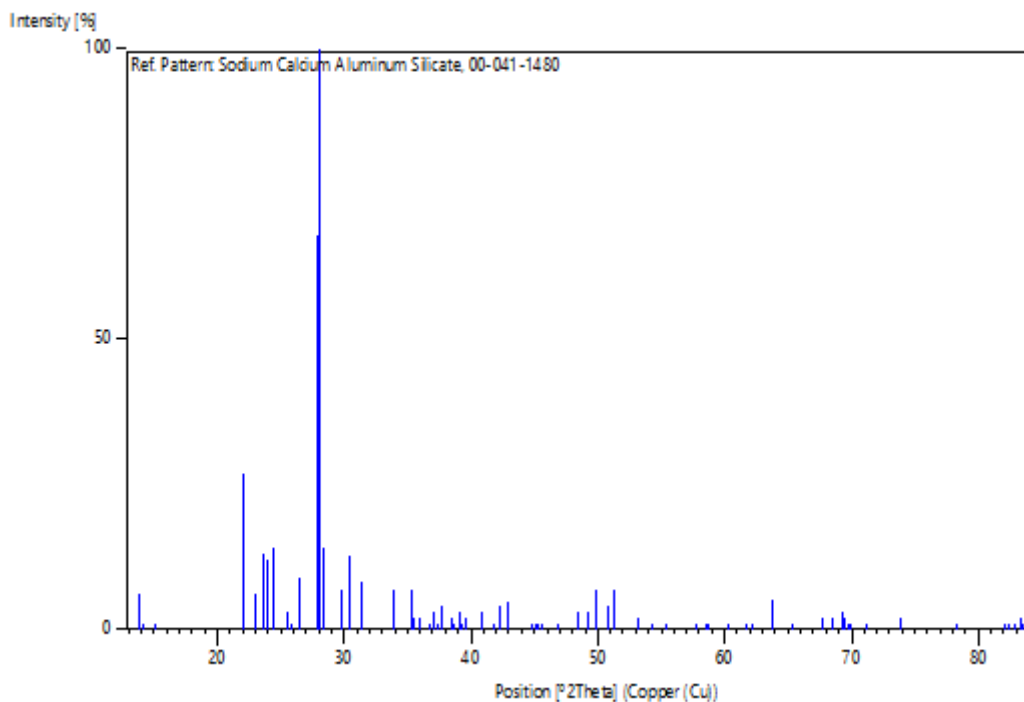
Structure: Colville, A., Ribbe, P., *Spec. Pap. Geol. Soc. Am.*, **101**, 41, (1966)
 Unit cell: Bayliss, P., Univ. of Calgary, Alberta, Canada., *Private Communication*, (1990)
 Optical data: Deer, W., Howie, R., Zussman, J., *Rock Forming Minerals*, **4**, 94, (1963)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	2	0	6,36558	13,901	6,0
2	1	1	0	6,28905	14,071	1,0
3	-1	-1	1	5,86616	15,091	1,0
4	-2	0	1	4,03136	22,031	27,0
5	1	-1	1	3,87179	22,951	6,0
6	1	1	1	3,75875	23,651	13,0
7	-1	3	0	3,70624	23,991	12,0
8	2	0	0	3,65374	24,341	14,0
9	-1	3	1	3,49010	25,501	3,0
10	-2	-2	1	3,44232	25,862	1,0
11	-1	1	2	3,36936	26,432	9,0
12	-2	0	2	3,19733	27,882	68,0
13	0	0	2	3,18167	28,022	100,0
14	2	2	0	3,14865	28,322	14,0
15	1	-3	1	2,99359	29,822	7,0
16	0	-4	1	2,93496	30,432	13,0
17	1	3	1	2,84382	31,432	8,0
18	-1	3	2	2,64281	33,892	7,0
19	-2	-4	1	2,53832	35,332	7,0
20	2	-2	1	2,52380	35,542	2,0
21	-2	4	1	2,49193	36,012	2,0
22	2	2	1	2,44536	36,722	1,0
23	-1	5	0	2,43959	36,812	1,0
24	-1	-5	1	2,42496	37,042	3,0
25	-3	1	0	2,39997	37,442	1,0
26	2	4	0	2,38584	37,672	4,0
27	-1	5	1	2,33805	38,472	2,0
28	-1	-1	3	2,32757	38,652	1,0
29	-3	-3	1	2,30012	39,132	3,0
30	-3	3	1	2,28665	39,372	1,0
31	-1	1	3	2,26950	39,682	2,0
32	1	-5	1	2,20664	40,862	3,0
33	-2	2	3	2,15571	41,873	1,0
34	0	6	0	2,13383	42,323	4,0
35	1	5	1	2,10584	42,913	5,0
36	-4	0	2	2,01873	44,863	1,0
37	-4	0	1	2,01066	45,053	1,0
38	2	0	2	1,99930	45,323	1,0
39	3	-1	1	1,98685	45,623	1,0
40	-4	-2	2	1,93751	46,853	1,0
41	2	2	2	1,88012	48,373	3,0
42	-4	0	3	1,85068	49,193	3,0
43	4	0	0	1,82702	49,873	7,0
44	1	1	3	1,79673	50,773	4,0
45	-2	0	4	1,77779	51,353	7,0
46	-4	-4	2	1,72205	53,143	2,0
47	0	4	3	1,71965	53,223	1,0
48	-2	2	4	1,68596	54,373	1,0
49	2	4	2	1,65785	55,374	1,0

