

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Umum

Pada bab ini akan dijelaskan hasil pengujian dan analisis dari hasil pengujian yang telah dilakukan. Setiap *mix design* telah diuji kuat tekan dan waktu ikatnya di Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Teknik Sipil Universitas Brawijaya. Agar lebih mudah untuk dimengerti, hasil dari pengujian agregat, kuat tekan, dan uji *setting time* untuk mengetahui pengaruh dari tiap parameter beton geopolimer berbahan dasar alkali sodium dan potasium ini akan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik.

4.2. Hasil Pengujian Material

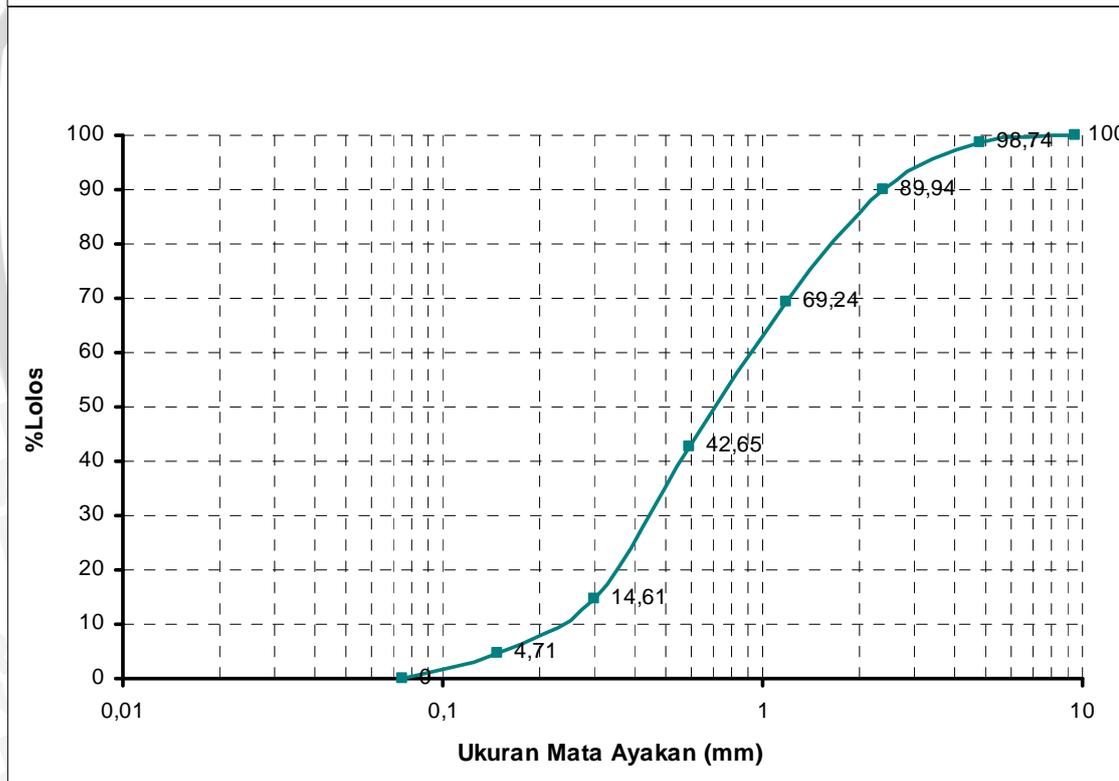
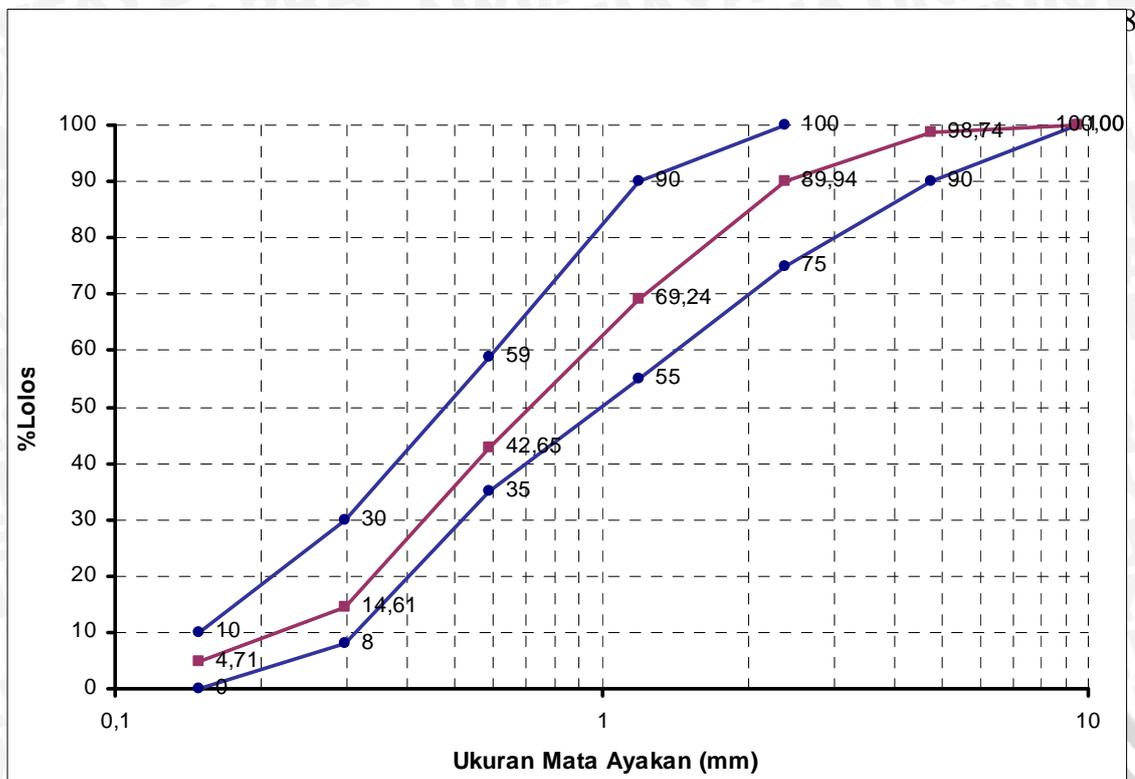
4.2.1. Pemeriksaan Gradasi Agregat Halus

