

**DISERTASI**

**KARAKTERISTIK GEOPOLIMER YANG MENGGUNAKAN  
ABU JERAMI, ABU TERBANG DAN TANAH LATERIT  
SEBAGAI BAHAN RAMAH LINGKUNGAN**

*(Characteristics of Geopolymer Using Rice Straw Ash, Fly  
Ash and Laterite Soil as Eco Friendly Materials)*

**PAREA RUSAN RANGAN  
D013181015**



**PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL  
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2020**

**DISERTASI**

**KARAKTERISTIK GEOPOLIMER YANG MENGGUNAKAN  
ABU JERAMI, ABU TERBANG DAN TANAH LATERIT  
SEBAGAI BAHAN RAMAH LINGKUNGAN**

Disusun dan Diajukan Oleh

**PAREA RUSAN RANGAN**  
**Nomor Pokok D013181015**

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Disertasi  
Pada tanggal 11 November 2020  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui  
Komisi Penasehat

Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT  
Promotor

Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, ST., MT  
Co-Promotor

Dr. Eng. Ir. Bambang Bakri, ST., MT  
Co-Promotor

Ketua Program Studi  
S3 Teknik Sipil

Prof. Ir. Sakti Adji Adisasmita, M.Si., M.Eng.Sc., Ph.D

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin

Prof. Dr. Ir. H. Muh. Arsyad Thaha, MT

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS/DISERTASI

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : PAREA RUSAN RANGAN

Nomor mahasiswa : D013181015

Program studi : S3 Teknik Sipil

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis/disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis/disertasi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 23 November 2020

Yang menyatakan



Parea Rusan Rangan

## KATA PENGANTAR

Syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan yang maha kuasa yang atas izinnya sehingga penelitian dan penulisan ini yakni ***“Karakteristik Geopolimer yang Menggunakan Abu Jerami, Abu Terbang dan Tanah Laterit Sebagai Bahan Ramah Lingkungan”*** dapat terselesaikan. Dalam melaksanakan penelitian ini upaya dan perjuangan keras kami lakukan dalam menyelesaikannya.

Kami menyampaikan penghargaan yang sangat tinggi dan amat mendalam kepada Ibu **Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT**, atas bimbingan, arahan dan petunjuknya sehingga penelitian dan penyusunan disertasi ini dapat kami laksanakan dengan baik. Ucapan dan penghargaan yang sama kami sampaikan kepada **Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, ST., MT** dan **Dr. Eng. Ir. Bambang Bakri, ST., MT** selaku Co-Promotor yang banyak memberikan waktu, arahan dan bimbingannya kepada kami. Kepada Bapak kami mengucapkan terima kasih dan penghormatan yang setinggi-tingginya atas bimbingan yang begitu tulus dan ikhlas.

Penghargaan yang setinggi tingginya kepada; Rektor Universitas Hasanuddin (Ibu **Prof. Dr. Dwia Aries Tina Pulubuhu, MA**), bapak **Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, MT** (Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin), bapak **Prof. Dr. Ir. M. Wihardi Tjaronge, ST. M.Eng** (Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin), bapak **Prof. Ir. Sakti Adji Adisasmita, MS., M.Eng.Sc.**,

**Ph.D** (Ketua Program Studi S3 Teknik Sipil Universitas Hasanuddin) dan bapak/ibu dosen Pascasarjana Universitas Hasanuddin yang telah mengarahkan dan membimbing dalam proses perkuliahan. Bapak/ibu staf Pascasarjana Unhas dan staf Prodi S3 Teknik Sipil yang sangat membantu dalam proses administrasi, rekan-rekan Prodi S3 Teknik Sipil angkatan 2015, 2016, 2017, dan terutama 2018, bapak **Dr. Eng. Akbar Caronge, ST., M.Eng., Dr. Richard Frans, ST., MT., seluruh rekan-rekan Laboratorium Eco Material : Ir. Miswar Tumpu, ST., MT., Dr. Didik Suryamiharja, ST. MT., Mardiana Amir, ST. MT., Hanif, ST., MT, Irma Guntur, ST., MT., Aswin, ST., Muh. Fadhly, Muh. Hamdar**, yang sungguh sangat membantu dalam menempuh perkuliahan selama ini, kami sampaikan banyak terima kasih.

Penghargaan yang setinggi-tingginya dan amat mendalam kepada : almarhum bapak tercinta **Drs. Ek. Benyamin Rangan**, almarhumah ibu tercinta **Elisabeth Saman Rangi**, almarhum bapak mertua tercinta **Pieter Ampang**, ibu mertua tercinta **Fransisca Ampang**, kepada isteri tercinta **Indria Dewi Ampang, Amd.**, dan kedua anakda tersayang **Zefanya Kyla Aspasia Wisansaman Rangan, Zoran Christel Disanpieter Rangan**, kepada adik tercinta **Ritha Sammai Rangan, SH.**, bersama bapak **Ir. Yosman Pabisa, Dipl.SE, MM., MT.**, beserta segenap family dan keluarga karena dengan doa, kasih dan ketulusannya sehingga perkuliahan ini dapat terselesaikan dengan baik.

Ucapan terimakasih yang setinggi tingginya atas segala keikhlasan, pikiran dan tenaganya yang tidak ternilai. Hanya dengan doa semoga Tuhan yang Maha Kuasa dapat membalasnya. Akhirnya kami ucapkan Salam Sejahtera untuk kita semua.

Makassar, November 2020  
Salam

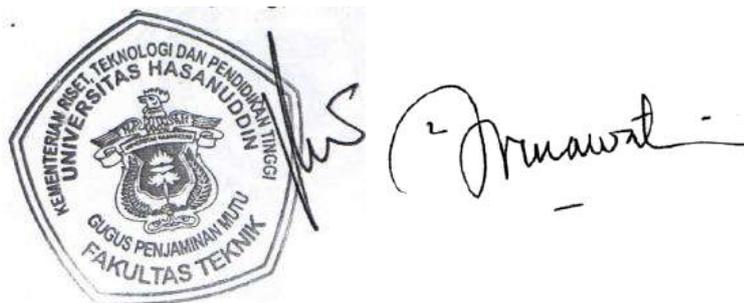
Parea Rusan Rangan

## ABSTRAK

**PAREA RUSAN RANGAN.** Karakteristik Geopolimer yang Menggunakan Abu Jerami, Abu Terbang dan Tanah Laterit Sebagai Bahan Ramah Lingkungan (dibimbing oleh **Rita Irmawaty, A. Arwin Amiruddin** dan **Bambang Bakri**).

Saat ini pemanfaatan material-material buangan semakin digalakkan untuk menjadi bahan baku pembuatan mortar. Salah satu yang dapat dimanfaatkan adalah abu terbang, abu jerami padi dan tanah laterit. Penelitian ini bertujuan untuk merumuskan model hubungan antara nilai kuat tekan, konsentrasi molaritas dan umur mortar geopolimer. Penelitian ini berbentuk ekperimental di laboratorium. Mortar geopolimer diproduksi dengan menggunakan abu jerami, abu terbang dan tanah laterit yang sumber pengambilannya dari Provinsi Sulawesi Selatan beserta dengan alkalin aktivator yang digunakan. Kekuatan mortar geopolimer diuji dengan rasio persentase abu jerami/abu terbang/tanah laterit adalah 41,67/16,67 /41,67. Alkalin aktivator yang digunakan adalah NaOH yaitu 6 M, 12 M dan 15 M. Perawatan yang dilakukan adalah curing air dan udara selama 3, 7 dan 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kuat tekan mortar semakin meningkat seiring dengan peningkatan umur baik pada curing air maupun pada curing udara. Konsentrasi molaritas yang terbaik untuk mortar geopolimer adalah 12 M. Hubungan antara kuat tekan mortar geopolimer berbahan abu jerami, abu terbang dan tanah laterit curing air dan udara dapat didekati melalui persamaan *multiple regression* yaitu :  $Y_1 = 0,5562 + 0,0422 \cdot X_1 + 0,0500 \cdot X_2 - 0,0007 \cdot X_1 \cdot X_2$  dan  $Y_2 = 0,5670 + 0,0611 \cdot X_1 + 0,0493 \cdot X_2 - 0,0011 \cdot X_1 \cdot X_2$ . Dimana :  $Y_1$  = kuat tekan curing air (N/mm<sup>2</sup>),  $Y_2$  = kuat tekan curing udara (N/mm<sup>2</sup>),  $X_1$  = konsentrasi NaOH (M) dan  $X_2$  = umur (hari).

**Kata kunci** : abu jerami, abu terbang, tanah laterit, kuat tekan, mortar geopolimer



## ABSTRACT

**PAREA RUSAN RANGAN.** *Characteristics of Geopolymer Using Rice Straw Ash, Fly Ash and Laterite Soil as Eco Material* (supervised by **Rita Irmawaty, A. Arwin Amiruddin dan Bambang Bakri**).

At present the use of waste materials is increasingly encouraged to become raw materials for making mortar. One that can be utilized is fly ash, rice straw ash and laterite soils. This study aims to formulate a model of the relationship between compressive strength, molarity concentration and geopolymer mortar age. This research is in the form of experimental research in the laboratory. Geopolymer mortars are produced using straw ash, fly ash and laterite soils which are sourced from the South Sulawesi Province along with the alkaline activators used. Geopolymer mortar strength was tested with the ratio of the percentage of straw ash/fly ash/ laterite soil was 41.67/16.67/41.67. Alkaline activator used is NaOH namely 6 M, 12 M and 15 M. The treatment carried out is curing water and air for 3, 7 and 28 days. The results showed that the compressive strength of mortar increased with increasing age in both water curing and air curing. The best molarity concentration for geopolymer mortar is 12 M. The relationship between compressive strength of geopolymer mortar made from straw ash, fly ash and water and air lateritic curing soils can be approached through multiple regression equations, namely:  $Y1 = 0.5562 + 0.0422 \cdot X1 + 0.0500 \cdot X2 - 0,0007 \cdot X1 \cdot X2$  and  $Y2 = 0.5670 + 0.0611 \cdot X1 + 0.0493 \cdot X2 - 0.0011 \cdot X1 \cdot X2$  Where:  $Y1$  = compressive strength of water curing ( $N/mm^2$ ),  $Y2$  = compressive strength of air curing ( $N/mm^2$ ),  $X1$  = concentration of NaOH (M) and  $X2$  = age (day).

**Keywords:** rice straw ash, fly ash, laterite soil, compressive strength, geopolymer mortar



A handwritten signature in black ink, which appears to read "Rita Irmawaty".

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>ABSTRAK</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>DAFTAR ISI</b> .....	v
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	viii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	x
<b>DAFTAR NOTASI</b> .....	xvi
<b>BAB I     PENDAHULUAN</b>	
A. Latar Belakang .....	1
B. Rumusan Masalah.....	10
C. Tujuan Penelitian.....	11
D. Batasan Masalah.....	12
E. Manfaat Penelitian .....	12
F. Sistematika Penulisan.....	13
<b>BAB II    TINJAUAN PUSTAKA</b>	
A. Isu Material Limbah Sebagai Bahan Pembentuk Beton Geopolymer .....	15
B. Teori Geopolymer .....	17
C. Material Pembentuk Beton Geopolymer.....	19
D. Konsistensi Flow .....	34
E. Kuat Tekan Beton .....	35

F. Perilaku Tegangan-Regangan Beton.....	35
G. Hasil Studi Empirik Penelitian Terdahulu.....	37
H. Pengujian Tingkat Penyerapan ( <i>Sorptivity</i> ).....	46
I. Difraksi Sinar-X.....	48
J. Mikrostruktur - Morfologi.....	52
K. Kerangka Pikir Penelitian .....	54
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	
A. Lokasi dan Waktu Penelitian .....	56
B. Rancangan Uji .....	59
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
A. Karakteristik Material .....	76
B. Rancangan Campuran Mortar Geopolymer .....	89
C. Perilaku Mortar Geopolymer Saat Kondisi Segar (Fresh Mortar) .....	90
D. Hubungan Tegangan dan Regangan Mortar Geopolymer Pada Kondisi Normal (Curing Udara dan Curing Air)	92
E. Karakteristik Kimia dan Mikrostruktur Mortar Geopolymer Pada Kondisi Normal (Curing Udara dan Curing Air)	113
F. Pemilihan Konsentrasi Molar NaOH Terbaik Pada Kondisi Normal.....	124
G. Hasil Pengujian Tingkat Penyerapan Air ( <i>Sorptivity</i> ).....	130

H. Hubungan Tegangan dan Regangan Mortar Geopolymer Pada Kondisi Perendaman Sulfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ dan $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) .....	133
I. Karakteristik Kimia dan Mikrostruktur Mortar Geopolymer Pada Kondisi Perendaman Sulfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ dan $\text{H}_2\text{SO}_4$ )	144
J. Rekapitulasi Nilai Kuat Tekan Mortar Geopolymer Pada Kondisi Normal dan Perendaman Sulfat .....	153
K. Temuan Empirik.....	158
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
A. Kesimpulan.....	159
B. Saran.....	160
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>161</b>
<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR TABEL

<b>Nomor</b>		<b>Halaman</b>
1.	Kebutuhan Kandungan Kimia Abu Terbang .....	22
2.	Kebutuhan Kandungan Kimia Abu Jerami.....	26
3.	Kandungan Jerami Padi .....	27
4.	Kriteria Nilai <i>Sorptivity</i> .....	48
5.	Metode Pengujian Karakteristik Tanah Laterit .....	60
6.	Metode Pengujian Karakteristik Abu Terbang .....	61
7.	Metode Pengujian Karakteristik Abu Jerami .....	61
8.	Rancangan Campuran Uji Coba Awal Pertama.....	64
9.	Rancangan Campuran Uji Coba Awal Kedua.....	65
10.	Rancangan Campuran Uji Coba Awal Ketiga .....	66
11.	Jumlah Benda Uji Penelitian .....	69
12.	Karakteristik Fisik Abu Jerami .....	76
13.	Hasil Pengujian Analisa Saringan Abu Jerami.....	77
14.	Karakteristik Kimia Abu Jerami.....	78
15.	Hasil Pemeriksaan Karakteristik Abu Terbang .....	80
16.	Karakteristik Kimia Abu Terbang .....	81
17.	Karakteristik Fisik Tanah Laterit .....	84
18.	Karakteristik Kimia Tanah Laterit.....	85
19.	Komposisi Kandungan Kimia NaOH.....	88
20.	Rancangan Campuran Mortar Geopolymer (1 m <sup>3</sup> ) .....	90