50	0	0	4	1,59330	57,824	1,0
51	-4	-2	4	1,57565	58,534	1,0
52	0	-2	4	1,56978	58,774	1,0
53	2	-2	3	1,53425	60,274	1,0
54	-2	-8	1	1,50055	61,774	1,0
55	3	3	2	1,49077	62,224	1,0
56	2	8	0	1,45740	63,814	5,0
57	-5	1	4	1,42868	65,254	1,0
58	1	-3	4	1,38191	67,755	2,0
59	-4	0	5	1,36948	68,454	2,0
60	-5	5	1	1,35406	69,345	3,0
61	-1	-9	2	1,35252	69,435	2,0
62	-5	-5	1	1,34558	69,845	1,0
63	-1	1	5	1,34390	69,945	1,0
64	-1	-3	5	1,32254	71,245	1,0
65	-6	0	4	1,28107	73,925	2,0
66	2	8	2	1,21935	78,356	1,0
67	-3	1	6	1,17312	82,086	1,0
68	0	-8	4	1,16949	82,396	1,0
69	0	10	2	1,16290	82,966	1,0
70	0	4	5	1,15776	83,416	2,0
71	-5	-7	4	1,15629	83,546	1,0

Stick Pattern



Name and formula

Reference code: 01-078-1254
 Mineral name: Quartz low, syn
 Compound name: Silicon Oxide
 Empirical formula: O₂Si

Chemical formula: SiO₂

Crystallographic parameters

Crystal system: Hexagonal
Space group: P3221
Space group number: 154

a (Å): 4,8817
b (Å): 4,8817
c (Å): 5,3753
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 120,0000

Calculated density (g/cm³): 2,70
Volume of cell (10⁶ pm³): 110,94
Z: 3,00

RIR: 2,93

Status, subfiles and quality

Status: Diffraction data collected at non ambient temperature
Diffraction data collected at non ambient pressure
Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
ICSD Pattern
Inorganic
Mineral
Pharmaceutical
Quality: Calculated (C)

Comments

ICSD collection code: 062406
Creation Date: 01/01/1970
Modification Date: 01/01/1970
ICSD Collection Code: 062406
Temperature Factor: ATF
Calculated Pattern Original Remarks: REM TEM 488
Calculated Pattern Original Remarks: REM PRE 9.1 kbar. Structure of alpha-quartz as a function of temperature and pressure.