Tabel 4.1. Analisis Gradasi Agregat Halus

Lubang saringan		Pasir			
		Tertinggal		Kumulatif	
no	mm	gram	%	tertinggal	lolos
3"	76,2	0	0	0	100
2,5"	63,5	0	0	0	100
2"	50,8	0	0	0	100
1,5"	38,1	0	0	0	100
1"	25,4	0	0	0	100
3/4"	19,1	0	0	0	100
1/2"	12,7	0	0	0	100
3/8"	9,5	0	0	0	100
4	4,76	12,4	1,26	1,26	98,74
8	2,38	86,8	8,81	10,06	89,94
16	1,19	204	20,70	30,76	69,24
30	0,59	262	26,58	57,35	42,65
50	0,297	276,4	28,04	85,39	14,61
100	0,149	97,6	9,90	95,29	4,71
200	0,075	46,4	4,71	100	0
Pan		14,4			
Total		1000		380,11	

$$\text{Kadar Lumpur} = \frac{14,4}{1000} \cdot 100\% = 1,44\%$$

$$\text{Modulus kehalusan} = \frac{380,11}{100} = 3,8011$$



Gambar 4.2. Grafik Gradasi Agregat Halus

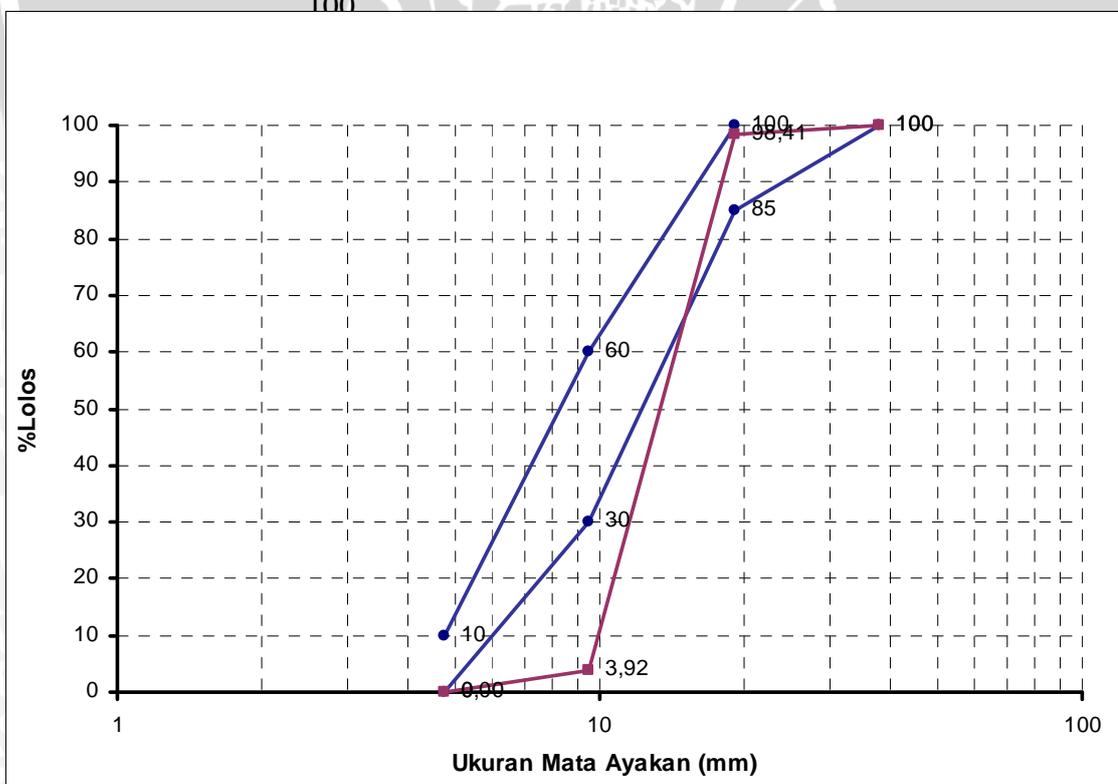
4.2.2. Pemeriksaan Gradasi Agregat Kasar

Tabel 4.2. Analisis Gradasi Agregat Kasar

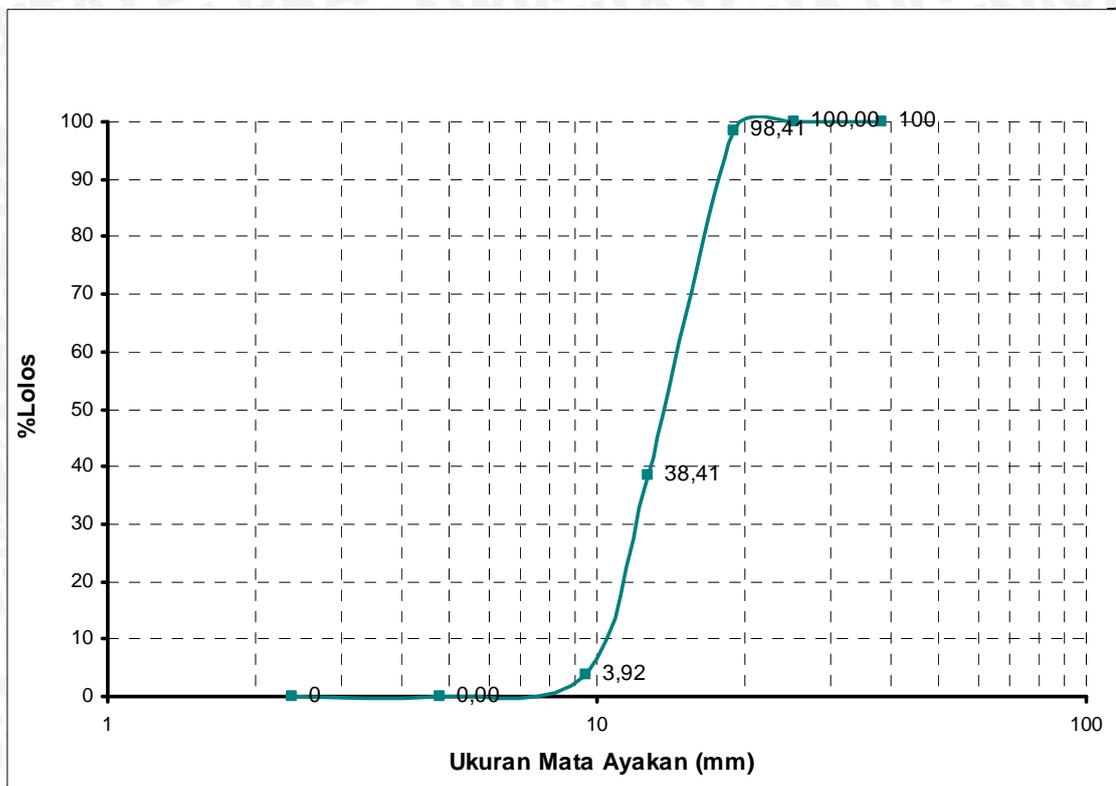
Lubang saringan		Batu Pecah			
		Tertinggal		Kumulatif	
no	mm	gram	%	tertinggal	lolos
3"	76,2	0	0	0	100
2,5"	63,5	0	0	0	100
2"	50,8	0	0	0	100
1,5"	38,1	0	0	0	100
1"	25,4	0	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,1	79,4	1,59	1,59	98,41
1/2"	12,7	2986,8	59,99	61,59	38,41
3/8"	9,5	1717,2	34,49	96,08	3,92
4	4,76	195,4	3,92	100,00	0,00
8	2,38	0	0,00	100	0
16	1,19	0	0	100	0
30	0,59	0	0	100	0
50	0,297	0	0	100	0
100	0,149	0	0	100	0
200	0,075	0	0	100	0
Pan		21,2			
Total		5000		859,26	