21.	Informasi Kristalinitas (%), Kandungan Sampel Uji (%) dan Kuat Tekan ( $\text{N/mm}^2$ ).....	118
22.	Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar Geopolymer .	126
23.	Hasil Pengujian <i>Sorptivity</i> .....	133
24.	Berat Benda Uji Akibat Rendaman Sulfat.....	134
25.	Rekapitulasi Nilai Pengujian Kuat Tekan Konsentrasi 12 M .....	142
26.	Data Kuantitatif Perbandingan Perlakuan Antara Sampel 12 M dengan 3 Variasi Perlakuan .....	149

## DAFTAR GAMBAR

<b>Nomor</b>		<b>Halaman</b>
1.	Abu Terbang Kelas F .....	22
2.	Abu Terbang Kelas C .....	22
3.	Tanah Laterit .....	24
4.	Hubungan Tegangan dan Regangan Linear.....	36
5.	Hubungan Tegangan Regangan Non Linear. ....	37
6.	Pengujian <i>Sorptivity</i> .....	47
7.	Ilustrasi Asal Hukum Bragg .....	49
8.	Perbedaan Perjalanan Gelombang Ketika Merambat Dari A'O'B' dengan Perjalanan Gelombang Jika Merambat AOB .....	49
9.	Hubungan Antara Garis Jarak, $d$ dan $\theta$ .....	50
10.	Ilustrasi Perbedaan Keteraturan Susunan Atom Untuk Partikel Padatan Kristalin, Polikristalin dan Amorf.....	51
11.	Kerangka Pikir Penelitian .....	55
12.	Diagram Alir Penelitian .....	58
13.	Bahan-Bahan Penelitian.....	59
14.	Kondisi Mortar Geopolymer Campuran Uji Coba Awal Pertama	64
15.	Kondisi Mortar Geopolymer Campuran Uji Coba Awal Kedua ..	65
16.	Kondisi Mortar Geopolymer Campuran Uji Coba Awal Ketiga ..	67
17.	Pencampuran Material Geopolymer .....	68
18.	Curing Udara Benda Uji .....	70
19.	Curing Air Benda Uji.....	71

20.	Posisi Benda Uji Pengujian Kuat Tekan ( <i>Compressive Strength</i> ) .....	72
21.	Difraktogram Polimer Kristalin .....	74
22.	Hubungan Sudut $2\theta$ dengan Intensitas Abu Jerami .....	79
23.	Mikrostruktur Abu Jerami .....	79
24.	Grafik Distribusi Ukuran Butir Abu Terbang .....	80
25.	Hasil Pengujian SEM Abu Terbang .....	81
26.	Hubungan Sudut $2\theta$ dengan Intensitas Tanah Laterit .....	86
27.	Hasil Pengujian SEM Tanah Laterit .....	87
28.	Flow Mortar Geopolymer Konsentrasi 6 M .....	91
29.	Flow Mortar Geopolymer Konsentrasi 12 M .....	91
30.	Flow Mortar Geopolymer Konsentrasi 15 M .....	92
31.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 6MCA Umur 3 Hari	93
32.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 6MCA Umur 7 Hari	94
33.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 6MCA Umur 28 Hari .....	95
34.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 6MCU Umur 3 Hari	96
35.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 6MCU Umur 7 Hari	97
36.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 6MCU Umur 28 Hari .....	98
37.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 12MCA Umur 3 Hari .....	99

38.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 12MCA Umur 7 Hari .....	100
39.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 12MCA Umur 28 Hari .....	101
40.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 12MCU Umur 3 Hari .....	102
41.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 12MCU Umur 7 Hari .....	103
42.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 12MCU Umur 28 Hari .....	104
43.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 15MCU Umur 3 Hari .....	105
44.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 15MCU Umur 7 Hari .....	106
45.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 15MCU Umur 28 Hari .....	107
46.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 15MCU Umur 180 Hari .....	108
47.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 15MCA Umur 3 Hari .....	109
48.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 15MCA Umur 7 Hari .....	110

49.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 15MCA Umur 28 Hari .....	111
50.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 15MCA Umur 180 Hari .....	112
51.	Mikrostruktur 6 M Curing Udara Umur 28 Hari.....	113
52.	Pola Difraksi Sinar-X pada Sampel Geopolimer (a), Curing Udara (CU) dan Curing Air (CA) Variasi Waktu (Hari).....	114
53.	Transformasi Derajat Kristalinitas (%) pada Sampel Geopolimer (CA dan CU) Variasi Lama Perlakuan (Hari ke-) .....	115
54.	Hubungan antara Kuat Tekan, Kristalinitas dan Kandungan pada Sampel Uji.....	117
55.	Pengaruh Perubahan Molaritas Variasi Waktu Perlakuan Curing Udara .....	121
56.	Mikrostruktur 12 M Curing Udara Umur 28 Hari.....	122
57.	Mikrostruktur 15 M Curing Udara Umur 28 Hari.....	122
58.	Nilai Kuat Tekan Mortar Geopolimer .....	127
59.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel Lolos Saringan No. 200 .....	129
60.	Grafik Pengujian <i>Sorptivity</i> Mortar Geopolymer Umur 3 Hari....	131
61.	Grafik Pengujian <i>Sorptivity</i> Mortar Geopolymer Umur 7 Hari....	131
62.	Grafik Pengujian <i>Sorptivity</i> Mortar Geopolymer Umur 28 Hari..	132
63.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 12MGS Umur 3 Hari .....	135

64.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 12MGS Umur 7 Hari .....	137
65.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 12MGS Umur 28 Hari .....	138
66.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 12MAS Umur 3 Hari .....	139
67.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 12MAS Umur 7 Hari .....	140
68.	Hubungan Kuat Tekan-Regangan Sampel 12MAS Umur 28 Hari .....	141
69.	Nilai Kuat Tekan Mortar Geopolimer Konsentrasi Molaritas 12 M .....	143
70.	Perbandingan Spektrum XRD pada Sampel 12 M (Garam Sulfat dan Asam Sulfat) M = Mullite, H = Hematite, B = Belite, Q = Quartz .....	146
71.	Perbandingan Derajat Kristalinitas pada Sampel Curing Asam Sulfat dan Garam Sulfat.....	147
72.	Grafik Pengamatan pada Sampel 12 M Curing Udara, Asam Sulfat, dan Garam Sulfat.....	148
73.	Mikrostruktur Mortar Geopolymer Rendaman Garam Sulfat.....	150
74.	Mikrostruktur Mortar Geopolymer Rendaman Asam Sulfat.....	151
75.	Hubungan Kuat Tekan Mortar Geopolymer dengan Umur.....	154
76.	Persentase Kenaikan Kuat Tekan mortar geopolymer.....	155

77.	Persamaan Korelasi Empiris Hasil Uji Model Kuat Tekan Curing Air .....	156
78.	Persamaan Korelasi Empiris Hasil Uji Model Kuat Tekan Curing Udara .....	157

## DAFTAR NOTASI

<b>AFm</b>	=	Aluminoferrit monosulfat
<b>Aft</b>	=	Aluminoferrit tetrasulfat
<b>ASTM</b>	=	<i>American Standard Testing Material</i>
<b>BFS</b>	=	<i>Blast Furnace Slag</i>
<b>CaO</b>	=	Kapur/Batu Kapur
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	=	<i>Calcium hydroxide</i>
<b>Cl/Cl<sub>2</sub></b>	=	Klorida/Klorin
<b>CSH</b>	=	<i>Calcium silicate hydrate/tobermorite</i>
<b>CH</b>	=	<i>Calcium hydroxide/portlandite</i>
<b>C<sub>2</sub>S</b>	=	<i>Dicalcium silicate/Belite</i>
<b>C<sub>3</sub>S</b>	=	<i>Tricalcium silicate/alite</i>
<b>C<sub>3</sub>A</b>	=	<i>Tricalcium Aluminate/aluminate</i>
<b>C<sub>4</sub>AF</b>	=	<i>Tetracalcium Alumino Ferrite/ferrite</i>
<b>C<sub>3</sub>A.3CaSO<sub>4</sub>.10H<sub>2</sub>O</b>	=	AFm
<b>C<sub>3</sub>A.3CaSO<sub>4</sub>.32H<sub>2</sub>O</b>	=	Aft/ <i>Ettringite</i>
<b>D</b>	=	Diameter Benda Uji Silinder
<b>DEF</b>	=	<i>Delay ettringite formation</i>
<b>Et</b>	=	<i>Ettringite</i>
<b>FAS</b>	=	Faktor air semen
<b>σ</b>	=	Kuat tekan (MPa)
<b>Fs</b>	=	<i>Friedel's salt</i>
<b>Isl-p</b>	=	<i>Isolated pore</i>
<b>Intr-p</b>	=	<i>Intergranular pore</i>
<b>K</b>	=	Konstanta empirik
<b>L</b>	=	Panjang benda uji silinder
<b>MPa</b>	=	Mega Pascal, satuan kuat tekan
<b>MgSO<sub>4</sub></b>	=	Magnesium sulfat
<b>NaCl</b>	=	Natrium klorida
<b>m</b>	=	Konstanta Empirik

<b>No</b>	=	Nomor
<b>OPC</b>	=	<i>Ordinary Portland Cement</i>
<b>SEM</b>	=	<i>Scanning Electron Microscopy</i>
<b>SK SNI</b>	=	Standar Konstruksi Standar Nasional Indonesia
<b>P</b>	=	Beban Maksimum
<b>p</b>	=	porositas
<b>PCC</b>	=	<i>Portland Cement Composite</i>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	=	Silika Oksida
<b>σ</b>	=	Kuat tekan pada porositas p
<b>σ<sub>0</sub></b>	=	Kuat tekan pada porositas nol
<b>XRD</b>	=	<i>X-Ray Diffraction</i>
<b>%</b>	=	Persen
<b>‰</b>	=	Per mil
<b>3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.CaCl.10H<sub>2</sub>O</b>	=	<i>Friedel's salt</i>
<b>V1</b>	=	Regangan Vertikal Sampel 1
<b>V2</b>	=	Regangan Vertikal Sampel 2
<b>V3</b>	=	Regangan Vertikal Sampel 3
<b>H1</b>	=	Regangan Horizontal Sampel 1
<b>H2</b>	=	Regangan Horizontal Sampel 2
<b>H3</b>	=	Regangan Horizontal Sampel 3
<b>XRF</b>	=	X-Ray Fluorence
<b>SEM</b>	=	Scanning Electron Microscope
<b>NaOH</b>	=	Natrium Hidroksida
<b>6MCA</b>	=	6 Molar Curing Air
<b>6MCU</b>	=	6 Molar Curing Udara
<b>12MCA</b>	=	12 Molar Curing Air
<b>12MCU</b>	=	12 Molar Curing Udara
<b>15MCA</b>	=	15 Molar Curing Air
<b>15MCU</b>	=	15 Molar Curing Udara
<b>12MGS</b>	=	15 Molar Curing Garam Sulfat

**12MAS** = 12 Molar Curing Asam Sulfat

**12MCA** = 12 Molar Curing Air

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **A. Latar Belakang**

Perkembangan industri beton semen Portland semakin meluas secara global hingga saat ini. Permintaan beton atau mortar sebagai bahan konstruksi terus meningkat karena peningkatan pembangunan infrastruktur. Peningkatan ini menimbulkan permasalahan lingkungan yaitu emisi gas karbondioksida.

Sekarang ini terdapat banyak pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar batubara. Hasil sampingan dari pembakaran batu bara berupa abu terbang yang tergolong sebagai material polusi (*pollutant*). Di Indonesia, untuk mengurangi limbah maka sejumlah pabrik semen mencampur abu terbang dan limbah yang mengandung pozzolan dengan klinker semen portland untuk menghasilkan Semen Portland Komposit (SNI 15-7064-2004) dengan tujuan menurunkan konsumsi energi dan mengurangi penggunaan sumber alam tidak terbarukan (Antiohos *et al.*, 2005). Semen Portland Komposit dapat dikategorikan sebagai CEM II menurut standar Eropa EN 197-1:2000, di Indonesia baru diproduksi pada tahun 2005, namun di Eropa pangsa pasar semen kategori CEM II telah lebih 50%, lebih besar dari Semen Portland Jenis 1 yang hanya sekitar 35% (Tjaronge, 2012).

Semen merupakan material yang digunakan sebagai bahan pengikat bersama dengan agregat untuk membentuk beton. Semen secara luas telah banyak digunakan sebagai material untuk mengikat agregat kasar untuk membuat beton dan mortar. Pembuatan semen akan menghabiskan sumber daya alam. Salah satu upaya untuk mengurangi penggunaan semen adalah pengembangan material geopolimer. Sejumlah studi menunjukkan bahwa bahan pengikat geopolimer dapat membentuk beton, dimana beton yang dibuat dengan geopolimer berbahan abu terbang memiliki karakteristik fisik menyerupai beton yang berbahan semen.