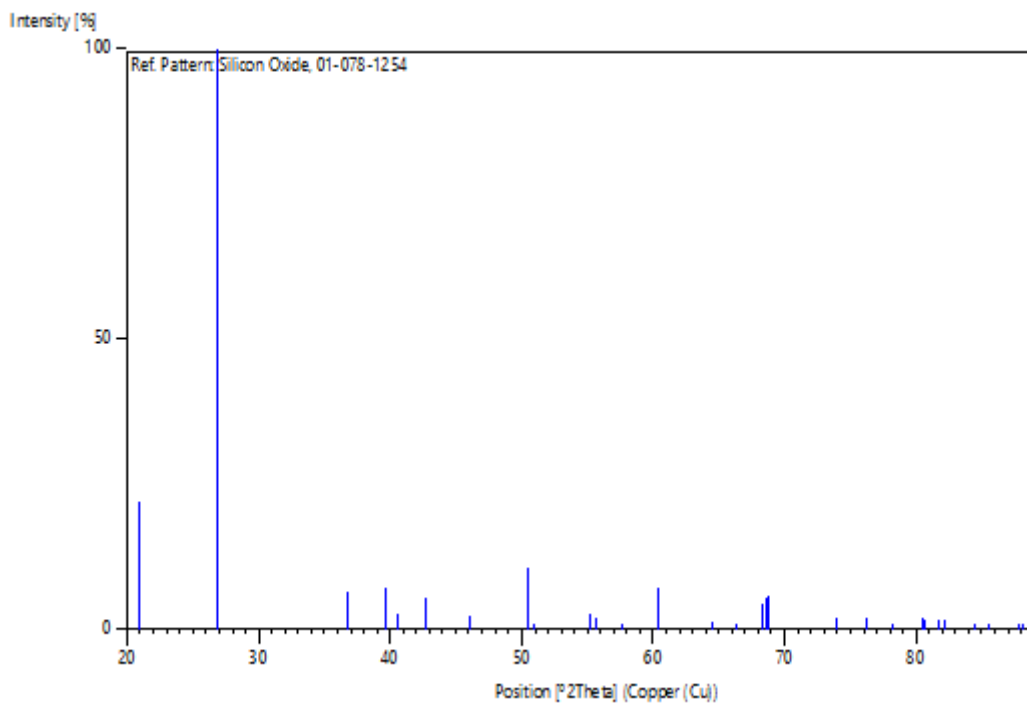
References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*, (1997)
Structure: Ogata, K., Takeuchi, Y., Kudoh, Y., *Z. Kristallogr.*, **179**, 403, (1987)

Peak list

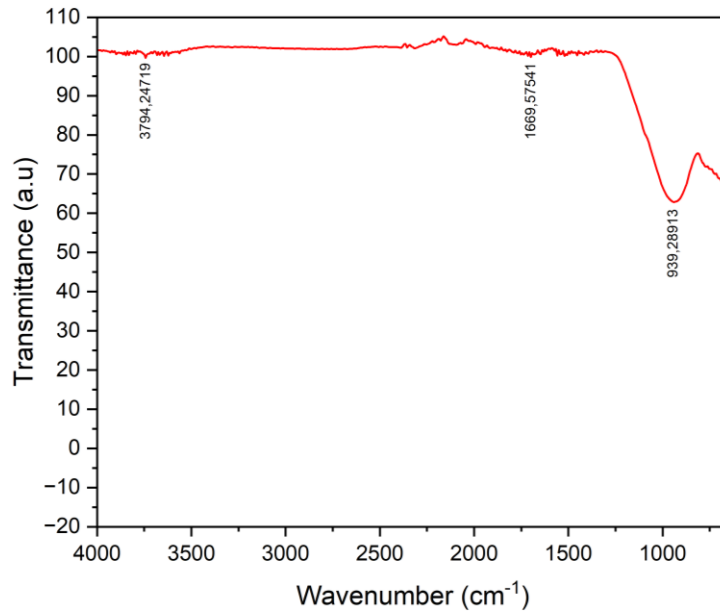
No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	0	0	4,22768	20,996	21,9
2	0	1	1	3,32303	26,807	100,0
3	1	1	0	2,44085	36,792	6,5
4	1	0	2	2,26812	39,708	7,3
5	1	1	-1	2,22245	40,559	2,8
6	2	0	0	2,11384	42,742	5,3
7	2	0	1	1,96719	46,105	2,4
8	1	1	-2	1,80691	50,467	10,7
9	0	0	3	1,79177	50,924	0,5
10	0	2	2	1,66151	55,241	2,6
11	0	1	3	1,64972	55,670	1,9
12	1	2	0	1,59791	57,641	0,2
13	2	1	-1	1,53167	60,386	7,3
14	1	1	-3	1,44438	64,459	1,4
15	3	0	0	1,40923	66,270	0,3
16	2	1	-2	1,37350	68,226	4,5
17	2	0	3	1,36681	68,607	5,5
18	0	3	1	1,36316	68,816	5,9
19	1	0	4	1,28068	73,952	2,0
20	3	0	2	1,24807	76,223	2,0
21	2	2	0	1,22043	78,273	1,0
22	1	2	-3	1,19256	80,470	2,0
23	2	2	-1	1,19014	80,667	1,5
24	1	1	-4	1,17720	81,741	1,8
25	1	3	0	1,17255	82,134	1,8
26	1	3	1	1,14561	84,504	1,0
27	2	0	4	1,13406	85,569	0,2
28	2	2	-2	1,11123	87,767	0,1
29	3	0	3	1,10768	88,121	0,1