$$\text{Kadar Lumpur} = \frac{21,2}{5000} \cdot 100\% = 0,424\%$$

$$\text{Modulus kehalusan} = \frac{859,26}{100} = 8,5926$$



Gambar 4.3. Grafik Lengkung Ayakan Agregat Kasar Zona II



Gambar 4.4. Grafik Gradasi Agregat Kasar

4.2.3. Pemeriksaan Kadar Air Agregat

Tabel 4.3. Pemeriksaan Kadar Air Agregat Halus

Nomor Sampel		I	II	III	IV	V
Berat cawan + contoh basah	(gram)	59,2	82,4	86,4	67,6	61,4
Berat cawan + contoh kering	(gram)	58,2	80,8	84,8	65,6	59,6
Berat cawan	(gram)	30,2	36,2	37,6	13,2	7,4
Berat air	(gram)	1	1,6	1,6	2	1,8
Berat contoh kering	(gram)	28	44,6	47,2	52,4	52,2
Kadar air	(%)	3,57	3,59	3,39	3,82	3,45
Kadar air rata-rata	(%)	3,56				

Tabel 4.4. Pemeriksaan Kadar Air Agregat Kasar

Nomor Sampel		I	II	III	IV	V
Berat cawan + contoh basah	(gram)	88,8	105,4	123,2	119,8	123,2
Berat cawan + contoh kering	(gram)	87,9	104,6	122,1	118,8	122,1
Berat cawan	(gram)	13,6	34,8	34,5	37,5	30,1
Berat air	(gram)	0,95	0,78	1,12	1,01	1,07
Berat contoh kering	(gram)	74,24	69,86	87,62	81,25	92,04
Kadar air	(%)	1,28	1,12	1,28	1,24	1,16
Kadar air rata-rata	(%)	1,22				

4.2.4. Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus

Tabel 4.5. Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus

Nomor Sampel		A
Berat benda uji jenuh kering permukaan	Bj (gram)	500
Berat benda uji kering oven	Bk (gram)	482,4
Berat piknometer diisi air	Ba (gram)	668
Berat piknometer + benda uji (SSD) + air (pada suhu kamar)	Bt (gram)	940,2
Hasil Pengujian		
Berat jenis curah (Bulk specific gravity)	$Bk/(Ba+Bj-Bt)$	2,12
Berat jenuh kering permukaan (Bulk specific gravity saturated surface dry)	$Bj/(Ba+Bj-Bt)$	2,19
Berat jenis semu (Apparent specific gravity)	$Bk/(Ba+Bk-Bt)$	2,29
Penyerapan (Absorption)	$(Bj-Bk)/Bk \times 100\%$	3,65

4.2.5. Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

Tabel 4.6. Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

Nomor Sampel		A
Berat benda uji jenuh kering permukaan	Bj (gram)	5000
Berat benda uji kering oven	Bk (gram)	4938
Berat benda uji dalam air	Ba (gram)	3038,4
Hasil Pengujian		
Berat jenis curah (Bulk specific gravity)	$Bk/(Bj-Ba)$	2,52
Berat jenuh kering permukaan (Bulk specific gravity saturated surface dry)	$Bj/(Bj-Ba)$	2,55
Berat jenis semu (Apparent specific gravity)	$Bk/(Bk-Ba)$	2,60
Penyerapan (Absorption)	$(Bj-Bk)/Bk \times 100\%$	1,26

4.2.6. Kadar NaOH atau KOH dalam Larutan Hidroksida

Tabel 4.7. Pemeriksaan Kadar NaOH dalam Larutan Hidroksida

Konsentrasi larutan		8 Molar	10 Molar	12 Molar
Massa molar NaOH	(gram/mol)	39,99711	39,99711	39,99711
Berat NaOH murni	(gram)	319,9769	399,9711	479,9653
Berat wadah + larutan 1 liter	(gram)	1519,86	1548,71	1589,06
Berat wadah	(gram)	247,74	247,74	247,74
Berat larutan 1 liter	(gram)	1272,12	1300,97	1341,32
Kadar NaOH	(%)	25,153	30,744	35,783

Tabel 4.8. Pemeriksaan Kadar KOH dalam Larutan Hidroksida

Konsentrasi larutan		8 Molar	10 Molar	12 Molar
Massa molar KOH	(gram/mol)	56,1056	56,1056	56,1056
Berat KOH murni	(gram)	448,8448	561,056	673,2672
Berat wadah + larutan 1 liter	(gram)	1482,86	1520,81	1549,54
Berat wadah	(gram)	247,74	247,74	247,74
Berat larutan 1 liter	(gram)	1235,12	1273,07	1301,80
Kadar KOH	(%)	36,340	44,071	51,718

4.3. Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar Dan Waktu Ikat

Kuat tekan mortar adalah besarnya beban per satuan luas, yang menyebabkan benda uji mortar hancur bila dibebani dengan gaya tersebut. Pengujian dilakukan dengan menggunakan mortar ukuran $5 \times 5 \times 5$ cm, untuk mendapatkan komposisi mortar yang menghasilkan kuat tekan paling tinggi. Komposisi berat setiap bahan pembuatan mortar didapatkan dengan memvariasikan parameter-parameter (*trial mix design*) yang berpengaruh pada kuat tekan beton geopolimer. Setiap *mix design* dilakukan *curing* selama 24 jam dengan suhu yang bervariasi pula untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kuat tekan mortar.