Salah satu jenis material untuk menghasilkan geopolimer adalah abu terbang. Abu terbang adalah salah satu hasil produk sisa pembakaran batubara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Penggunaan geopolimer abu terbang sebagai pengikat material turut pula dikembangkan dalam memberikan produk yang ramah lingkungan, mengingat pabrik semen selain menghasilkan semen juga turut menghasilkan emisi karbon dioksida yang cukup besar ke atmosfer. Abu terbang kaya akan kandungan silika dan alumina. Kandungan silika dan alumina dalam abu terbang dapat bereaksi dengan cairan alkalin untuk menghasilkan bahan pengikat (*binder*). Natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) dan Natrium hidroksida ( $\text{NaOH}$ ) digunakan sebagai alkalin aktivator (Hardjito dkk., 2004). Natrium silikat berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi, sedangkan natrium hidroksida berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam abu terbang sehingga

dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat. Selain aktivator natrium silikat (sodium silikat) dan natrium hidroksida (sodium hidroksida), kekuatan dari ikatan geopolimer abu terbang juga dipengaruhi oleh besarnya konsentrasi dan rasio dari alkalin aktivator yang digunakan. Alternatif lain yang dapat digunakan sebagai bahan geopolimer selain abu terbang, yang berasal dari produk sampingan ataupun merupakan limbah dari suatu produk yaitu antara lain *silica fume*, slag, *rice-husk ash*, dan lain-lain. Bahan-bahan ini telah dicoba digunakan dari beberapa penelitian yang sudah dilakukan baik pada beton. Selain jenis material geopolimer yang telah dikembangkan juga dari jenis material agregat beton pun turut dikembangkan.

Sebagian besar lapisan permukaan di wilayah Papua dan Kalimantan merupakan Tanah Laterit. Ketika kering tanah laterit akan kering namun ketika mengandung air dalam jumlah besar tanah laterit menjadi lumpur. Tanah memiliki spesifikasi yang berbeda dari setiap jenisnya, sehingga memerlukan penanganan yang berbeda baik secara mekanis maupun kimia. Penanganan ini tidak bisa dipisahkan karena saling berhubungan erat satu dengan yang lainnya. Jika penanganannya tidak dilakukan dengan tepat maka akan terjadi kerusakan-kerusakan struktur bangunan sipil yang ditimbulkan oleh reaksi tanah baik secara mekanis maupun kimia.

Geopolimer adalah bentuk anorganik alumina-silika yang disintesa melalui material yang banyak mengandung silika (Si) dan alumina (Al)

yang berasal dari alam atau dari material hasil sampingan industri. Bahan pengikat geopolimer adalah sistem anorganik 2-komponen yang terdiri atas; komponen solid yang memiliki  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dalam jumlah yang cukup untuk bisa bersenyawa seperti abu terbang, pozzolan, slag dan lain-lain. Cairan alkalin sebagai komponen activator memiliki kandungan alkali hidroksida, silika, alumina, karbon dan sulfat atau kombinasi keduanya. Pada saat komponen solid dan komponen aktivator dicampur, maka terjadi proses pengerasan yang disebabkan oleh terbentuknya *aluminosilicate network* yang bervariasi antara *amorphous* dan *crystalline*. Penelitian menunjukkan alkali aktivator berupa *sodium silikat* ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) atau *sodium silicate* dengan *sodium hydroxide* (NaOH) memberikan kekuatan yang baik pada abu terbang geopolimer (Kong dan Sanjayan, 2008). NaOH digunakan pada penelitian ini sebagai alkalin aktivator.

Penggunaan air bawah tanah sebagai sumber air bersih juga semakin meningkat. Akibat dari pemompaan air bawah tanah yang semakin meningkat, menyebabkan terjadinya intrusi air laut. Intrusi air laut merupakan proses masuknya air laut di bawah permukaan tanah melalui akuifer di daratan atau daerah pantai. Dengan adanya intrusi air laut, maka mempengaruhi kondisi tanah yang akan mengandung garam-garam klorida dan sulfat hasil intrusi air laut. Selain itu, keberadaan hujan asam yang diakibatkan oleh polusi udara dari pabrik juga akan mengakibatkan tanah pada daerah sekitar pabrik tersebut akan mengandung sulfat. Selain itu, kondisi ini juga akan mempengaruhi kekuatan konstruksi

Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) dan dinding rumah yang menggunakan bata dan berada di daerah yang mengandung sulfat, mengingat konstruksi tersebut khususnya IPAL yang mengalami kontak langsung dengan tanah serta tidak menutup kemungkinan bahwa tanah tempat konstruksi tersebut berpijak mengandung sulfat.

Saat ini pemanfaatan material-material buangan semakin digalakkan untuk menjadi bahan baku pembuatan beton. Salah satu yang dapat dimanfaatkan adalah abu jerami padi. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk menggunakan abu jerami sebagai salah satu bahan pembuatan beton geopolimer.

Matakah F. *et al.*, 2016 mempelajari beton geopolimer dengan komposisi pengikat yang bekerja dengan baik dalam pekerjaan eksperimental terdiri dari abu jerami panas: abu terbang batubara: metakaolin: gips dengan perbandingan berat sebesar 0,50: 0,25: 0,25: 0,05. Beton berbasis abu jerami serta semen Portland sebagai kontrol menjadi fokus utama penelitian eksperimental yang komprehensif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa material beton geopolimer berbasis abu non kayu dengan formulasi binder yang tepat dapat memberikan atribut mekanis yang diinginkan, kesetaraan kelembaban, daya tahan, dan tahan api bila dibandingkan dengan beton semen Portland normal.

Detphan & Chindaprasirt, 2009 melaporkan bahwa fly ash (FA) dan abu sekam padi (RHA) digunakan sebagai bahan pembuatan geopolimer. Suhu pembakaran sekam padi, kehalusan RHA dan rasio FA ke RHA

divariasikan. Kepadatan dan kekuatan mortar geopolimer dengan rasio massa RHA/FA yaitu 0/100, 20/80, 40/60, dan 60/40. Geopolimer diaktifkan dengan natrium hidroksida (NaOH), natrium silikat, dan panas. Terungkap bahwa suhu pembakaran optimal RHA untuk membuat geopolimer FA-RHA adalah 690°C. FA dan RHA yang tertahan pada ayakan No. 325 (1% - 5%) adalah material yang cocok untuk membuat geopolimer dan diperoleh kekuatan tekan antara 12,5-56,0 MPa tergantung pada rasio FA/RHA, kehalusan RHA, dan rasio natrium silikat dengan NaOH. Mortar geopolimer FA-RHA yang relative tinggi diperoleh dengan menggunakan rasio massa natrium silikat/NaOH yaitu 4,0, dengan waktu sebelum sampel dipanaskan dalam oven selama 1 jam dan selanjutnya dioven pada 60°C selama 48 jam.

Rosello J. *et al.*, 2017 menemukan limbah biomassa dari jerami padi memiliki banyak masalah manajemen, termasuk pembakaran lapangan yang menyebabkan polusi udara yang parah dan dekomposisi organik alami yang menghasilkan emisi metana. Konversi limbah ini menjadi abu dapat menawarkan kemungkinan untuk menggunakannya kembali sebagai bahan baku pembuatan geopolimer. Untuk pertama kalinya abu dari bagian tanaman padi yang berbeda (*Oryza sativa*) dikarakterisasi dari sudut pandang komposisi kimia: abu daun padi (RLA), abu selubung daun padi (RIsA) dan abu batang padi (RsA). Studi mikroskopis onashes mengungkapkan heterogenitas dalam distribusi unsur-unsur kimia dalam struktur seluler yang tersisa (spodogram). Konsentrasi tertinggi  $\text{SiO}_2$

ditemukan dalam phytolith berbentuk dumbbell ( $\text{SiO}_2 > 78\%$ ). Dalam komposisi kimia global abu,  $\text{SiO}_2$  juga merupakan oksida utama yang ada. Menurut klasifikasi Vassilev komposisi kimia, RLA berada pada zona K-MA (asam sedang), RIsA ke zona-K (asam rendah) dan RsA ke zona-S (asam tinggi). Temperatur kalsinasi  $\geq 550^\circ\text{C}$  sepenuhnya menghilangkan zat organik dari jerami dan abu mengalami sinterisasi signifikan dengan kalsinasi pada  $650^\circ\text{C}$  karena adanya kalium klorida. Di sini, abu dari batang padi (RSA) dikarakterisasi (melalui difraksi sinar-X, Fourier transform infrared spectroscopy dan thermogravimetry) dan diuji dari sudut pandang reaktivitas (reaksi terhadap kalsium hidroksida) untuk menilai kemungkinan penggunaan kembali sebagai bahan baku pembuatan geopolimer. Hasil dari pasta yang dibuat dengan mencampurkan RSA dan kalsium hidroksida menunjukkan bahwa reaktivitas pozzolan dari abu itu penting (fiksasi kapur terhidrasi 82% selama 7 hari dan 87% selama 28 hari di RSA: pasta kapur terhidrasi) dan penyemenan gel CSH terbentuk setelah 7 dan 28 hari suhu kamar. Pengembangan kekuatan tekan mortar semen Portland dengan penggantian 10% dan 25% oleh RSA menghasilkan 107% dan 98% dari kekuatan mortar kontrol setelah 28 hari perawatan. Tes XRF dan XRD mengkonfirmasi terbentuknya pozzolan dari semen campuran RSA. Hasil reaktivitas ini sangat menjanjikan dalam hal potensi penggunaan kembali abu sebagai bahan baku pembuatan geopolimer.

Kim Y. Y. *et al.*, 2014 melakukan penyelidikan eksperimental untuk mengembangkan beton geopolimer dari limbah abu sekam (RHA) yang diaktivasi dengan alkali dari natrium hidroksida dengan natrium silikat. Dimungkinkan untuk mencapai kekuatan tekan sebesar 31 N/mm<sup>2</sup> dan 45 N/mm<sup>2</sup>, masing-masing untuk mortar geopolimer teraktivasi alkali 10 M yang diuji pada umur 7 dan 28 hari di oven selama 24 jam pada 60°C. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan waktu oven dan konsentrasi aktivator alkali dapat meningkatkan kekuatan tekan. Studi ketahanan dilakukan dalam media asam dan sulfat seperti H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, dan MgSO<sub>4</sub>. Selain itu, studi dengan mikroskop optik fluorescent dan difraksi sinar-X (XRD) studi telah menunjukkan pembentukan puncak baru dan meningkatkan reaksi polimerisasi yang bertanggung jawab untuk pengembangan kekuatan dan karenanya RHA memiliki potensi besar sebagai pengganti beton semen Portland biasa.

Al-Akhras N. M. *et al.*, 2007 meneliti efek abu jerami gandum (WSA) pada kinerja beton dalam menanggapi siklus termal, yang dievaluasi dengan mengukur kekuatan tekan dan resistivitas listrik dan pengamatan visual retakan pada spesimen beton. Tiga variasi penggantian WSA yaitu 5, 10 dan 15% terhadap berat pasir yang digunakan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beton WSA diinduksi, siklus termal menimbulkan banyak retakan yang tersebar di permukaan spesimen. Beton WSA ditemukan lebih tahan terhadap efek dari siklus termal dibandingkan

dengan beton polos. Kinerja Beton WSA terhadap siklus termal meningkat dengan meningkatnya kadar WSA.

Dalam pengikat geopolimer berbasis abu terbang, abu jerami dan tanah laterit, larutan alkali bereaksi dengan abu terbang membentuk bahan pengikat alumina-silika, tanpa tambahan semen. Pengikat geopolimer kemudian mengikat agregat untuk membentuk mortar atau beton.

Beberapa studi penelitian yang menggunakan geopolimer abu terbang sebagai bahan pengikat material menggantikan semen, terlihat selalu membutuhkan suhu panas oven untuk dapat mengembangkan dan meningkatkan kekuatan beton. Oleh karena itu, panas oven sangat dibutuhkan untuk membuat beton atau mortar geopolimer berbahan abu jerami, tanah laterit dan abu terbang. Pemberian panas pada geopolimer abu terbang untuk mengembangkan kekuatan beton hingga mencapai kekuatan beton normal.

Selain dari pengujian empirik yang digunakan untuk mengevaluasi campuran geopolimer, dapat juga digunakan pengujian yang bersifat semikuantitatif dari benda uji. Pengujian yang dimaksud adalah pengujian XRD (*X-Ray Diffraction*) dan mikrostruktur (SEM). Pengujian XRD dilakukan untuk mengidentifikasi unsur/senyawa/fasa dan struktur kristal yang terbentuk secara kualitatif. Pada dasarnya, atom yang tersusun membentuk struktur kristal dan struktur mikro/fasa dapat dianalisis melalui teknik eksperimental yang berbasis difraksi. Geometri yang

direpresentasikan melalui arah gelombang membentuk pola difraksi yang dapat digunakan untuk menentukan sel satuan pada struktur kristal dan senyawa (Fultz, 2013; Cullity, 1956). Pengujian SEM dilakukan untuk mengetahui mikrostruktur dan morfologi benda uji.

Dari beberapa penelitian terdahulu beton atau mortar geopolimer membutuhkan oven pada suhu yang berkisar antara 35 - 80°C selama 24 jam untuk mencapai kekuatan yang sama dengan beton normal. Oleh karena itu, untuk mengetahui karakteristik mortar geopolimer maka diaplikasikan curing udara dan curing air, sedangkan karakteristik durabilitas diaplikasikan curing dengan perendaman sulfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dan  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dilakukanlah sebuah penelitian dengan judul : **“Karakteristik Geopolimer yang Menggunakan Abu Jerami, Abu Terbang dan Tanah Laterit Sebagai Bahan Ramah Lingkungan”**.

## **B. Rumusan Masalah**

Teknologi beton atau mortar saat ini dibuat melalui bahan baku dengan menggunakan batu pecah, pasir dan bahan pengikat berupa semen Portland Komposit. Penelitian ini berusaha mendorong pemakaian teknologi beton atau mortar geopolimer dengan tujuan untuk mengurangi pemakaian energi sumber daya alam tak terbarukan. Di lain pihak, penggunaan material limbah juga terus digalakkan oleh pemerintah untuk

mendorong pembangunan infrastruktur nasional berbasis material limbah.