Stick Pattern



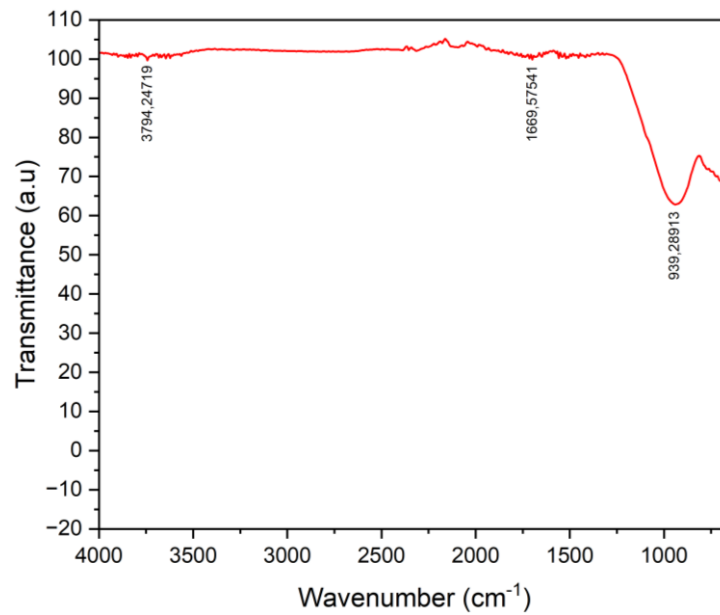
Lampiran 2 - Hasil Uji FTIR

1. Fly Ash



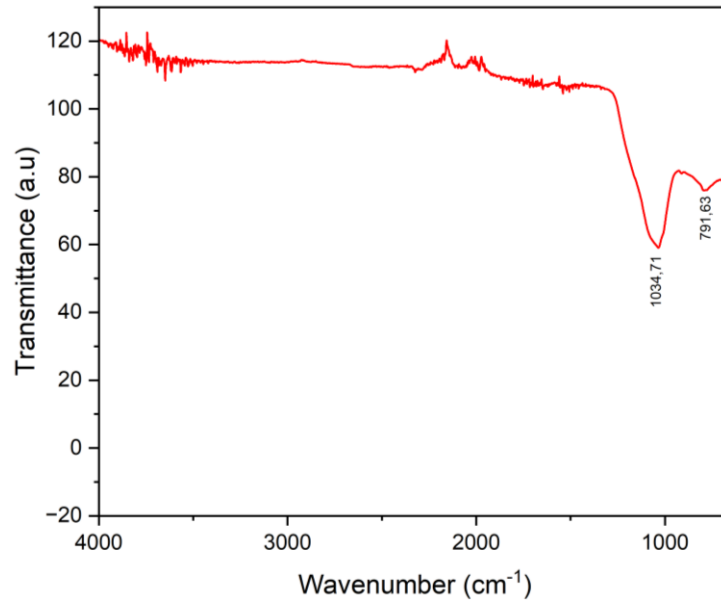
Peak Number	Wavenumber (cm ⁻¹)	Intensity
1	939,28913	62,84715
2	1669,57541	100,10654
3	3749,24719	99,63595