Sedangkan dalam uji waktu ikat akan didapatkan nilai waktu ikat awal dan akhir dari setiap *mix design*. Waktu ikat awal adalah waktu yang diperlukan oleh pasta beton untuk mengubah sifatnya dari kondisi cair menjadi padat dimana penetrasi jarum vicat mencapai nilai 25 mm, sedangkan waktu ikat akhir adalah waktu dimana penetrasi jarum vicat tidak terlihat secara visual (penetrasi jarum vicat sama dengan nol).

4.3.1. Pengaruh Konsentrasi Larutan Hidroksida

Tabel 4.9. Hasil Pengujian Pengaruh Konsentrasi Larutan Hidroksida

Mix Design	Konsentrasi Hidroksida (Molar)	Sodium			Potasium		
		Berat jenis (kg/m ³)	Kuat tekan (MPa)	Waktu ikat awal (menit)	Berat jenis (kg/m ³)	Kuat tekan (MPa)	Waktu ikat awal (menit)
1b	8	2236,3	31,73	27	2209,60	64,27	12
2	10	2088,0	35,20	27	2260,53	70,40	15
3	12	2241,1	55,60	31	2268,27	72,67	18

Keterangan:

Binder : pasir = 1 : 2
 Penambahan air = 2,5% padatan
 Alkali : Fly Ash = 0,4
 Hidroksida : Silikat = 1 : 2,5
 Perlakuan larutan = didiamkan 1 hari
 Suhu Curing = 90°C
 Umur = 7 hari

4.3.2. Pengaruh Perbandingan Larutan Hidroksida dan Larutan Silikat

Tabel 4.10. Hasil Pengujian Pengaruh Perbandingan Larutan -OH dan Larutan Si-

Mix Design	Hidroksida : Silikat	Sodium			Potasium		
		Berat jenis (kg/m ³)	Kuat tekan (MPa)	Waktu ikat awal (menit)	Berat jenis (kg/m ³)	Kuat tekan (MPa)	Waktu ikat awal (menit)
4	1 : 0,3	2156,27	3,33	57	2247,20	23,73	23
5	1 : 0,4	2136,00	10,67	23	2299,47	34,13	15
6	1 : 0,5	2167,47	26,27	24	2267,47	63,33	14
7	1 : 1	2241,60	42,93	22	2241,87	68,80	14
8a	1 : 2	2239,47	56,00	23	2270,93	68,40	14
9	1 : 2,25	2186,67	48,13	27	2242,40	65,60	14
1b	1 : 2,5	2236,27	31,73	27	2209,60	64,27	12
10	1 : 2,75	2187,20	40,53	27	2280,27	59,60	10
11	1 : 3	2194,67	49,47	21	2227,20	50,27	8

Keterangan:

Binder : pasir = 1 : 2
 Penambahan air = 2,5% padatan
 Alkali : Fly Ash = 0,4
 Konsentrasi = 8 molar
 Perlakuan larutan = didiamkan 1 hari
 Suhu Curing = 90°C
 Umur = 7 hari

4.3.3. Pengaruh Penambahan Air

Tabel 4.11. Hasil Pengujian Pengaruh Penambahan Air

<i>Mix Design</i>	Penambahan Air (% padatan)	Sodium			Potasium		
		Berat jenis (kg/m ³)	Kuat tekan (MPa)	Waktu ikat awal (menit)	Berat jenis (kg/m ³)	Kuat tekan (MPa)	Waktu ikat awal (menit)
16	0	2284,80	45,73	27	2317,97	61,47	13
15a	1	2225,07	60,67	33	2253,79	64,13	17
14	1,5	2222,40	59,73	28	2284,24	65,73	17
13	2	2251,20	49,47	28	2272,85	66,53	17
8a	2,5	2239,47	56,00	23	2270,93	68,40	14
12	3	2285,87	56,80	38	2301,63	66,27	17

Keterangan:

Binder : pasir	= 1 : 2
Alkali : Fly Ash	= 0,4
Hidroksida : Silikat	= 1 : 2
Konsentrasi	= 8 molar
Perlakuan larutan	= didiamkan 1 hari
Suhu <i>Curing</i>	= 90°C
Umur	= 7 hari

4.3.4. Pengaruh Perbandingan Larutan Alkali dan Fly Ash

Tabel 4.12. Hasil Pengujian Pengaruh Perbandingan Larutan Alkali dan Fly Ash

<i>Mix Design</i>	Alkali : Fly Ash	Sodium			Potasium		
		Berat jenis (kg/m ³)	Kuat tekan (MPa)	Waktu ikat awal (menit)	Berat jenis (kg/m ³)	Kuat tekan (MPa)	Waktu ikat awal (menit)
17	0,3	2100,80	36,93	26	2261,07	45,07	10
18	0,35	2272,53	47,87	27	2228,80	59,20	12
8a	0,4	2239,47	56,00	23	2270,93	68,40	14
19	0,45	2262,40	44,53	32	2246,67	68,53	19
20	0,5	2264,53	44,13	32	2284,53	62,53	21

Keterangan:

Binder : pasir	= 1 : 2
Penambahan air	= 2,5% padatan
Hidroksida : Silikat	= 1 : 2
Konsentrasi	= 8 molar
Perlakuan larutan	= didiamkan 1 hari
Suhu <i>Curing</i>	= 90°C
Umur	= 7 hari

4.3.5. Pengaruh Perlakuan Larutan

Tabel 4.13. Hasil Pengujian Pengaruh Perlakuan Larutan

Mix Design	Perlakuan larutan	Sodium			Potasium		
		Berat jenis (kg/m ³)	Kuat tekan (MPa)	Waktu ikat awal (menit)	Berat jenis (kg/m ³)	Kuat tekan (MPa)	Waktu ikat awal (menit)
8a	didiamkan 1 hari	2239,47	56,00	23	2270,93	68,40	14
8b	tidak didiamkan	2241,07	56,40	18	2294,40	58,27	12