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana nilai kuat tekan mortar geopolimer berbahan abu jerami, abu terbang dan tanah laterit.
2. Bagaimana pengaruh konsentrasi molaritas aktivator NaOH untuk mortar geopolimer yang menggunakan abu terbang, abu jerami dan tanah laterit terhadap nilai kuat tekannya dengan perlakuan curing udara, air, rendaman  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dan rendaman  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .
3. Bagaimana memodelkan hubungan antara salah satu karakteristik geopolimer (kuat tekan), konsentrasi molaritas dan umur mortar geopolimer.

### **C. Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menemukan nilai kuat tekan mortar geopolimer berbahan abu jerami, abu terbang dan tanah laterit.
2. Menemukan konsentrasi molaritas aktivator NaOH yang terbaik untuk mortar geopolimer menggunakan abu terbang, abu jerami dan tanah laterit yang mengalami perlakuan curing udara, curing air, rendaman  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dan rendaman  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .
3. Merumuskan model persamaan korelasi empiris hubungan antara salah satu karakteristik geopolimer (kuat tekan), konsentrasi molaritas dan umur mortar geopolimer.

#### **D. Batasan Masalah**

Permasalahan mortar geopolimer sangat luas, sehingga dipandang perlu membatasi masalah penelitian ini agar dapat lebih terarah. Penelitian ini fokus pada hal-hal berikut :

1. Penelitian yang dilakukan adalah berbentuk uji eksperimen di laboratorium.
2. Abu jerami yang digunakan diperoleh dari hasil pembuangan limbah masyarakat yang telah diolah di sekitar Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan.
3. Abu terbang yang digunakan diperoleh dari hasil limbah buangan dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang ada di Kabupaten Jeneponto, Provinsi Sulawesi Selatan.
4. Mortar geopolimer yang dihasilkan, dilakukan pengujian kuat tekan, XRD dan SEM.
5. Alkali aktivator yang digunakan adalah NaOH (Natrium Hidroksida).

#### **E. Manfaat Penelitian**

Manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian ini adalah :

1. Menghasilkan suatu inovasi pada teknologi beton/mortar geopolimer secara berkelanjutan yang memanfaatkan material limbah (abu jerami) dan limbah buangan PLTU (abu terbang) serta tanah laterit yang banyak terdapat di Indonesia.

2. Mendukung pembangunan infrastruktur nasional berbasis material lokal dan material limbah buangan serta pembangunan yang *eco-friendly* (berwawasan lingkungan).
3. Menghasilkan inovasi pada teknologi batu bata yang berbasis ramah lingkungan yang dapat mengeras tanpa melalui proses pembakaran.

## **F. Sistematika Penulisan**

Agar lebih terarah tulisan ini, sistematika penulisan disertasi yang akan dilakukan sesuai tahapan-tahapan yang dipersyaratkan sehingga produk yang dihasilkan lebih sistematis. Adapun susunan disertasi ini dapat diurutkan sebagai berikut :

### **BAB I PENDAHULUAN**

Dalam bab ini, memberikan gambaran tentang pentingnya masalah ini diangkat sebagai sebuah disertasi. Pokok-Pokok bahasan dalam BAB ini adalah latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan masalah, maksud tujuan dari penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Dalam bab ini, memberikan gambaran tentang isu material lokal sebagai bahan pembentuk mortar geopolimer, tinjauan penelitian terdahulu mengenai mortar geopolimer, informasi tentang mortar geopolimer dan pengujian-pengujian yang digunakan untuk menguji beton geopolimer yang dibuat.

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini, dijelaskan metode yang digunakan dalam penelitian ini, bagan alir penelitian, pembuatan benda uji dan rencana jumlah benda uji, pengujian-pengujian yang akan dilakukan dengan variasi molaritas konsentrasi dan dan variasi perawatan pada beton geopolimer abu terbang.

### BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini, dijelaskan mengenai karakteristik fisik dan kimia bahan pembentuk mortar geopolimer, komposisi mortar geopolimer, hasil pengujian kuat tekan mortar geopolimer dengan variasi konsentrasi NaOH dan umur mortar geopolimer, pemilihan molaritas terbaik dan hasil pengujian kuat tekan mortar geopolimer dengan perendaman garam sulfat dan asam sulfat. Selain itu, dilakukan perumusan model hubungan antara nilai kuat tekan, konsentrasi molaritas dan umur mortar geopolimer. Hasil yang didapatkan kemudian dibahas berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan.

### BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN

Merupakan bab yang menyimpulkan hasil dari analisis penelitian dan memberikan saran-saran dan rekomendasi penelitian.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **A. Isu Material Limbah Sebagai Bahan Pembentuk Material**

##### **Geopolymer**

Penipisan lapisan ozon yang terjadi dan isu pemanasan global pada saat ini telah meningkatkan kesadaran industri konstruksi dalam menggunakan bahan konstruksi yang lebih ramah lingkungan. Material geopolimer mulai mendapat perhatian dari praktisi dan peneliti konstruksi, karena menguntungkan dalam penggunaan limbah hasil samping untuk menggantikan semen dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Hal ini memiliki sifat mekanik dan daya tahan yang lebih baik dibandingkan dengan beton konvensional. Meskipun menguntungkan, penggunaan material geopolimer secara praktis masih sangat terbatas disebabkan oleh kurangnya kajian dari segi elemen struktur, desain dan kajian aplikasinya. Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa beton geopolimer dapat menggantikan beton konvensional karena memberikan kinerja struktur yang lebih diinginkan, sifat mekanik yang lebih baik, dan daya tahan yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton konvensional.

Indonesia merupakan negara agraris penghasil bahan pangan diantaranya beras yang berasal dari tanaman padi. Limbah yang ditinggalkan tanaman padi cukup banyak yaitu batang (jerami) dan sekam. Sekam padi dan batang padi (jerami) bila dibakar dengan suhu tertentu

menghasilkan silika amorf yang bersifat reaktif sehingga potensial digunakan sebagai bahan potensial digunakan sebagai bahan mikrosilika. Pemanfaatan limbah untuk bahan konstruksi akan menunjang pengadaan bahan konstruksi, meningkatkan mutu bahan konstruksi, memberikan nilai tambah dan nilai guna limbah, menciptakan lapangan pekerjaan, dan mengurangi dampak negatif lingkungan (Somna *et al.*, 2011).

Limbah jerami padi memiliki banyak masalah, diantaranya menyebabkan polusi udara dan dekomposisi organik alami yang menghasilkan emisi gas metana. Konversi limbah ini menjadi abu dapat menawarkan kemungkinan untuk kembali menggunakannya dalam sistem pembuatan semen (Rosello *et al.*, 2017). Abu jerami yang dihasilkan dari pembakaran jerami diberbagai daerah menjadi limbah yang cukup besar dan sering ditemukan di persawahan setelah musim panen berakhir.

Abu terbang (fly ash) merupakan material sisa pembakaran industri-industri berbasis energi yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakarnya. Industri-industri seperti Pembangkit Listrik Tenaga Uap, pabrik semen, pabrik kertas dan lain-lain adalah sumber penghasil abu terbang dalam jumlah yang sangat besar. Pada tahun 2014, dilaporkan bahwa industri energi dengan bahan bakar batu bara memproduksi 50,4 juta ton abu terbang namun hanya 23,2 juta ton yang sudah digunakan dalam berbagai aplikasi (*American Coal Ash Association*, 2014).

Material dasar pembentuk pasta geopolimer adalah pozolan, baik dari alam maupun pozolan buatan. Material yang bersifat pozolan

mengandung silika dan alumina dapat digunakan sebagai binder (pengikat). Diantaranya adalah fly ash, metakaolin, abu sekam atau material vulkanik (Davidovits, 2008). Sintesis mortar geopolimer memiliki dua persyaratan utama untuk dapat bereaksi, yang pertama adalah sumber bahan yang kaya Silikon (Si) dan Aluminium (Al), serta yang kedua adalah adanya aktivator seperti Natrium Hidroksida/Kalium Hidroksida (Rahim A. dkk., 2014).

## **B. Teori Geopolimer**

Geopolimer adalah campuran beton di mana penggunaan material semen portland sebagai bahan pengikat digantikan oleh bahan lain seperti abu terbang (*abu terbang*), abu kulit padi (*rice husk ash*), dan lain-lain yang banyak mengandung silika dan aluminium (Davidovits, 1994). Geopolimer merupakan produk beton geosintetik dimana reaksi pengikatan yang terjadi adalah reaksi polimerisasi. Dalam reaksi polimerisasi, silika (Si) dan aluminium (Al) mempunyai peranan yang penting dalam ikatan polimerisasi. Geopolimer dikategorikan sebagai material ramah lingkungan karena pembuatan bahan dasar geopolimer membutuhkan jumlah energi yang rendah jika dibandingkan dengan produksi semen Portland yang menghasilkan CO<sub>2</sub> dalam jumlah besar (Pan & Sanjayan, 2009; Rattanasak *et al.*, 2009).

Dalam proses geopolimer, terjadi reaksi kimia antara alumina-silikat oksida (Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) dengan alkali polisilikat yang menghasilkan ikatan



Penelitian-penelitian yang telah dilakukan melaporkan geopolimer memiliki kekuatan awal yang tinggi, penyusutan (*shrinkage*) yang rendah, ketahanan sulfat, ketahanan korosi, ketahanan terhadap asam, ketahanan terhadap api dan reaksi agregat alkali yang tidak berbahaya. Berdasarkan hasil pengujian laboratorium yang telah dilakukan oleh Davidovits, 1994 melaporkan bahwa geopolimer dapat mengeras secara cepat pada temperatur ruang dan memiliki kekuatan tekan sekitar 20 MPa dan sekitar 70 – 100 MPa setelah 28 hari.

### **C. Material Pembentuk Mortar Geopolymer**

#### **1. Abu Terbang**

Solid material adalah salah satu komponen sistem anorganik geopolimer. Solid material untuk geopolimer dapat berupa mineral alami seperti kaolin, tanah liat, mika, andalusit, spinel dan lain sebagainya. Alternatif lain yang dapat digunakan adalah material yang berasal dari produk sampingan seperti abu terbang, silica fume, slag, rice-husk ash, lumpur merah, dan lain-lain. Penelitian ini menggunakan abu terbang sebagai solid material. Abu terbang merupakan material hasil sampingan (*by-product*) industri salah satunya adalah sisa hasil proses pembakaran batubara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Material ini banyak digunakan sebagai bahan tambahan untuk memperbaiki kinerja beton. Material abu terbang dikategorikan dalam material “*pozzolon*” yakni material *siliceous* atau *aluminous* yang didalamnya terdapat sedikit sekali

atau tidak sama sekali material *cementious* sebagaimana yang dimiliki oleh semen portland. Material abu terbang dapat saja bereaksi secara kimia dengan cairan alkalin pada temperatur tertentu untuk membentuk material campuran yang memiliki sifat seperti semen. Abu terbang, biasa dikenal sebagai abu berbentuk serbuk, yang merupakan hasil sisa dari pembakaran abu batubara pada pembangkit tenaga listrik, yang dipisahkan dari gas pembakaran melalui pengumpul mekanik atau elektrostatik. Abu terbang terdiri dari sebagian besar partikel yang mempunyai diameter 1-150 mikrometer yang lolos dari ayakan 45 mikrometer. Berdasarkan ASTM C618-03 (2003), abu terbang didefinisikan sebagai material halus yang berasal dari hasil pembakaran batubara. Penggunaan abu terbang pada beton mempunyai banyak keunggulan baik untuk kondisi beton segar dan beton mengeras. Keunggulan pada beton segar adalah meningkatkan kelacakan beton (*workability*) mengurangi kebutuhan air, mengurangi *bleeding*, dan memperlambat waktu pengerasan beton pada saat proses pengecoran.

Tabel 1 menunjukkan persyaratan fisik abu terbang dimana tes untuk menentukan kekuatan Portland semen yang tidak dianggap menjadi bagian yang direkomendasikan untuk digunakan pada pembuatan beton dan melakukan kontrol kekuatan pada umur 7 dan 28 hari. Umumnya abu terbang memiliki komposisi kimia utama berupa *silica* ( $\text{SiO}_2$ ), *alumina* ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dan *ferric oxide* ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Kandungan kimia lainnya seperti *calcium oxides* ( $\text{CaO}$ ), *magnesium* ( $\text{MgO}$ ), *sulphur* ( $\text{SO}_3$ ), *alkaline* ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ),

*phosphorus* ( $P_2O_5$ ), *manganese* ( $Mn_2O_3$ ) dan *titanium* ( $TiO_2$ ). ASTM C618-03 membagi abu terbang dalam tiga kategori yaitu kelas N, kelas F dan kelas C seperti pada Tabel 1. Minimum kandungan senyawa  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  dan  $Fe_2O_3$  adalah 70% untuk kelas N dan kelas F, sedangkan kelas C antara 50% - 70 %. Sehingga, kandungan CaO pada abu terbang kelas N dan F relatif lebih kecil dibandingkan dengan kelas C dimana kandungan CaO lebih besar dari pada 10% (ASTM C618-03, 2003). Gambar 1 dan Gambar 2 masing-masing memperlihatkan jenis abu terbang kelas F dan jenis abu terbang kelas C yang biasa digunakan dalam membuat geopolymer beton maupun geopolymer mortar.

Kebutuhan abu terbang sebagai bahan geopolimer menurut Shindunata (2006), abu terbang kelas F yang merupakan hasil produksi industri lebih diutamakan pada penggunaan beton geopolimer karena memiliki kandungan *amorphous alumino-silicate* yang banyak dan memiliki kelecakan (*workability*) yang besar. Selain itu, Diaz *et al* (2010) mengemukakan, meskipun *silicate* dan *alumina* merupakan bahan utama pada reaksi geopolimer, kandungan CaO yang besar dan persentase jumlah partikel abu terbang kurang dari 5  $\mu m$  dapat mempengaruhi sifat geopolimer. Mereka menyarankan kandungan CaO yang lebih besar dari 20% tidak direkomendasikan untuk geopolimer karena mempercepat pengerasan. Oleh karena itu, abu terbang yang tergolong sebagai limbah B3 di Indonesia dapat dimanfaatkan sebagai bahan pembentuk beton yang ramah lingkungan.