2. GGBFS



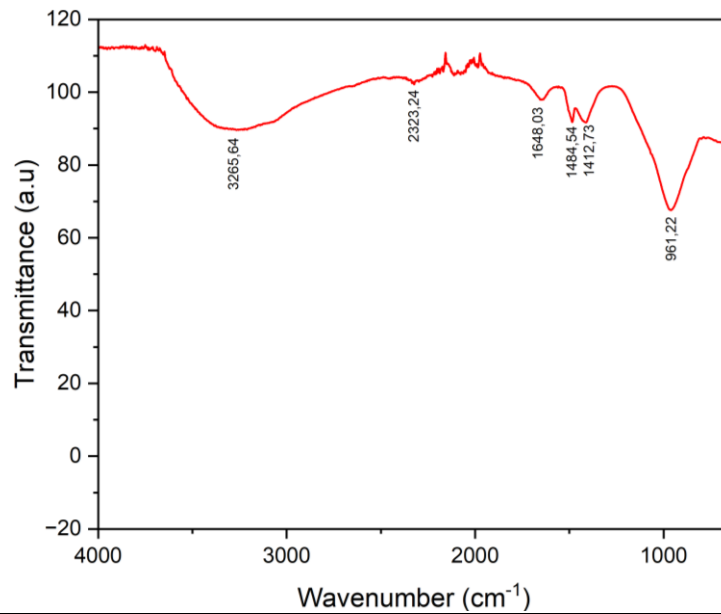
Peak Number	Wavenumber (cm ⁻¹)	Intensity
1	874,19705	69,16148
2	1645,57541	101,65552
3	3718,83334	99,58931

3. Metakaolin



Peak Number	Wavenumber (cm ⁻¹)	Intensity
1	791,63	75,952
2	1071,71	59,048

4. Variasi F70G10M20



Peak Number	Wavenumber (cm ⁻¹)	Intensity
1	961,68	67,615
2	1412,73	91,665
3	1484,54	91,775
4	1648,03	97,948
5	2323,24	102,149
6	3265,64	89,593

Lampiran 3 – Hasil Uji BET

TriStar II 3020 2.00	TriStar II 3020 Version 2.00 Unit 1 Port 3	Serial #: 1108	Page 1
Sample:	Metakaolin		
Operator:	Fida		
Submitter:	161276		
File:	C:\TriStar II 3020\data\SAMPEL\2024\Juli\161276\001.SMP		

Started:	7/8/2024 1:52:19 PM	Analysis Adsorptive:	N2
Completed:	7/8/2024 5:45:45 PM	Analysis Bath Temp.:	-195.850 °C
Report Time:	7/9/2024 8:52:01 AM	Thermal Correction:	No
Sample Mass:	0.2956 g	Warm Free Space:	11.1795 cm ³
Cold Free Space:	31.5068 cm ³	Equilibration Interval:	5 s
Low Pressure Dose:	None	Sample Density:	1.000 g/cm ³
Automatic Degas:	No		

Summary Report

Surface Area

Single point surface area at P/Po = 0.298214300:	15.7244 m ² /g
BET Surface Area:	15.9080 m ² /g
t-Plot Micropore Area:	2.5664 m ² /g
t-Plot External Surface Area:	13.3416 m ² /g
BJH Adsorption cumulative surface area of pores between 17.000 Å and 3,000.000 Å diameter:	18.166 m ² /g
BJH Desorption cumulative surface area of pores between 17.000 Å and 3,000.000 Å diameter:	19.1523 m ² /g
D-H Adsorption cumulative surface area of pores between 17.000 Å and 3,000.000 Å diameter:	13.307 m ² /g

D-H Desorption cumulative surface area of

pores between 17.000 Å and 3,000.000 Å diameter:	13.8440 m ² /g
Pore Volume	
Single point adsorption total pore volume of pores less than 1,685.354 Å diameter at P/Po = 0.988497523:	0.098181 cm ³ /g
t-Plot micropore volume:	0.001262 cm ³ /g
BJH Adsorption cumulative volume of pores between 17.000 Å and 3,000.000 Å diameter:	0.098275 cm ³ /g
BJH Desorption cumulative volume of pores between 17.000 Å and 3,000.000 Å diameter:	0.098282 cm ³ /g
Pore Size	
Adsorption average pore width (4V/A by BET):	246.8705 Å
BJH Adsorption average pore diameter (4V/A):	216.390 Å
BJH Desorption average pore diameter (4V/A):	205.263 Å
D-H Adsorption average pore diameter (4V/A):	285.794 Å
D-H Desorption average pore diameter (4V/A):	275.027 Å
Freundlich	
Qm·C:	1.9085 ± 0.0466 cm ³ /g STP
m:	5.6470 ± 0.4021
Temkin	
q·alpha/Qm:	0.969375 ± 0.126484 kJ/mol·(cm ³ /g STP)
A:	7.5122 ± 4.7946 mmHg
DFT Pore Size	