Keterangan:

Binder : pasir = 1 : 2
 Penambahan air = 2,5% padatan
 Alkali : Fly Ash = 0,4
 Hidroksida : Silikat = 1 : 2
 Konsentrasi = 8 molar
 Suhu Curing = 90°C
 Umur = 7 hari

4.3.6. Pengaruh Umur Mortar

Tabel 4.14. Hasil Pengujian Pengaruh Umur Mortar

Mix Design	Umur (hari)	Sodium			Potasium		
		Berat jenis (kg/m ³)	Kuat tekan (MPa)	Waktu ikat awal (menit)	Berat jenis (kg/m ³)	Kuat tekan (MPa)	Waktu ikat awal (menit)
1a	1	2207,47	47,33	27	2296,00	53,60	12
1b	7	2236,27	31,73	27	2209,60	64,27	12
1c	14	2256,53	41,33	27	2277,87	76,67	12
1d	28	2261,87	50,13	27	2299,47	56,27	12

Keterangan:

Binder : pasir = 1 : 2
 Penambahan air = 2,5% padatan
 Alkali : Fly Ash = 0,4
 Hidroksida : Silikat = 1 : 2
 Konsentrasi = 8 molar
 Perlakuan larutan = didiamkan 1 hari
 Suhu Curing = 90°C

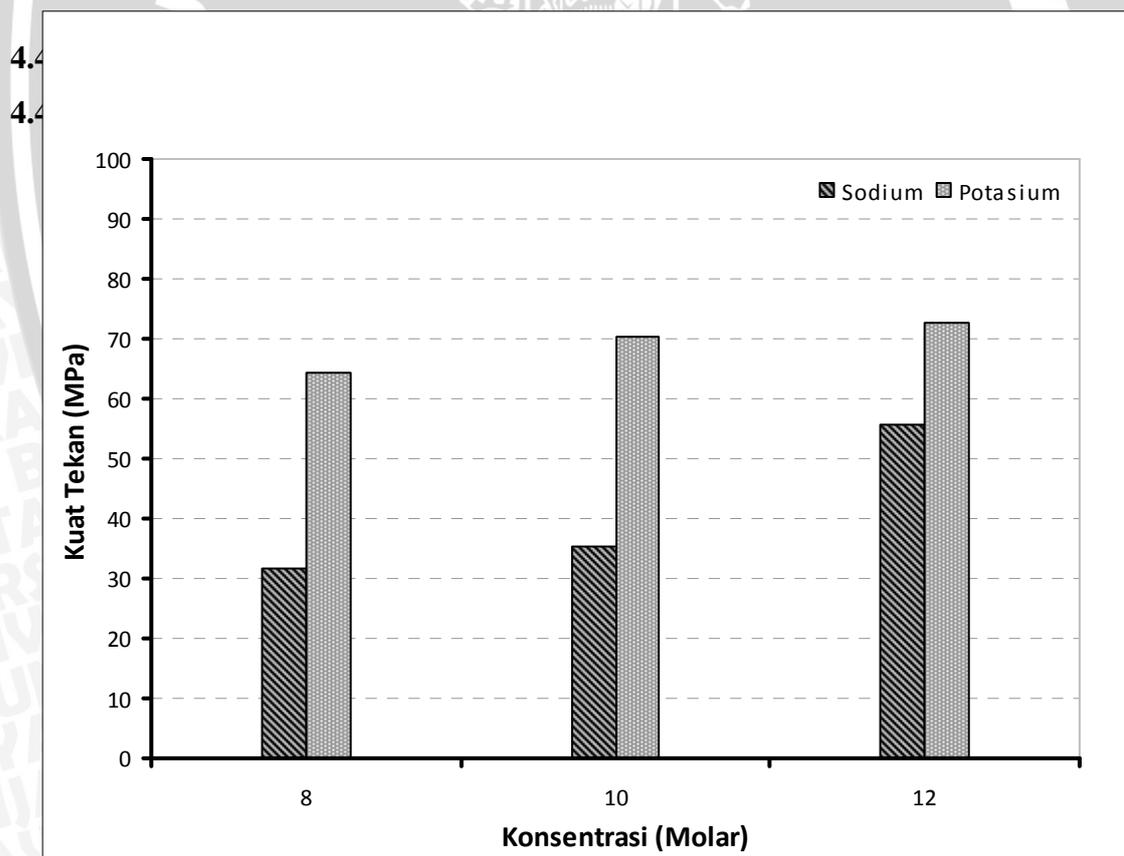
4.3.7. Pengaruh Suhu Curing

Tabel 4.15. Hasil Pengujian Pengaruh Suhu Curing

Mix Design	Suhu Curing (°C)	Sodium			Potasium		
		Berat jenis (kg/m ³)	Kuat tekan (MPa)	Waktu ikat awal (menit)	Berat jenis (kg/m ³)	Kuat tekan (MPa)	Waktu ikat awal (menit)
15a	90	2225,07	60,67	33	2253,79	64,13	17
15b	75	2301,87	42,13	41	2259,47	58,40	23
15c	60	2236,80	40,53	43	2286,40	54,00	33
15d	25 / suhu ruang	2308,80	23,20	120	2252,80	32,13	88

Keterangan:

Binder : pasir = 1 : 2
 Penambahan air = 1% padatan
 Alkali : Fly Ash = 0,4
 Hidroksida : Silikat = 1 : 2
 Konsentrasi = 8 molar
 Perlakuan larutan = didiamkan 1 hari
 Umur = 7 hari