**Tabel 1.** Kebutuhan kandungan kimia abu terbang (ASTM C618-03, 2003)

Kebutuhan	Kelas		
	N	F	C
<i>Silicon dioxide</i> (SiO <sub>2</sub> ) plus <i>aluminium oxide</i> (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) plus <i>iron oxide</i> (F <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), min, %	70	70	50
<i>Sulfur trioxide</i> (SO <sub>3</sub> ), maks, %	4,0	5,0	5,0
Moisuture, maks, %	3,0	3,0	3,0
Loss on ignition (LOI), maks, %	10,0	6,0	6,0

**Gambar 1.** Abu terbang kelas F**Gambar 2.** Abu terbang kelas C

## 2. Tanah Laterit

Tanah Laterit atau sering disebut juga dengan tanah merah merupakan tanah yang berwarna merah hingga coklat yang terbentuk pada lingkungan yang lembab, dingin dan genangan-genangan air. Secara spesifik tanah merah memiliki profil tanah yang dalam, mudah menyerap air memiliki kandungan bahan organik yang sedang dan pH netral hingga asam dan banyak mengandung zat besi dan aluminium sehingga baik digunakan pondasi bangunan karena mudah menyerap air. Tekstur tanah merah relatif padat dan kokoh untuk menopang bangunan di atasnya. Jenis tanah ini terdapat mulai dari tepi pantai yang landau sampai dengan pegunungan yang tinggi dengan iklim agak kering sampai basah. Persebaran mayoritas meliputi sebagian besar lahan yang ada di Indonesia.

Curah hujan yang tinggi, suhu yang tinggi, eluviasi yang intensif, dan sistem pengaliran yang baik mempengaruhi tebal pelapukan tanah laterit di daerah tropis (Wei, 2014). Tanah laterit adalah batuan heterogen dan anisotropik yang tersusun dari formasi kuat dari mineral yang mengandung besi yang keras dan diresapi dengan bahan lempung lunak (Kasthurba *et al.*, 2007 dalam Muthusamy *et al.*, 2015). Tanah laterit adalah tanah yang kaya oksida, besi, aluminium atau keduanya (Raju & Ramakrishnan, 1972 dalam Muthusamy *et al.*, 2015). Tanah laterit banyak digunakan sebagai bahan bangunan karena jumlahnya banyak tersedia di beberapa bagian dunia. Penggunaan tanah laterit sebagai bahan

pengganti agregat halus dalam beton telah diteliti secara ekstensif (Adepegba, 1975 dalam Muthusamy *et al.*, 2015; Fola *et al.*, 1990; Oyekan & Balogun, 1997; Salau & Balogun, 1998; Ettu *et al.*, 2013 dalam Muthusamy *et al.*, 2015).

Tanah laterit terlihat seperti warna karat dikarenakan mengandung oksidasi besi yang tinggi. Pada umumnya tanah laterit mengandung besi, timah, zirkon, kwarsa, aluminium, nikel, oksida titanium dan lain-lain. Tanah laterit adalah tanah yang terbentuk di daerah tropis atau sub tropis dengan tingkat pelapukan tinggi pada batuan basa sampai batuan ultrabasa yang didominasi oleh kandungan logam besi. Tanah ini mengandung mineral-mineral lempung yang relatif tinggi utamanya illite dan montmorilonite, sehingga potensi kerusakannya relatif besar jika dilakukan pekerjaan konstruksi pada tanah seperti ini. Tanah laterit merupakan kelompok tanah dari hasil pelapukan yang tinggi, terbentuk dari hasil konsentrasi hidrasi oksida besi dan aluminium. Gambar 3 memperlihatkan tanah laterit yang banyak terdapat di daerah Kalimantan.



**Gambar 3.** Tanah laterit

Tanah Laterit terjadi karena pengaruh suhu yang tinggi dan curah hujan tinggi sehingga kekurangan unsur hara, kurang subur dan tandus. Berbagai mineral yang dibutuhkan tanaman larut dan meninggalkan sisa oksidasi besi dan aluminium. Tanah laterit banyak terdapat di Lampung, Jawa Tengah, Jawa Barat, Kalimantan Barat, dan Sulawesi Tenggara.

Tanah laterit masuk dalam jenis tanah Latosol. Tanah latosol adalah tanah yang terbentuk pada zona tropis maupun ekuatorial lembab. Kandungan mineral tanah liat silikat (*clay*) membuat latosol relatif rendah plastisitas (lengket) serta sangat rapuh, akibatnya air akan masuk dengan mudah ke dalam tanah ini. Latosol sebenarnya hanya bisa ditemukan di daerah hangat serta lembab, ini sangat sesuai dengan jenis iklim di daerah khatulistiwa. Jenis tanah latosol sangat cepat kehilangan sifat kesuburannya karena panas yang berlebihan telah menghilangkan nutrisi tanaman di semua lapisan tanah ini. Namun, tanah latosol menguntungkan bagi pertumbuhan hutan hujan tropis yang luas. Kawasan hutan lebat yang luas sangat berhubungan dengan rezim iklim basah-kering tropis. Fitur menarik dari jenis tanah latosol adalah perkembangan lokal dari akumulasi sesquioxides besi maupun aluminium menjadi lapisan yang banyak dimanfaatkan dalam pembuatan batu bata. Bahan tanah ini biasa disebut dengan laterit, dimana pada kondisi udara sangat kering, jenis tanah ini akan menjadi sangat keras. Berbagai penelitian telah mengungkapkan penggunaan tanah laterit sebagai salah satu yang dapat dimanfaatkan dalam pembuatan beton geopolimer.

### 3. Abu Jerami Padi

Jerami adalah limbah hasil usaha pertanian berupa daun, tangkai, dan daun tanaman yang telah kering, setelah biji-bijiannya dipisahkan. Abu jerami padi adalah hasil pembakaran dari jerami padi yang merupakan salah satu limbah terbesar pertanian di Indonesia.

Menurut Malasyi Syibril dkk (2014), abu jerami padi berasal dari jerami padi yang digiling atau ditumbuk halus. Abu jerami padi dapat dimanfaatkan untuk abu gosok, bahan ameliorisasi tanah asam, dan bahan campuran dalam pembuatan semen hidrolik serta dapat dimanfaatkan campuran batako/mortar, beton, dan campuran batu bata press. Tabel 2 memperlihatkan kebutuhan kandungan kimia abu jerami.

**Tabel 2.** Kebutuhan kandungan kimia abu jerami (Syibral M. dkk., 2014)

Kandungan kimia	Berat dalam persen
SiO <sub>2</sub>	65,92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2
CaO	2,4
MgO	3,11
SO <sub>4</sub>	0,69

Jerami merupakan limbah pertanian terbesar serta belum sepenuhnya dimanfaatkan karena adanya faktor teknis dan factor ekonomis yang dapat terjadi dengan pemanfaatan limbah jerami ini. Pada sebagian petani, jerami sering digunakan sebagai mulsa pada saat menanam palawija. Hanya sebagian kecil petani menggunakan jerami

sebagai pakan ternak alternatif di kala musim kering karena sulitnya mendapatkan hijauan. Di lain pihak jerami sebagai limbah pertanian, sering menjadi permasalahan bagi petani, sehingga sering di bakar untuk mengatasi masalah tersebut. Menurut Badan Pusat Statistik, produksi padi nasional mencapai 71,29 juta ton pertahun pada tahun 2011. Sedangkan produksi jerami padi dapat mencapai 12 - 15 ton per hektar per panen, bervariasi tergantung pada lokasi dan jenis varietas tanaman padi yang digunakan (Berita Resmi Statistik, 2013).

Biomassa berselulosa terbentuk dari tiga komponen utama yakni selulosa, hemiselulosa dan lignin. Selulosa merupakan komponen utama yang terkandung dalam dinding sel tumbuhan dan mendominasi hingga 50% berat kering tumbuhan. Jerami padi diketahui memiliki kandungan selulosa yang tinggi, mencapai 39,1% berat kering, 27,5% hemiselulosa dan kandungan lignin 12,5%. Komposisi kimia limbah pertanian maupun limbah kayu tergantung pada spesies tanaman, umur tanaman, kondisi lingkungan tempat tumbuh dan langkah pemrosesan. Kandungan jerami dapat dilihat pada Tabel 3. Abu silika adalah kristalin yang halus dimana komposisi silika yang lebih banyak dihasilkan dari tanur tinggi.

**Tabel 3.** Kandungan jerami padi (Karimi, 2006)

Komponen	Kandungan (%)
Hemiselulosa	27,5
Selulosa	39,1
Lignin	12,5
Abu	11,5

#### 4. Alkalin aktivator

Penggunaan alkaline aktivator dalam pembuatan geopolimer baik pada geopolymer mortar maupun geopolymer beton memiliki peranan yang sangat penting sebagai salah satu bahan pengikat unsur aluminium dan unsur silikat yang terkandung dalam abu terbang sehingga terbentuk suatu ikatan polimerisasi dan mempercepat reaksi yang terjadi antara abu terbang dan unsur-unsur tersebut.

Sodium silikat dan sodium hidroksida digunakan sebagai alkalin aktivator (Hardjito *et al.*, 2004). Sodium silikat dapat berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi yang terjadi pada beton geopolimer, sedangkan sodium hidroksida berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam abu terbang sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat.

##### a. Sodium silikat

Sodium silikat merupakan salah satu bahan tertua dan paling aman yang sering digunakan dalam industri kimia, hal ini dikarenakan proses produksi yang lebih sederhana, maka sejak tahun 1818 sodium silikat berkembang dengan cepat. Sodium silikat dapat dibuat dengan 2 proses yaitu proses kering dan proses basah. Pada proses kering, pasir ( $\text{SiO}_2$ ) dicampur dengan *sodium carbonate* ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) atau dengan *pottasium carbonate* ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) pada temperatur 1100 - 1200°C. Hasil reaksi tersebut menghasilkan kaca (*cullets*) yang dilarutkan kedalam air dengan tekanan tinggi menjadi cairan yang bening dan agak kental. Sedangkan pada

proses pembuatan basah, pasir ( $\text{SiO}_2$ ) dicampur dengan sodium hidroxide ( $\text{NaOH}$ ) melalui proses filtrasi akan menghasilkan sodium silikat yang murni (Rangan, 2008). Sodium silikat terdapat dalam dua bentuk, yaitu berupa padat dan larutan. Untuk campuran beton lebih banyak digunakan dengan bentuk larutan. Sodium silikat atau yang lebih dikenal dengan nama *water glass*, pada mulanya digunakan sebagai campuran dalam pembuatan sabun. Tetapi dalam perkembangannya sodium silikat dapat digunakan untuk berbagai macam keperluan, antara lain untuk bahan campuran semen, pengikat keramik, coating, campuran cat serta dalam beberapa keperluan industri, seperti kertas, tekstil dan serat. Beberapa penelitian telah membuktikan bahwa sodium silikat dapat digunakan untuk bahan campuran dalam beton (Wallah & Rangan, 2006). Dalam penelitian ini sodium silikat digunakan sebagai salah satu *alkaline activator*. Sodium silikat ini merupakan salah satu larutan alkali yang memainkan peranan penting dalam proses polimerisasi. Hal ini disebabkan karena sodium silikat mempunyai fungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi. Reaksi terjadi secara lebih cepat pada larutan alkali yang banyak mengandung larutan hidroksida.

#### **b. Natrium Hidroksida ( $\text{NaOH}$ )**

Natrium hidroksida ( $\text{NaOH}$ ), juga dikenal sebagai soda kaustik atau sodium hidroksida adalah sejenis basa logam kaustik. Natrium Hidroksida terbentuk dari oksida basa natrium oksida dilarutkan dalam air. Natrium hidroksida membentuk larutan alkalin yang kuat ketika dilarutkan ke dalam

air. NaOH digunakan di berbagai macam bidang industri, kebanyakan digunakan sebagai basa dalam proses produksi bubur kayu dan kertas, tekstil, air minum, sabun dan deterjen. Natrium hidroksida adalah basa yang paling umum digunakan dalam laboratorium kimia). Natrium hidroksida murni berbentuk putih padat dan tersedia dalam bentuk pelet, serpihan, butiran ataupun larutan jenuh 50%. Ia bersifat lembab cair dan secara spontan menyerap karbon dioksida dari udara bebas. Ia sangat larut dalam air dan akan melepaskan panas ketika dilarutkan, ia juga larut dalam etanol dan metanol. Larutan natrium hidroksida akan meninggalkan noda kuning pada kain dan kertas. Dalam Geopolimer sodium hidroksida berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam abu terbang sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat dan dapat mengikat dengan baik.

### **c. Kalium Hidroksida (KOH)**

Kalium hidroksida (KOH) berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung di dalam abu terbang sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat. Kalium hidroksida yang tersedia umumnya berupa serpihan dengan kadar 98%. Sebagai aktivator, kalium hidroksida harus dilarutkan terlebih dahulu dengan air berdasarkan molaritas yang diinginkan. Dalam perhitungan molaritas KOH, perlu diketahui massa molekul relatifnya (Mr). Nilai Mr diperoleh dari massa atom relatif (Ar) penyusun KOH. Dimana Ar K = 39, O = 16 dan H = 1 sehingga Mr dari KOH adalah 56.

#### d. Molaritas

Molaritas atau kemolaran merupakan satuan kepekatan atau konsentrasi dari suatu larutan. Molaritas didefinisikan sebagai banyaknya mol zat terlarut dalam satu liter larutan. Konsentrasi larutan biasanya dinyatakan dalam konsentrasi molarnya. Konsentrasi molar larutan didefinisikan sebagai "rasio jumlah dalam mol zat terlarut dengan volume larutan." Konsentrasi molar dinyatakan sebagai "c". Simbol [c] dibaca sebagai "konsentrasi". Jadi konsentrasi molar dinyatakan sebagai [c]. Lebih tepatnya konsentrasi molar dinyatakan sebagai  $[c_m]$ .