Volume in Pores	<	14.83 Å	:	0.00127 cm ³ /g
Total Volume in Pores	<=	1,085.66 Å	:	0.09645 cm ³ /g
Area in Pores	>	1,085.66 Å	:	0.000 m ² /g
Total Area in Pores	>=	14.83 Å	:	8.616 m ² /g

DFT Surface Energy

Total Area : 14.188 m²/g

Nanoparticle Size:

Average Particle Size 3,771.683 Å

Horvath-Kawazoe

Maximum pore volume at P/Po = 0.988497523: 0.098181 cm³/g

Median pore width: 905.443 Å

MP-Method

Cumulative surface area of pores between 18.9339 Å and 18.9339 Å hydraulic radius: 0.0000 m²/g

Cumulative pore volume of pores between 18.9339 Å and 18.9339 Å hydraulic radius: 0.000000 cm³/g

Average pore hydraulic radius (V/A): 0.0000 Å

Lampiran 4 – Hasil Uji Densitas

Variasi	Berat Awal	Berat Dalam Air	Densitas (g/cm ³)
F70G30	285.3	162.3	2.418338
F70G25M5	271.5	153.3	2.313713
F70G20M10	283.6	158.6	2.291212
F70G15M15	279.8	155.7	2.263128
F70G10M20	287.2	159.1	2.248997
F70G5M25	272.6	149.4	2.236393
F70M30	282.2	165.8	2.207131

Lampiran 5 – Hasil Uji Penyerapan Air

Variasi	Berat Awal	Berat Akhir				Daya Serap (g/100cm ²)			
		0,25 Jam	1 Jam	4 Jam	24 Jam	0,25 Jam	1 Jam	4 Jam	24 Jam
F70G30	285.3	283.7	284.6	285.3	285.6	6	9.6	12.4	13.6
F70G25M5	271.5	287.1	288.5	289.1	289.8	7.2	12.8	15.2	18

F70G20M10	283.6	273.5	275.1	276.3	276.8	8	14.4	19.2	21.2
F70G15M15	279.8	286.3	289.1	290.4	290.8	10.8	22	27.2	28.8
F70G10M20	287.2	283.1	285.4	286.7	287.1	13.2	22.4	27.6	29.2
F70G5M25	272.6	292.4	294.6	295.3	295.9	20.8	29.6	32.4	34.8
F70M30	282.2	278.7	280.5	281.6	282.2	24.4	31.6	36	38.4

Lampiran 6 – Hasil Uji Kuat Tekan

1. Kuat Tekan 7 Hari dan 14 Hari

Variasi	7 Hari				Variasi	14 Hari			
	Berat (g)	Beban (KgF)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata		Berat (g)	Beban (KgF)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata
F70G30	277	9825	38.54	37.68	F70G30	283	10342.5	40.57	44.66
	272	9236.11	36.23			284	11298.5	44.32	
	276	9939.72	38.99			289	12514.5	49.09	
F70G25M5	270	9310.04	36.52	34.5	F70G25M5	284	10510.8	41.23	38.5
	278	8789.99	34.48			285	10319.6	40.48	
	279	8285.23	32.5			289	8167.96	32.04	
F70G20M10	286	8030.3	31.5	32.12	F70G20M10	274	9860.69	38.68	38.16
	284	7229.81	28.36			289	10062.1	39.47	
	275	9236.11	36.23			291	9478.3	37.18	
F70G15M15	273	8382.1	32.88	34.54	F70G15M15	285	10724.9	42.07	38.32
	277	8575.85	33.64			287	10225.2	40.11	
	287	9463	37.12			283	9340.64	36.64	
F70G10M20	280	8435.63	33.09	33.3	F70G10M20	270	9011.78	35.35	35.73
	286	8927.65	35.02			283	9210.62	36.13	
	273	7897.73	30.98			273	8889.41	34.87	
F70G5M25	274	8996.48	35.29	33.2	F70G5M25	277	8927.65	35.02	34.63
	271	9062.76	35.55			277	8435.63	33.09	
	285	8208.75	32.2			285	8996.48	35.29	
F70M30	275	6763.29	26.53	25.46	F70M30	283	7291	28.6	33.63
	275	6342.66	24.88			280	8876.66	34.82	
	276	6365.6	24.97			281	9246.31	36.27	