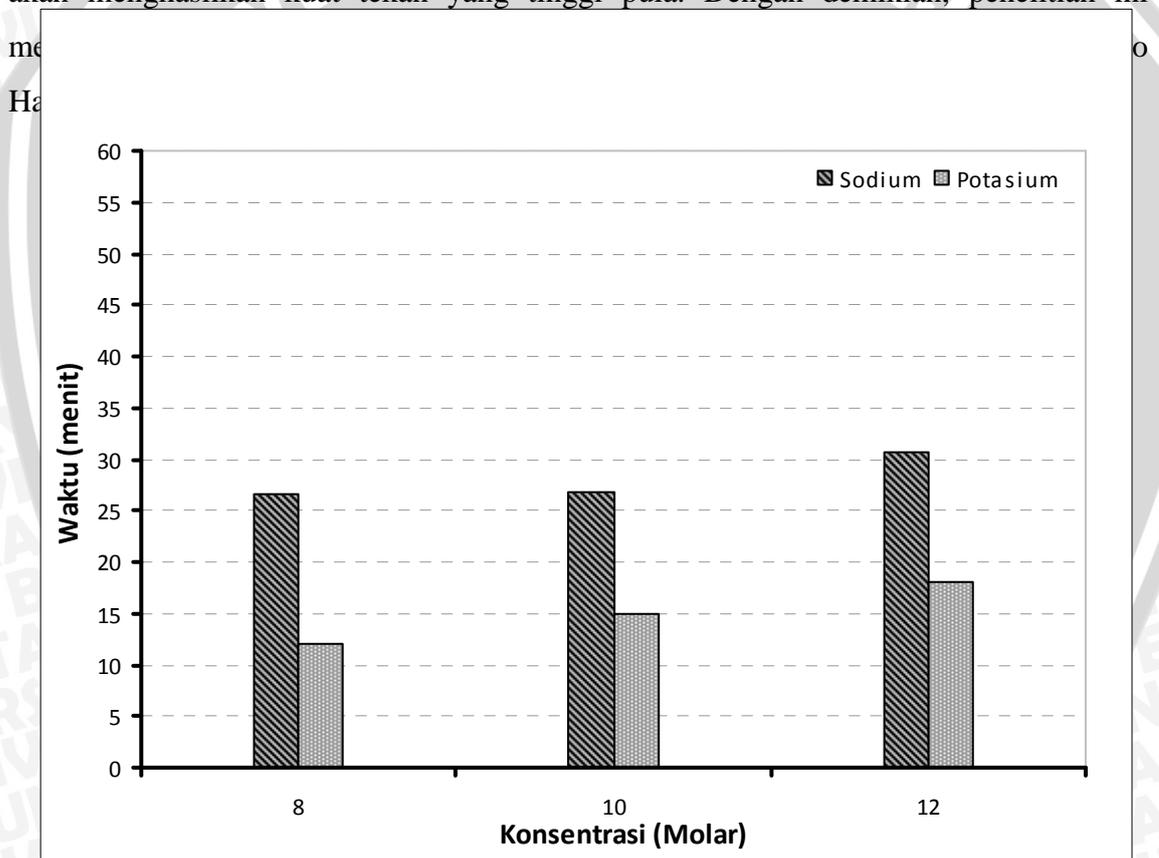
Gambar 4.5. Grafik Pengaruh Konsentrasi Hidroksida Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer

Mix design 1b, 2, dan 3 dibuat untuk mengetahui pengaruh larutan hidroksida terhadap kuat tekan mortar. Dari hasil pengujian yang didapatkan, diketahui bahwa

semakin tinggi konsentrasi larutan hidroksida baik NaOH maupun KOH, semakin tinggi pula kuat tekan mortarnya. Hal ini dikarenakan konsentrasi larutan hidroksida akan berpengaruh pada pemecahan struktur atom *fly ash* yang akan berdampak pula pada pembentukan struktur geopolimer (Wang, dkk, 2005).

Gambar 4.5. menunjukkan hasil pengujian kuat tekan mortar pada umur 7 hari. Campuran mortar dengan konsentrasi hidroksida lebih tinggi meningkatkan kuat tekan mortar. Hal ini berlaku untuk kedua jenis larutan hidroksida (KOH dan NaOH) dimana kuat tekan mortar KOH lebih tinggi dibandingkan kuat tekan mortar NaOH.

Dalam penelitian untuk *fly ash* tipe F dan larutan alkalin aktivator NaOH yang dilakukan oleh Hardjito dan Rangan (2004) ditunjukkan bahwa perbandingan kekuatan antara konsentrasi sodium hidroksida (NaOH) dalam molar konsentrasi yang tinggi akan menghasilkan kuat tekan yang tinggi pula. Dengan demikian, penelitian ini



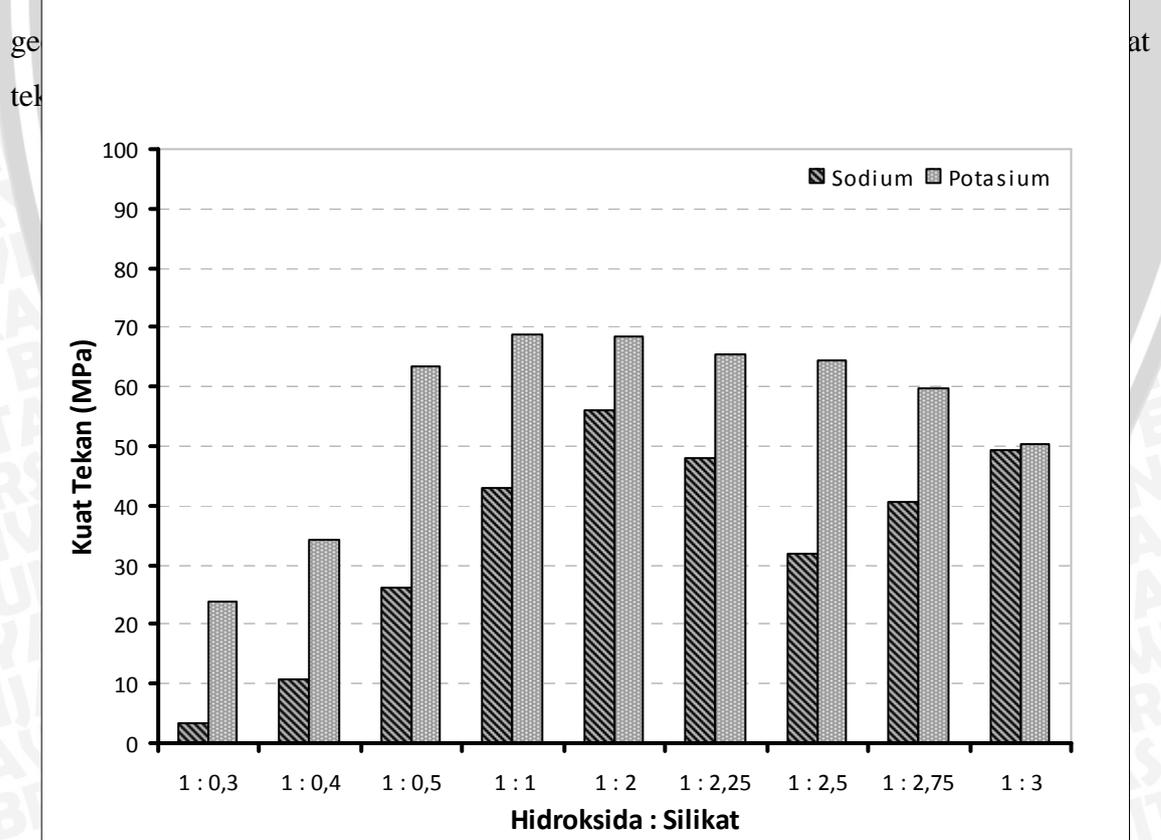
Gambar 4.6. Grafik Pengaruh Konsentrasi Hidroksida Terhadap Waktu Ikat Awal Pasta Geopolimer