#### e. Konsentrasi Molar

Konsentrasi adalah jumlah zat terlarut yang hadir terhadap jumlah pelarut tertentu atau terhadap jumlah larutan tertentu. (Dalam hal ini kita mengasumsikan zat terlarut berwujud cair atau padat, sedangkan pelarutnya berwujud cair) Konsentrasi dapat diungkapkan dengan beragam cara, salah satunya yang paling sering dipakai, dan memang akan kita gunakan sekarang ini adalah Molaritas (M), atau konsentrasi molar. Molaritas adalah jumlah mol terlarut setiap liter larutan. Atau biasa diungkapkan dengan rumus : Molaritas = Jumlah mol terlarut/volume larutan dalam air. Rumus molaritas dapat dilihat pada persamaan 2, persamaan 3 dan persamaan 4.

$$\text{Molaritas} = \frac{\text{Jumlah mol terlarut}}{\text{Volume larutan dalam air}} \dots\dots\dots(2)$$

jika yang diketahui bukan mol melainkan gram zat terlarut, rumus bisa juga dengan :

$$M = \frac{\text{gram (terlarut)}}{Mr} \times \frac{1000}{\text{mL (larutan)}} \dots\dots\dots(3)$$

jika yang diketahui massa jenis larutan dan kadar/persen massa (%), maka molaritas dapat dicari dengan rumus :

$$M = \frac{\text{mol zat terlarut}}{\text{volume}} = \frac{\text{gram} \cdot 1000}{Mr \cdot \text{Volume}} = \frac{\% \cdot \rho \cdot 10}{\text{Volume}} \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan :

M = Molaritas (konsentrasi)

Mr = Massa Molekul Relatif

$\rho$  = Massa jenis

Penelitian menunjukkan alkali aktivator berupa *sodium silicate* ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) atau *sodium silicate* dengan *sodium hydroxide* ( $\text{NaOH}$ ) memberikan kekuatan yang baik pada abu terbang geopolimer. Campuran antara  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dan  $\text{NaOH}$  digunakan pada penelitian ini karena telah sering digunakan oleh para peneliti sebelumnya dan memberikan hasil yang memuaskan. Untuk benda uji abu terbang geopolimer, menurut beberapa peneliti konsentrasi aktivator yang digunakan (terhadap molaritas  $\text{NaOH}$ ) merupakan parameter utama dan parameter yang sangat penting pada pembuatan beton geopolimer berbahan tanah laterit,

abu jerami dan abu terbang (Hardjito & Rangan, 2005; Weng & Sagoe-Crentsil, 2007).

## **5. Air**

Air diperlukan untuk pembuatan beton agar terjadi proses kimiawi dengan semen untuk membasahi agregat dan untuk melumas campuran agar mudah saat proses pengerjaan atau biasa dikenal dengan *workability*. Selain itu, air merupakan bahan utama selain dari agregat yang digunakan untuk membuat beton. Pada umumnya air minum dapat dipakai untuk campuran beton maupun mortar. Air yang mengandung senyawa-senyawa yang berbahaya, yang tercemar garam, minyak, gula, atau bahan-bahan kimia lain, bila dipakai untuk campuran beton akan sangat menurunkan kekuatannya dan juga dapat mengubah sifat-sifat dari semen. Selain itu, air yang demikian dapat mengurangi afinitas antara agregat dengan pasta semen dan mungkin pula mempengaruhi kemudahan pada saat proses pengerjaan yang dilakukan. Hal ini disebabkan karena karakteristik pasta semen merupakan hasil reaksi kimiawi antara semen dengan air, maka bukan perbandingan jumlah air terhadap total (semen+ agregat halus + agregat kasar) material yang menentukan, melainkan hanya perbandingan antara air dan semen atau biasa dikenal dengan faktor air semen (FAS) pada campuran yang menentukan. Air yang berlebihan akan menyebabkan banyaknya gelembung air setelah proses hidrasi selesai, sedangkan air yang terlalu sedikit akan menyebabkan proses hidrasi tidak seluruhnya selesai.

Sebagai akibatnya beton yang dihasilkan akan kurang kekuatannya (Nawy, 2010; Neville & Brooks, 1981).

#### D. Konsistensi Flow

Pengujian konsistensi *flow* bertujuan untuk menentukan jumlah air yang optimum agar menghasilkan mortar yang mudah dikerjakan. Jumlah air yang digunakan untuk campuran mortar sangat erat hubungannya dengan workability. Kelacakan atau workability adalah kemudahan suatu campuran untuk dikerjakan.

Uji kelacakan mortar dilakukan dengan alat meja leleh dan cincin leleh sesuai dengan SNI 03-6825-2002. Adukan mortar dimasukkan ke dalam cincin leleh (diameter bawah 100 mm, diameter atas 70 mm dan tinggi 50 mm) yang ditaruh di atas meja leleh (diameter 300 mm dan tebal 20 mm). Semakin besar nilai sebar berarti semakin encer adukan mortarnya. Untuk penentuan konsistensi *flow* adukan digunakan rumus yang ditunjukkan pada persamaan 5.

$$K = \frac{D_i}{D_0} \times 100 \% \dots\dots\dots(5)$$

Dimana :

K = Konsistensi *flow* adukan (%)

Di = Diameter adukan setelah *troun conique* diangkat (cm)

D<sub>0</sub> = Diameter dalam *troun conique* (cm)

### E. Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton merupakan kekuatan tekan maksimum yang dapat dipikul beton per satuan luas. Kuat tekan beton normal yaitu berkisar antara 20 sampai dengan 40 MPa. Kuat tekan beton dipengaruhi oleh :  $w/c$  (*water cement ratio*) atau biasa dikenal dengan faktor air semen, sifat dan jenis agregat, jenis campuran, kelecakan (*workability*), perawatan (*curing*) beton dan umur beton. Kuat tekan beton mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya umur beton. Kuat tekan beton dianggap mencapai 100 % setelah berumur 28 hari. Berdasarkan SNI 03:6825:2002, kuat tekan beton dihitung dengan membagi kuat tekan maksimum yang diterima benda uji selama pegujian dengan luas penampang melintang. Kuat tekan beton dapat ditulis dengan persamaan 6 yaitu :

$$f'c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(6)$$

Dimana :

$f'c$  = kuat tekan beton ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

P = Beban maksimum (kg)

A = Luas penampang yang menerima beban ( $\text{cm}^2$ )

### F. Perilaku Tegangan-Regangan Beton

Tegangan merupakan perbandingan antara gaya yang bekerja pada beton dengan luas penampang beton. Regangan adalah perbandingan antara pertambahan panjang ( $\Delta L$ ) terhadap panjang mula-mula (L)

regangan dinotasikan dengan  $\varepsilon$  dan tidak mempunyai satuan. Regangan yang terjadi pada beton dinyatakan dalam persamaan 7.

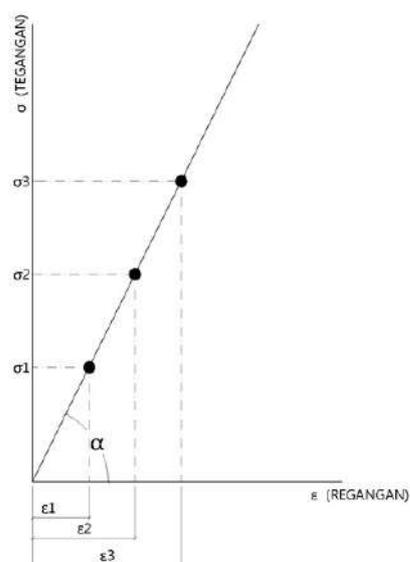
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \dots\dots\dots(7)$$

Dimana :

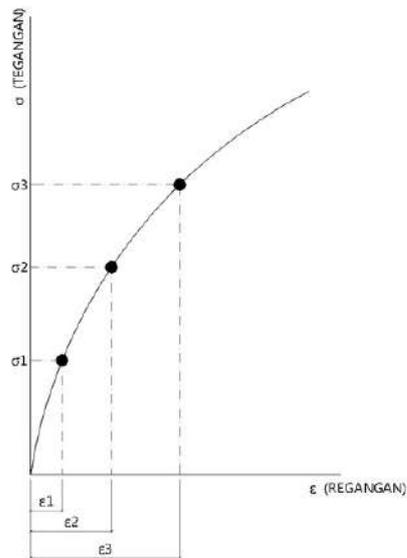
$\Delta L$  = perubahan panjang

$L$  = panjang awal

Jika hubungan tegangan dan regangan dibuat dalam bentuk grafik dimana setiap nilai tegangan dan regangan yang terjadi dipetakan kedalamnya dalam bentuk titik-titik, maka titik-titik tersebut terletak dalam suatu garis lurus sehingga terdapat kesebandingan antara hubungan tegangan dan regangan. Gambar 4 memperlihatkan hubungan tegangan dan regangan linear.



**Gambar 4.** Hubungan tegangan dan regangan linear



**Gambar 5.** Hubungan tegangan regangan non linear

Hubungan tegangan–regangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4 adalah hubungan yang linear, dimana regangan berbanding lurus dengan tegangannya. Hukum Hooke berlaku dalam keadaan ini. Akan tetapi dalam kondisi yang sebenarnya, tegangan tidak selalu berbanding lurus dengan regangan, hubungan tersebut apabila dipetakan dalam bentuk titik-titik, maka akan berbentuk seperti pada Gambar 5.

### G. Hasil Studi Empirik Penelitian Terdahulu

**Aliabdo et al (2016)** mengungkapkan bahwa pada umumnya penambahan semen memperbaiki sifat geopolimer berbasis abu terbang kecuali workability. Kenaikan kadar abu terbang meningkatkan sifat beton geopolimer. Sifat beton geopolimer secara signifikan dipengaruhi oleh waktu dan suhu perawatan.

**Chindaprasirt & Chalee (2014)** mendapatkan bahwa selama paparan 3 tahun di air laut, beton geopolimer berbasis abu terbang dengan konsentrasi NaOH tinggi terus mendapatkan kekuatan lebih cepat daripada NaOH yang berkonsentrasi rendah. Konsentrasi NaOH yang lebih tinggi pada beton geopolimer berbasis abu terbang menghasilkan penurunan baik secara bebas maupun jumlah masuknya klorida dalam beton geopolimer. Kenaikan konsentrasi NaOH pada beton geopolimer mengakibatkan penurunan koefisien difusi klorida (DC) dan korosi baja pada beton geopolimer. Peningkatan konsentrasi NaOH pada beton geopolimer menghasilkan penurunan persentase kapasitas pengikatan klorida dibandingkan dengan kandungan total klorida.

**Ali et al (2016)** meneliti pengaruh paparan api hidrokarbon terhadap sifat kuat tekan beton geopolimer panel dan silinder. Material yang digunakan yaitu FA, pasir dengan penyerapan 0,3 %, agregat kasar, (basalt, dengan diameter maksimum 14 mm). Pasir dan agregat kasar dalam keadaan SSD. Larutan NaOH sebesar 8 M, sodium silika ( $\text{SiO}_2 : \text{Na}_2\text{O} = 2$ ). Hasil penelitian menunjukkan bahwa tidak ada spalling atau segregasi yang signifikan pada spesimen dan massa yang hilang selama proses pemanasan yaitu masing-masing antara 2,70 dan 4,65 yang disebabkan karena hilangnya kelembaban. Gradient diferensial rendah dan ketidakcocokan termal antara pasta geopolimer dan agregat memberikan beton geopolimer ketahanan spalling lebih baik daripada semen Portland biasa.

**Un et al (2015)** menunjukkan bahwa beton geopolimer bisa mencapai kekuatan yang cukup untuk desain struktural, namun kuat tekan dan kekuatan tarik lenturnya dipengaruhi oleh metode curing, yang menyebabkan penyusutan pada permukaan beton geopolimer. Penyelidikan menyimpulkan bahwa AEMM dapat digunakan untuk perhitungan defleksi jangka panjang untuk balok beton geopolimer dengan modifikasi parameter yang kecil. Kuat tekan ( $f_c$ ) beton geopolimer pada umur 28 hari adalah 46,7 MPa, kuat tekan pada 7 dan 14 hari masing-masing 91% dan 92% dari  $f_c$ .

**Mehta & Siddique (2017)** meneliti ketahanan beton geopolimer berbasis FA yang dicampur dengan tambahan kalsium. Ketahanan terhadap asam sulfat diperiksa pada umur 28, 90, dan 365 hari. Material yang digunakan yaitu FA dengan berat jenis 2,36, semen, perbandingan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  adalah sebesar 2,5, konsentrasi NaOH 10 M, pecahan batu dengan diameter maksimum 12,5 mm, berat jenis 2,75 dan penyerapan air 1% sebagai agregat kasar. Pasir sungai dengan modulus kehalusan 2,51 dan berat jenis 2,54 serta penyerapan air 0,2% sebagai agregat halus.

**Posi et al (2015)** mendapatkan bahwa kuat tekan menurun dengan meningkatnya rasio larutan alkali aktivator/FA dan volume material daur ulang yaitu memiliki efek yang cair dan porositas sehingga memiliki nilai kuat tekan yang rendah. Rasio optimum natrium silika/NaOH = 1 dengan kuat tekan 6,6 MPa. Konsentrasi optimum NaOH adalah 10 M dan

temperatur perawatan yang digunakan dengan kuat tekan maksimum adalah 40°C.

**Ryu et al (2013)** memperoleh bahwa konsentrasi NaOH yang digunakan sebagai larutan alkali aktivator dapat meningkatkan nilai kuat tekan. Perbandingan NaOH : Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> yang digunakan yaitu 1:1 menunjukkan aktivasi geopolimer terhadap FA dan memungkinkan tercapainya kuat tekan hingga 47 MPa. Nilai ini lebih tinggi dari 40 MPa yang diketahui sebagai kriteria kuat tekan beton dan membuktikan potensi abu terbang (FA) sebagai pengganti semen.