2. Kuat Tekan 28 Hari dan 56 Hari

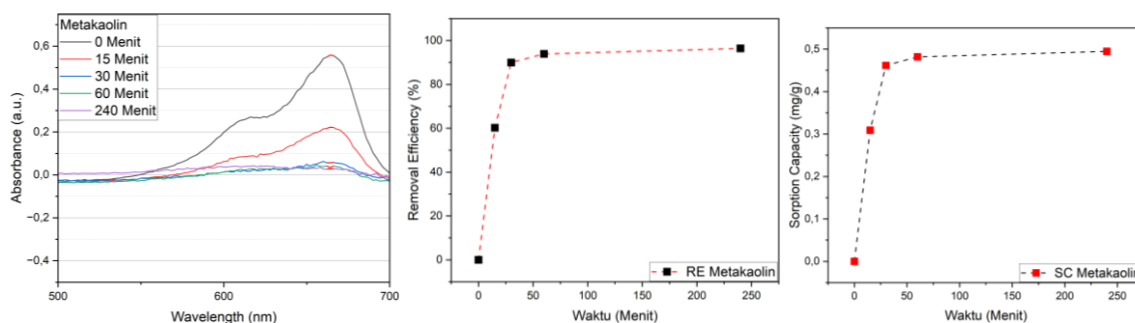
Variasi	28 Hari				Variasi	56 Hari			
	Berat (g)	Beban (KgF)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata		Berat (g)	Beban (KgF)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata
F70G30	286	13276.8	52.08	52.16	F70G30	277	15275.4	59.92	59.42
	284	12896.9	50.59			287	15119.9	59.31	
	275	13717.8	53.81			280	15048.5	59.03	
F70G25M5	281	10202.3	40.02	46.33	F70G25M5	284	12896.9	50.59	50.37
	272	12534.9	49.17			275	13315	52.23	
	288	11204.2	43.95			273	12313.1	48.3	
F70G20M10	286	11673.2	45.79	44.85	F70G20M10	280	13847.8	54.32	48.03
	288	11081.8	43.47			283	12550.2	49.23	
	273	11474.4	45.01			282	10411.3	40.84	
F70G15M15	275	12022.5	47.16	40.56	F70G15M15	274	12076	47.37	44.28
	278	10574.5	41.48			275	10686.7	41.92	
	273	8422.89	33.04			277	11102.2	43.55	
F70G10M20	272	10342.5	40.57	40.4	F70G10M20	282	11652.9	45.71	44.38

	274	11918	46.75		286	10931.4	42.88	
	286	9608.31	37.69		281	11357.1	44.55	
	281	10082.5	39.55		276	10212.5	40.06	
F70G5M25	279	9463	37.12	36.75	F70G5M25	269	10760.6	42.21
	280	8583.49	33.67		280	10857.5	42.59	41.58
	277	9042.37	35.47		267	7138.04	28	
F70M30	276	8040.49	31.54	35.78	F70M30	269	8091.48	31.74
	279	10021.3	39.31		271	12863.8	50.46	37.69

Lampiran 6 – Hasil Adsorpsi Metilen Biru Mortar Geopolimer

Komposit	Waktu (Menit)	Konsentrasi (ppm)	Absorbansi (nm)
F70G30	15	8,73177	0,4538
	30	7,46284	0,38567
	60	7,14108	0,3684
	240	6,62166	0,34051
F70G25M5	15	9,24149	0,48117
	30	6,96116	0,35874
	60	6,43806	0,33065
	240	5,91436	0,30253
F70G20M10	15	8,54101	0,44356
	30	6,48306	0,33307
	60	5,76514	0,29452
	240	5,55635	0,28331
F70G15M15	15	7,2214	0,37271
	30	5,65562	0,28864
	60	4,96258	0,25143
	240	4,86324	0,2461
F70G10M20	15	7,08732	0,36551
	30	5,53679	0,28226
	60	3,97918	0,19863
	240	3,10698	0,1518
F70G5M25	15	6,98354	0,35994
	30	4,87877	0,24693
	60	3,66479	0,18175
	240	3,00323	0,14623
F70M30	15	6,411	0,3292
	30	5,35222	0,27235
	60	3,35897	0,16533
	240	2,34503	0,11089