Sedangkan untuk waktu ikatnya, semakin tinggi konsentrasi larutan hidroksida semakin lambat waktu ikatnya seperti terlihat pada **Gambar 4.6**. Hal ini dikarenakan konsentrasi larutan hidroksida yang tinggi akan menyebabkan lambatnya laju reaksi polimerisasi (Alonso dan Palomo, 2001 dalam Djwantoro Hardjito, Chua Chung Cheak

dan Carrie Ho Lee Ing, 2008). Selain itu sesuai dengan hukum aksi massa, kecepatan reaksi bergantung pada konsentrasi zat pereaksinya. Pada pasta geopolimer sodium dengan konsentrasi larutan 8 molar dan 10 molar tidak terdapat perbedaan waktu ikat awal, sedangkan pada pasta geopolimer potasium terlihat bahwa semakin tinggi konsentrasi KOH akan memperlambat waktu ikatnya. Secara keseluruhan, pasta geopolimer potasium menghasilkan waktu ikat yang lebih cepat daripada pasta geopolimer sodium

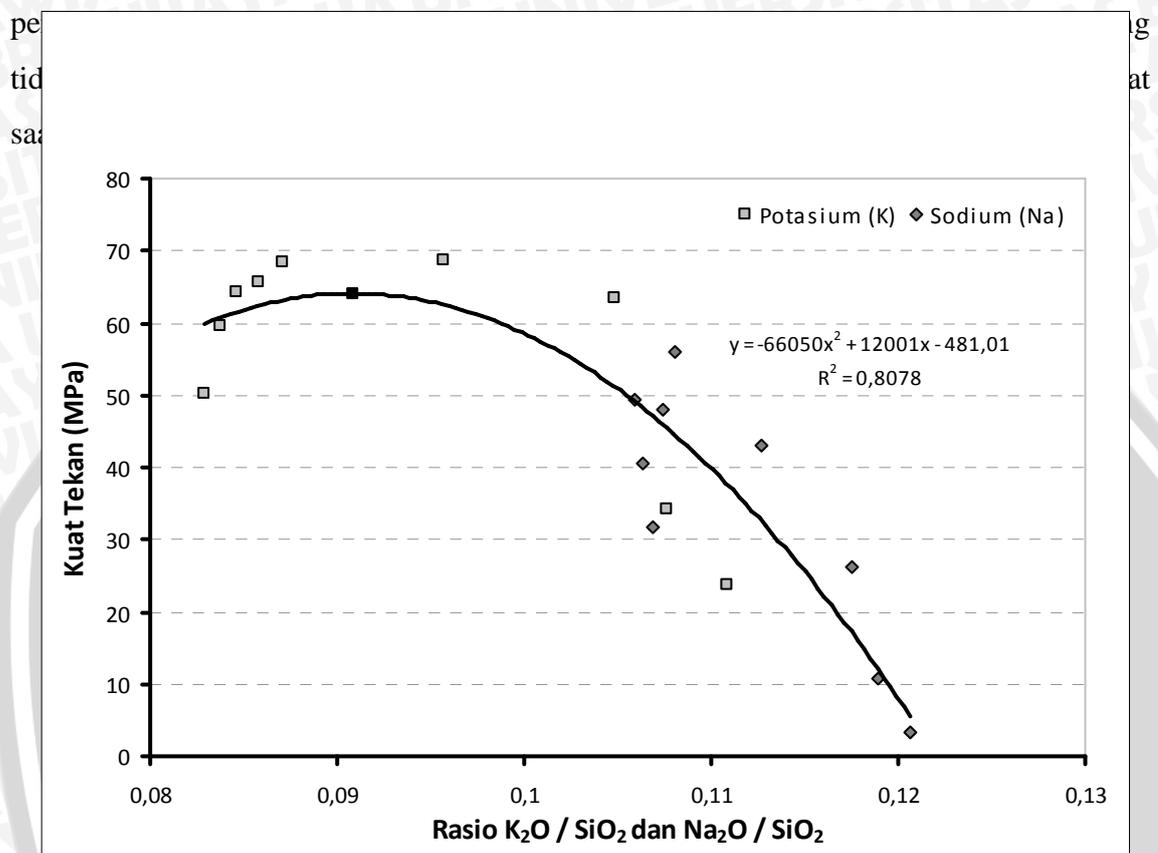
4.4.2. Pengaruh Perbandingan Larutan Hidroksida dan Larutan Silikat

Mix design 4, 5, 6, 7, 8a, 9, 1b, 10, dan 11 dibuat untuk mengetahui pengaruh rasio hidroksida dan silikat terhadap kuat tekan dan waktu ikatnya pada tiap-tiap jenis mortar. Perbandingan didasarkan atas perbandingan massa larutan pembentuk larutan alkalin aktivator dengan rasio larutan silikat dan larutan hidroksida 1 : 0,3, 1 : 0,4, 1 : 0,5, 1 : 1, 1 : 2, 1 : 2,25, 1 : 2,5, 1 : 2,75, dan 1 : 3. Pada **Gambar 4.7.** terlihat bahwa perbandingan larutan hidroksida dan larutan silikat sangat mempengaruhi kuat tekan mortar. Terlihat pula bahwa larutan silikat berperan penting dalam proses