**Khan et al (2016)** mengevaluasi kinerja terak baja terapung (SFS) agregat kasar pada campuran terak dan abu terbang rendah kalsium beton geopolimer (GPC). Material yang digunakan yaitu abu terbang kelas F, bahan pengikat geopolimer yang terdiri dari 90% abu terbang rendah kalsium dan 10% GGBFS. NaOH : Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> = 1:2,5. Pasir Sydney dengan berat jenis 2,65 dan penyerapan air 3,5%. Batuan basalt dengan ukuran 10 mm dengan berat jenis 2,8 dan penyerapan air 1,6%. Dicuring selama 18 jam pada suhu 75°C. Hal tersebut menunjukkan kompatibilitas yang lebih baik antara agregat SFS dan GPC dibandingkan dengan menggunakan bahan pengikat OPC.

**Bakharev (2006)** memperoleh nilai stabilitas termal bahan geopolimer yang diteliti agak rendah. Pada sampel yang dibuat menggunakan sodium sebagai aktivator menunjukkan kemerosotan kekuatan yang cepat pada suhu 800°C. pada material yang dibuat

menggunakan FA dan potassium silikat kuat tekan meningkat secara signifikan pada proses pemanasan, tapi mulai mengalami penurunan kekuatan pada suhu 1000°C. Pematatan pada 1-10 MPa mengurangi penyusutan pada pembakaran di semua bahan. Bahan geopolimer yang dibuat menggunakan FA kelas F dan aktivator alkalin menunjukkan susut tinggi serta perubahan besar pada kuat tekan. Dengan meningkatnya suhu pada kisaran 800-1200°C. Dengan demikian bahan tersebut ditemukan tidak sesuai untuk aplikasi insulasi tahan api.

**Mehta & Siddique (2016)** menyajikan sifat beton geopolimer berbasis FA rendah kalsium dimana abu terbangnya sebagian diganti (0, 10, 20, dan 30%) dengan semen portland biasa (OPC). Pengujian dilakukan untuk kemampuan kerja, kuat tekan, kuat tarik dan permeabilitas klorida (RCPT) sampai 28 hari. Material yang digunakan yaitu abu terbang, pasir sungai dengan modulus kehalusan 2,56 dan agregat kasar dengan diameter 12,5 mm, NaOH 10 M serta Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. Dicuring selama 80° selama 24 jam.

Dari hasil pengujian diperoleh nilai kuat tekan umur 28 hari dari 100% geopolimer, 90% beton geopolimer, 80% beton geopolimer, dan 70% beton geopolimer masing-masing yaitu 44,73, 54,76, 64,46 dan 61,74 MPa. Pengujian kuat tarik umur 28 hari diperoleh 100% geopolimer, 90% beton geopolimer, 80% beton geopolimer, dan 70% beton geopolimer masing-masing yaitu 4,52, 4,61, 5,08, dan 4,44 MPa.

**Badar et al (2014)** menunjukkan bahwa beton geopolimer yang dibuat dengan abu terbang yang memiliki kandungan kalsium lebih rendah sesuai untuk produksi beton tahan lama untuk aplikasi struktural yang terpapar karbonasi. lingkungan karena sifat bahan ini tampaknya mengurangi risiko penguat korosi yang disebabkan karbonasi dalam beton.

**Albitar et al (2015)** menunjukkan bahwa sifat mekanik beton geopolimer berbasis abu terbang/slag serupa dengan beton geopolimer berbasis abu terbang, sementara penyusutan beton beton geopolimer yang mengandung volume tinggi slag lebih rendah dari pada abu terbang berbasis beton geopolimer.

**Babae & Castel (2016)** menunjukkan kinerja elektrokimia yang sebanding dengan kekuatan PCC yang sama selama fase propagasi korosi. Selain itu, beberapa klasifikasi konvensional yang umum digunakan untuk menilai tingkat keparahan korosi pada sistem korosi berbasis semen Portland mungkin memerlukan beberapa kalibrasi ulang yang akan digunakan untuk kalsium rendah. sistem korosi berbasis abu terbang.

**Islam et al (2015)** mengembangkan beton geopolimer ringan dengan menggunakan POFA (*Palm Oil Fuel Ash*) dan GGBS (*Ground Granulated blast-furnace slag*) sebagai pengikat dengan OPS (*Oil Palm Shell*) sebagai agregat kasar. Pengaruh agregat yang berbeda, seperti pasir penambangan (NS), pasir produksi (MS) dan kuarsa debu (QD) juga

diselidiki dan dilaporkan dengan cara menjaga parameter lainnya, seperti isi air dan aktivator, konstan. Konsentrasi NaOH yang digunakan yaitu 12 M, dengan perbandingan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2,5$  tetap dijaga konstan. Hasil yang diperoleh menunjukkan penggunaan konten pengikat dari  $425 \text{ kg/m}^3$  dengan beton ringan berbasis OPS menghasilkan kuat tekan tertinggi 33 MPa, beton geopolimer OPS memiliki jejak karbon kurang dari 50-60% dibandingkan beton konvensional.

**Maranan et al (2016)** meneliti perilaku kompresi dari kolom beton geopolimer longitudinal dan transversal yang diperkuat dengan GFRP bar. Enam kolom pendek skala penuh ( $L/r=8$ ) yang dicor: satu kolom tanpa tulangan melintang, tiga kolom dengan *circular hoops* jarak 50 mm, 100 mm dan 200 mm pada pusatnya: dua kolom dengan spiral berjarak 50 mm dan 100 mm pada pusat. Selain itu dua kolom ramping ( $L/r=16$ ) diperkuat secara melintang lingkaran dan spiral yang keduanya berjarak 100 mm pada bagian tengah. Berdasarkan hasil eksperimen, bar GFRP memberikan kontribusi rata-rata 7,6% terhadap keseluruhan kapasitas kolom yang diuji. Lingkaran dan kolom ramping spiral terbatas pada beban masing-masing sebesar 66% dan 82% dari kekuatan kolom pendek rekan mereka. Terlepas dari tie configuration, kolom dengan rasio volumetrik lebih tinggi menunjukkan perilaku kompresi yang lebih baik dibandingkan dengan rasio volumetrik yang lebih rendah. Daktilitas dan efisiensi Penyempitan kolom spiral terbatas lebih tinggi daripada rekannya kolom yang dibatasi lingkaran, Kolom yang diuji menghasilkan kinerja kompresi yang relatif

superior dibandingkan dengan kolom beton berbasis OPC yang diperkuat dengan batang dan ikatan GFRP. Penelitian lebih lanjut berhubungan dengan batas perilaku dan kelangsingan di kolom ramping beton geopolimer GFRP diperkuat direkomendasikan untuk meningkatkan serapannya pada industri konstruksi.

**Park et al (2016)** menyajikan analisis varians (ANOVA) menunjukkan bahwa agregat halus dapat diganti dengan volume karet remah yang sama, sampai 5% pada tiga jenis beton geopolimer berbasis abu terbang pada tingkat kepercayaan 95%. Model regresi menunjukkan bahwa korelasi antara penggantian karet dan parameter lainnya secara statistic tidak penting.

**Petrillo et al (2016)** menjelaskan penggunaan limbah konstruksi dan bahan buangan untuk pembuatan paving blok akan membahas isu-isu berkelanjutan seperti konservasi sumber daya dan konservasi produk sampingan ke produk yang bermanfaat dan berharga. Sebagai titik kedua, jelas bahwa aktivator alkali menyebabkan persediaan CO<sub>2</sub> yang tinggi karena proses produksinya melibatkan kalsinasi karbonat. Oleh karena itu, jejak CO<sub>2</sub> dari blok beton geopolimer adalah tergantung pada jenis, konsentrasi, dan dosis aktivator alkali. Akibatnya, ini jelas perlu dipusatkan penelitian lebih lanjut menggunakan campuran yang dicirikan oleh solusi dan rasio prekursor yang berbeda dan akibatnya dianalisis demi menganalisis dampak lingkungannya.

**Sarker & Mcbeath (2015)** melakukan investigasi ketahanan api beton geopolimer. Geopolimer dan panel beton OPC dengan tebal 125-175 mm mengandung lapisan jaring baja yang terkena api selama 2 jam. Hasil uji menunjukkan kecepatan perpindahan panas yang lebih tinggi dan kurang retak dan spalling pada spesimen beton geopolimer. Kapasitas beban sisa adalah antara 61% dan 71% untuk geopolimer dan antara 50% dan 53% untuk panel beton OPC. Dengan demikian, elemen beton geopolimer yang diperkuat menunjukkan daya tahan api yang superior dari pada OPC.

**Singh et al 2016)** menyimpulkan bahwa beton geopolimer abu terbang/slag dapat diproduksi secara memuaskan di ruangan suhu dengan kekuatan tekan yang diinginkan sama dengan beton OPC.

**Gunasekara et al (2016)** menentukan potensi penerapan beton geopolimer dalam industri konstruksi adalah daya tahan jangka panjang dari material yang digunakan. Untuk mengetahui karakteristik durabilitas dilakukan penyelidikan mendetail terhadap sifat permeasi dari empat beton geopolimer abu terbang yang berbeda dilakukan sampai usia satu tahun. Material yang digunakan yaitu abu terbang kelas F, NaOH 15 M, pasir dengan berat jenis adalah sebesar 2,5 dan modulus kehalusasan adalah sebesar 3,0. Perbaikan pada sifat daya tahan diamati untuk semua beton geopolimer dengan waktu. Hal ini disebabkan adanya geopolimerisasi yang terjadi dan yang terus berlanjut sehingga mengakibatkan pada pembentukan gel yang berlanjut yang menyebabkan

produk menjadi lebih memiliki mikrostruktur padat dengan pengurangan terkait meso-pori dan pori-pori makro. Kepadatan benda uji ditambah, dengan distribusi ukuran pori, diamati untuk menentukan permeasi dan difusi karakteristik beton. Peningkatan meso-pori menunjukkan peningkatan gel pada matriks dan pada gilirannya hal ini mempengaruhi peningkatan penyerapan air. Di sisi lain, jumlah yang tinggi pori-pori makro menyebabkan peningkatan permeabilitas air dan permeabilitas beton geopolimer. Besar jumlah partikel kasar pada abu terbang menghasilkan distribusi gel yang tidak merata yang mengurangi Kemampuan pengisian pori-pori, sementara kehadiran sejumlah besar CaO diamati berkontribusi pada struktur mikro padat. Khususnya koefisien difusi klorida awal serupa dengan yang diamati pada Portland dan campuran beton yang juga menurun seiring dengan bertambahnya usia atau umur pada beton dengan cara yang sama yang dilakukan.

#### **H. Pengujian Tingkat Penyerapan (*Sorptivity*)**

Pengujian tingkat penyerapan (*sorptivity*) dilakukan pada benda uji umur 28 hari dengan konsentrasi molaritas yaitu 12 M. Pengujian *sorptivity* menggunakan metode GHD (*Determination of Sorptivity*). Benda uji dioven terlebih dahulu pada suhu 105°C hingga berat yang terjadi yaitu konstan. Kemudian benda uji diletakkan di atas dua penyangga dalam wadah yang berisi air dengan ketinggian air sebesar 1 - 2 mm dari bawah permukaan benda uji. Berat benda uji ditimbang pada menit tertentu sesuai standar

yang digunakan. Gambar 6 memperlihatkan pengujian sorptivity. Nilai *sorptivity* dapat ditentukan berdasarkan garis regresi linier dari grafik hubungan antara jumlah air yang diserap persatuan luas permukaan ( $I$ ) dengan akar dari waktu hisap ( $t$ ).

$$I = St^{0.5} \dots\dots\dots(8)$$

Dimana:

$I$  = Jumlah air persatuan luas (g/mm)

$S$  = *Sorptivity* (mm/mm<sup>0.5</sup>)

$t^{0.5}$  = Akar waktu hisap (menit)



**Gambar 6.** Pengujian *sorptivity*

Berdasarkan persamaan garis regresi linear diperoleh nilai *sorptivity* dengan kriteria seperti diperlihatkan pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Kriteria nilai *sorptivity* (ASTM C1585-04)

Nilai <i>sorptivity</i> (S)	Keterangan
$> 0,2 \text{ mm/mm}^{0,5}$	Tidak baik
$0,1 - 0,2 \text{ mm/mm}^{0,5}$	Diterima
$< 0,2 \text{ mm/mm}^{0,5}$	Sangat baik

### I. Difraksi Sinar- X

Sinar x ditemukan pada tahun 1895 oleh fisikawan Jerman bernama Roentgen dan dinamakan 'x' disebabkan pada masa itu belum di ketahui penamaan yang cocok untuk sinar ini. Sinar-x ditemui pada panjang gelombang 10 nm sampai 100 pikometer, kondisi monokromatik untuk ( $\lambda = 1 \text{ \AA}$ ) dapat dimanfaatkan sebagai sumber difraksi material sehingga diperoleh sifat dan jenis zat sesuai dengan pola difraksi yang diperoleh dari interaksi bahan dengan sinar x. Ada dua fakta geometrical yang perlu diingat dalam proses difraksi yakni :

- a) Peristiwa penyinaran, normal ke bidang pemantul dan sinar yang terdifraksi selalu koplanar.
- b) Sudut antara sinar yang didifraksi dan sinar yang ditransmisikan selalu beda  $2\theta$ . Ini dikenal sebagai difraksi sudut, dan sudut yang dimaksud itu bukanlah  $\theta$ , yang diperoleh dari eksperimental (Ribeiro, 2004).