Lampiran 7 – Hasil UV-Vis, Removal Efficiency dan Sorption Capacity dari Adsorpsi Methylene Blue Geopolimer Metakaolin



UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat, bimbingan, dan karunia-nya. Penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir yang berjudul” ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN METAKAOLIN TERHADAP KUAT TEKAN DAN KEMAMPUAN ADSORPSI LIMBAH *METHYLENE BLUE* MORTAR GEOPOLIMER BERBASIS *FLY ASH*” dengan tepat waktu. Dalam penyusunan penulisan tugas akhir ini penulis tidak luput dari kesulitan dan berbagai hambatan, namun atas dorongan dan bantuan dari berbagai pihak yang menjadikan penulisan tugas akhir ini dapat terselesaikan. Pada kesempatan ini, izinkan penulis untuk menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya dan setinggi-tingginya kepada semua pihak yang telah membantu serta mendukung penulis dalam menyusun dan menyelesaikan tugas akhir ini, yaitu kepada:

1. Bapak Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T. dan Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah bersedia meluangkan waktunya untuk membimbing penulis dengan penuh kesabaran dan memberikan petunjuk dalam penulisan tugas akhir.
2. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Institut Teknologi Sepuluh Nopember atas pendanaan dari Hibah Dana Lokal ITS Skema Penelitian Kerjasama Antar Perguruan Tinggi tahun 2024 yang mendukung penelitian ini.
3. Ayah dan Ibu tercinta yang selalu memberikan dukungan berupa doa, semangat dan perhatian serta kasih sayang yang senantiasa dilimpahkan kepada penulis hingga saat ini.
4. Panji Idris Ariseno sebagai satu-satunya adik penulis yang menemani penulis menyusun tugas akhir ini.
5. Fathan Haryobismo, partner tugas akhir penulis yang senantiasa membantu dalam setiap proses keberjalanan pembuatan sampel dan pengujian sampel, serta memberikan dukungan dalam penulisan tugas akhir.
6. Alm. Izzan Widad, sahabat penulis sekaligus mentor yang telah menemani penulis untuk menjalani keseharian kuliah penulis.
7. Sahabat penulis di lab kimia material Reza Maulana, Josua Budiman, Alamanda, Thierry Raihan, yang telah menemani penulis dalam menyelesaikan tugas akhir.
8. Rekan-rekan MT22 atas kebersamaan dan kenangannya selama ini.
9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu penulisan tugas akhir ini.

Demikian ucapan terima kasih ini penulis ucapkan, semoga doa yang telah dipanjatkan oleh penulis dan masing-masing pihak dikabulkan oleh Tuhan Yang Maha Esa.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Yusuf Bayu Wicaksono lahir di Surabaya pada tanggal 03 November 2001. Bersekolah pada SDN Kaliasin III Surabaya pada tahun 2007 dan lulus enam tahun kemudian pada tahun 2013, dan melanjutkan jenjang pada sekolah SMPN 6 Surabaya dan lulus tiga tahun kemudian pada tahun 2016, setelah itu berlanjut ke pendidikan di SMAN 2 Surabaya dan lulus tiga tahun kemudian pada tahun 2019, kemudian melanjutkan jenjang pendidikan pada Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS ITS melalui jalur Masuk SBMPTN. Selama perkuliahan, penulis aktif dalam kegiatan berorganisasi di HMMT FTIRS ITS 2021/2022 sebagai staff pengembangan mahasiswa tingkat dasar, dan melanjutkan kabinet di HMMT FTIRS ITS 2022/2023 sebagai staff ahli pengembangan mahasiswa tingkat dasar. Penulis memiliki pengalaman kerja praktik di PT Petrokimia Gresik pada tahun 2023 dan ditempatkan di divisi Inspeksi Korosi Statis. Penulis Mengakhiri Studi S1 dengan mengambil penelitian di bidang Material Inovatif. Penulis dapat dihubungi melalui alamat surel yusuf.bayu.w@gmail.com dan nomor telepon 087890495075.