Hukum Bragg menyatakan bahwa peristiwa difraksi hanya dapat terjadi jika memenuhi persamaan 9.

$$n \lambda = 2 d \sin \theta \dots\dots\dots(9)$$

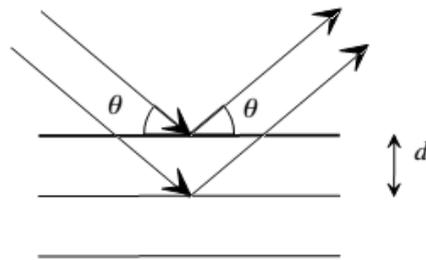
Keterangan :

$n$  : Bilangan bulat positif

$\lambda$  : Panjang gelombang dari X-Ray tergantung bahan yang digunakan  
 $d$  adalah jarak antara bidang kisi

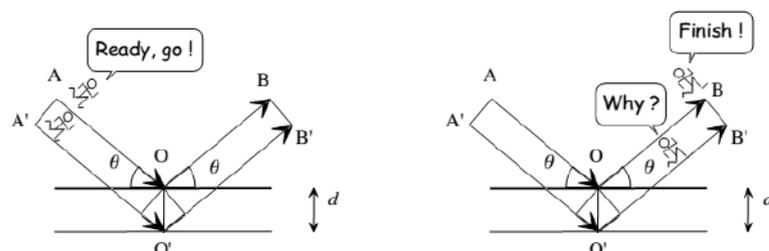
$\theta$  : Besar sudut dari arah radiasi sinar x

Ilustrasi dari kejadian difraksi bisa dilihat dan di pahami dari Gambar 7, Gambar 8 dan Gambar 9.



**Gambar 7.** Ilustrasi asal Hukum Bragg (Mote *et al.*, 2012)

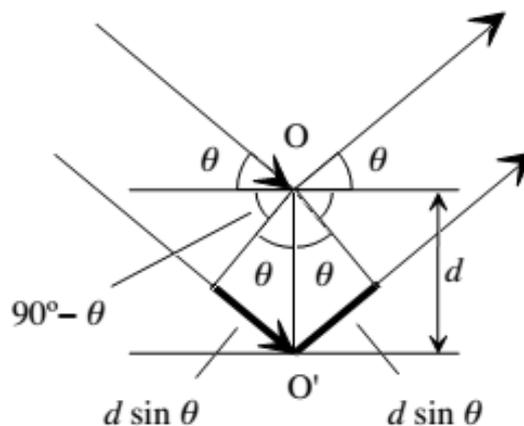
Perlu diperhatikan perbedaan garis jarak pada ilustrasi diatas yang dimana poin penting dari hukum Bragg adalah dapat di jelaskan dengan interferensi konstruktif. Ilustrasi perbedaan garis jarak akan memudahkan kita untuk memahami hukum Bragg.



**Gambar 8.** Perbedaan perjalanan gelombang ketika merambat dari A'O'B' dengan perjalanan gelombang jika merambat AOB (Mote *et al.*, 2012)

Panjang satu segment (digaris tebal) harus senilai dengan  $d \sin \theta$ , karena bagian ini berlainan sisi dengan simpangan sudut. Lebih tepatnya sisi bagian kiri dan kanan pada perbedaan panjang gelombang dijumlahkan sehingga setara dengan  $d$ .

Akan digambarkan kembali perbedaan garis jarak dengan menebalkan bagian tersebut.

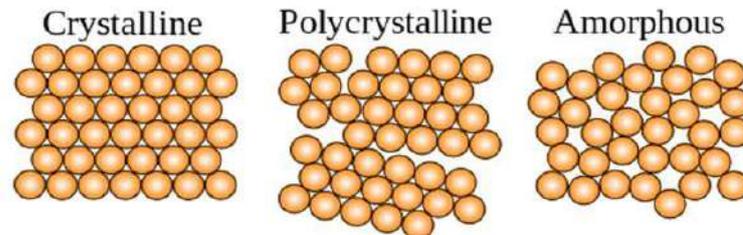


**Gambar 9.** Hubungan antara garis jarak,  $d$  dan  $\theta$  (Mote *et al.*, 2012)

### Struktur Kristal

Pengetahuan mengenai kristal ideal ditentukan oleh susunan satuan satuan struktur yang identik (hampir sama) secara berulang – ulang dengan jumlah yang tak hingga (sulit dihitung) dalam ruang. Kumpulan yang berupa atom atau molekul dan sel ini terpisah sejauh  $1 \text{ \AA}$  atau  $2 \text{ \AA}$ . Semua struktur kristal dapat digambarkan dengan istilah basis dan *lattice* (kisi), sebaliknya zat padat yang tidak memiliki keteraturan satuan struktur identik dalam ruang disebut amorf. Gambar 10 memperlihatkan ilustrasi

perbedaan keteraturan susunan atom untuk partikel padatan kristalin, polikristalin dan amorf.



**Gambar 10.** Ilustrasi perbedaan keteraturan susunan atom untuk partikel padatan kristalin, polikristalin dan amorf (Zak *et al.*, 2013)

Mengenal Kristal menurut "*Elementary X-Ray diffraction*" tahun 1956, secara skala nano adalah langkah wajib yang harus dilakukan para peneliti bidang material, agar nantinya tidak mengalami hambatan dalam melakukan interpretasi data serta untuk penyajian hasil pengolahan data. Struktur kristal dalam istilah mineralogi dan kristalografi merupakan susunan-susunan atom yang khas dan bersistem secara periodik berdimensi tiga. Struktur kristal yang ideal disusun secara rapi oleh unit sel dengan jumlah tertentu. Unit sel dipisahkan oleh kisi dengan jarak tertentu, ini berarti unit sel (spatial atom) akan semakin kecil jika kisi memiliki ukuran yang kecil pula. Zat padat memiliki 2 kategori dasar jika dipandang dari sisi susunan atomnya, yakni kristal dan amorf. Amorf merupakan struktur yang tidak memiliki arah yang konsisten (tidak menentu) sehingga panjang dan sudut ikatannya tidak teratur. Penyimpangan struktural adalah hal dasar yang menyebabkan suatu

material memiliki kondisi bersifat amorf (*amorphous*). Adapun material yang memiliki susunan atom yang baik akan tetapi struktur yang terbentuk lebih dari satu, sehingga memiliki orientasi yang lebih dari satu kondisi material yang seperti ini disebut polikristal. Contoh unsur berstruktur kristal yakni S, Fe, Li, Zn, Cl dll, contoh unsur komposit (senyawa) berstruktur polikristal antara lain NaCl (garam), SiO<sub>2</sub> (quartz), pirit (FeS), gula (C<sub>2</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>) dan lain-lain, contoh padatan amorf antara lain karbon amorf adsorben dan silika gel adsorben.

#### **J. Mikrostruktur – Morfologi**

Material geopolimer dalam penelitian ini adalah campuran antara abu jerami, abu terbang dan tanah laterit yang diaktifkan menggunakan alkalin aktivator (NaOH). Sifat mekanis campuran material geopolimer tidak hanya dipengaruhi oleh fraksi volume, tetapi juga oleh bentuk dan distribusi spasial dari komponen ini. Mengevaluasi struktur internal campuran material geopolimer menggunakan persentase material yang berbeda dari datar dan memanjang dan mempelajari perubahan sifat teknik, bahan campuran material geopolimer memiliki respon mekanik yang sangat berbeda dari respon individu agregat dan bitumen (Zhanping dkk, 2008).

*Mikroskop electron* merupakan mikroskop yang menggunakan panjang gelombang berkas elektron sebagai sumber energi dan lensa elektromagnetik sebagai pengganti lensa gelas. Penggunaan *mikroskop* jenis dengan alasan kedalaman fokus yang lebih bagus dengan

*mikroskop optic. Scanning Electron Microscope (SEM)* menggunakan *modus scan* dengan memanfaatkan sejumlah *scanning coils* (Subaer, 2012).

SEM untuk analisis mikrostruktur dapat dilakukan pada benda uji yang telah dipoles maupun yang tidak dipoles seperti benda uji *fracture*. Pada benda uji yang dipoles, benda uji dipotong dengan tebal hingga 2 mm yang selanjutnya dengan menggunakan pasta intan material dipoles hingga ukuran 1  $\mu\text{m}$ . Benda uji yang telah disiapkan dilapisi dengan emas untuk imaging atau lapisan karbon untuk analisis elemental dengan EDS. (Subaer, 2012).

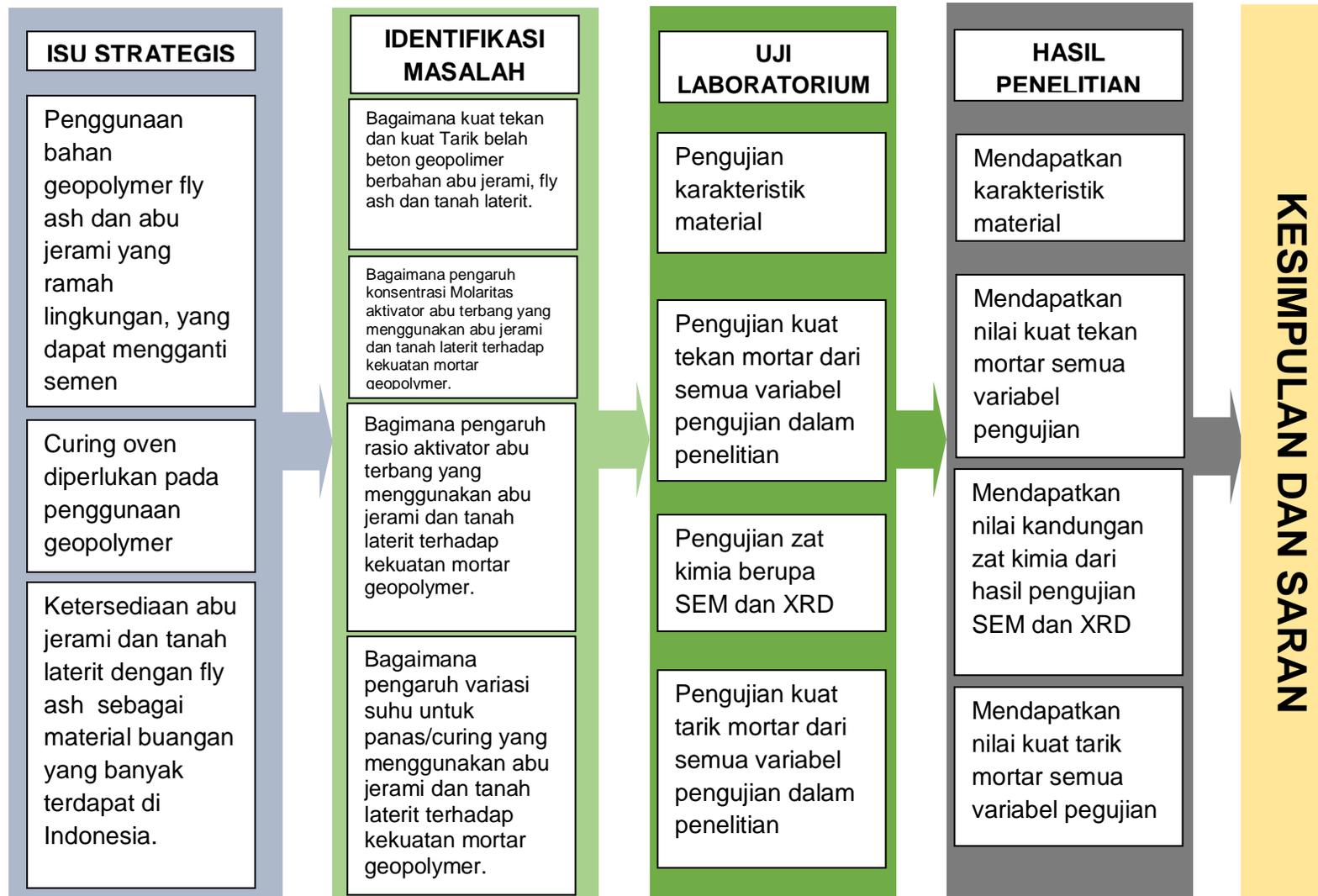
Untuk memprediksi *modulus* dinamis campuran aspal beton dapat menggunakan foto imaging dua dimensi (2D) dan tiga dimensi (3D), perbedaan Metode Elemen (DEM) yang dihasilkan dari *X-ray computed tomography (CT X-ray)* terletak pada gambarnya. Dengan metode ini dapat diketahui rongga udara dan distribusi agregat. Modulus dinamis masing-masing penyusun campuran material geopolimer dapat memprediksi modulus dinamis campuran material geopolimer (Zhanping dkk, 2008).

Pendekatan mikromekanik dapat digunakan dalam menyelidiki mekanisme rutting campuran aspal beton. *X-ray computed tomography (CT)* images merupakan metode baru dalam mengevaluasi mikro campuran material geopolimer. Dengan metode ini dapat diketahui rongga udara dan pergerakan material dalam geopolimer saat menerima beban

dinamis (Coleri dkk, 2011). Pengamatan dengan teknik mikroskopik dapat dilakukan untuk mengevaluasi bitumen pada campuran material geopolimer (Navaro dkk, 2012).

### **K. Kerangka Pikir Penelitian**

Para ahli memperkirakan bahwa jumlah emisi gas CO<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh produksi semen akan mencapai angka 3500 juta ton pada tahun 2015. Untuk mengurangi jumlah emisi gas CO<sub>2</sub>, maka penggunaan semen harus dikurangi dan dicari sumber-sumber material yang dapat menggantikan fungsi semen. Salah satunya adalah geopolimer. Material dasar pembentuk pasta geopolimer adalah pozzolan, baik dari alam maupun pozzolan buatan. Material yang bersifat pozzolan mengandung silika dan alumina dapat digunakan sebagai binder (pengikat). Diantaranya adalah fly ash, metakaolin, abu sekam atau material vulkanik (Davidovits, 2008). Pada penelitian ini digunakan abu terbang, abu jerami dan tanah laterit dengan alkalin aktivator (NaOH). Gambar 11 memperlihatkan kerangka pikir penelitian.



**Gambar 11.** Kerangka pikir penelitian