Gambar 4.7. Grafik Pengaruh Perbandingan Hidroksida dan Silikat Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer

Pada mortar geopolimer sodium, kuat tekan maksimum diperoleh saat digunakan perbandingan 1 : 2 dengan kuat tekan 56 MPa. Setiap perbandingan hidroksida dan silikat pada mortar geopolimer sodium terlihat perbedaan kuat tekan yang cukup signifikan satu sama lain. Tidak pada mortar geopolimer potasium dimana



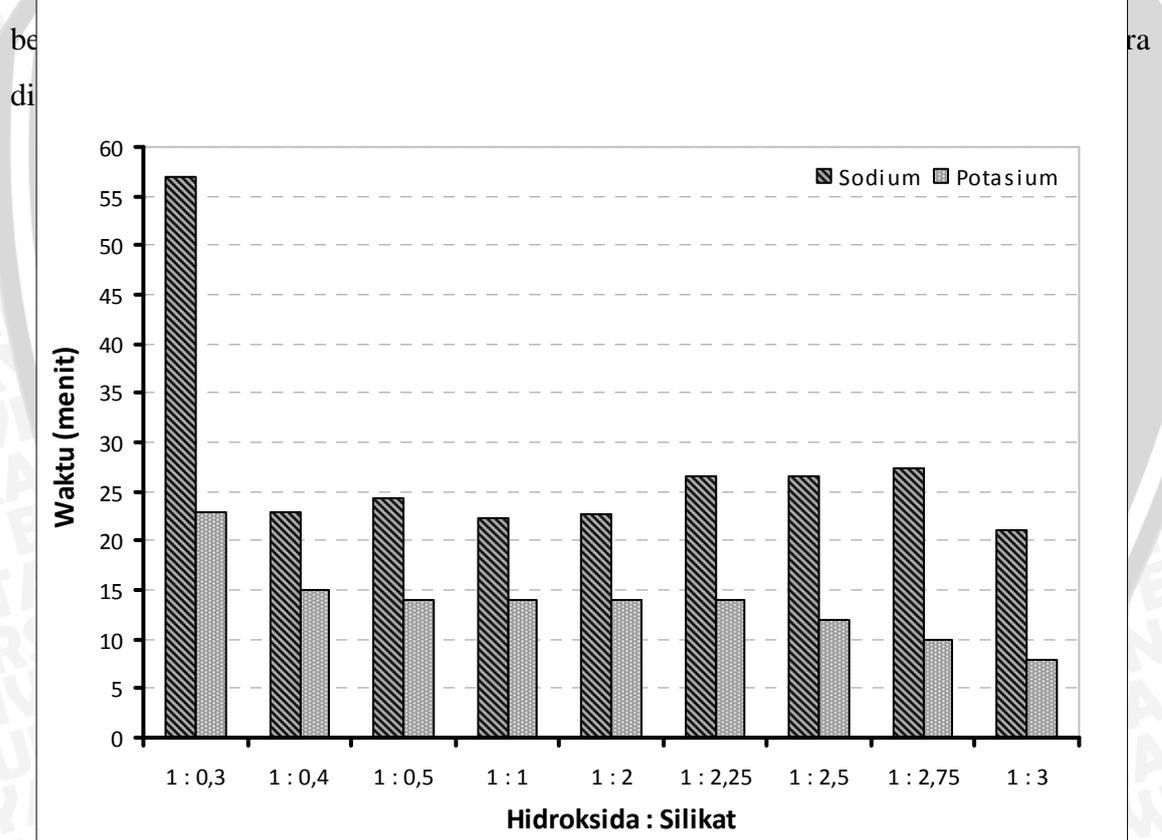
Gambar 4.8. Grafik Pengaruh Perbandingan Molar K_2O/SiO_2 dan Na_2O/SiO_2 Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer

Dari perbandingan molar Na_2O dan SiO_2 terlihat bahwa kuat tekan didapatkan saat perbandingannya 0,108 dengan kuat tekan semakin rendah saat rasionya mencapai lebih dari 0,12 dimana oksida Na_2O semakin meningkat. Sedangkan untuk perbandingan K_2O dan SiO_2 kuat tekan maksimum didapat saat rasio 0,096 dan sama dengan halnya mortar sodium, kuat tekan akan semakin menurun saat rasionya semakin meningkat. Berdasarkan *trendline*-nya kuat tekan maksimum didapat saat rasio alkali (Na_2O atau K_2O) dan SiO_2 adalah 0,091 dengan kuat tekan 64,122 MPa.

Sebagai perbandingan, pada beton konvensional (PC) alkali (Na_2O atau K_2O) dan silika (SiO_2) memiliki sifat yang saling berlawanan yang dikenal dengan ASR (*Alkali Silica Reaction*). ASR dapat menyebabkan pemuaihan dan retak pada beton sehingga menyebabkan masalah dan kerusakan pada beton. Dari **Gambar 4.8.** terlihat bahwa hal yang sama terjadi pada beton geopolimer dimana semakin tinggi

perbandingan molar alkali sebagai Na_2O atau K_2O dengan SiO_2 maka akan semakin rendah pula kuat tekannya. Sehingga dalam perencanaan beton geopolimer, perbandingan molar alkali dan silika adalah hal yang paling perlu diperhatikan.

Sodium silikat atau potasium silikat merupakan larutan alkali yang memainkan peranan penting dalam proses polimerisasi karena sodium silikat dan potasium silikat mempunyai fungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi. Pada **Gambar 4.9.**, secara garis besar terlihat bahwa lama waktu ikat polimerisasi terjadi secara cepat ketika larutan alkali banyak mengandung larutan silikat seperti sodium silikat ataupun potasium silikat (1 : 3) dibandingkan reaksi yang terjadi akibat larutan alkali yang banyak mengandung larutan hidroksida (1 : 0,3). Waktu ikat tercepat untuk pasta geopolimer sodium adalah 21 menit dan geopolimer potasium adalah 8 menit dimana perbandingan hidroksida dan silikat untuk keduanya adalah 1 : 3. Waktu ikat ini terlalu cepat sehingga kurang sesuai untuk digunakan dalam pembuatan beton struktural karena



Gambar 4.9. Grafik Pengaruh Perbandingan Hidroksida dan Silikat Terhadap Waktu Ikat Awal Pasta Geopolimer

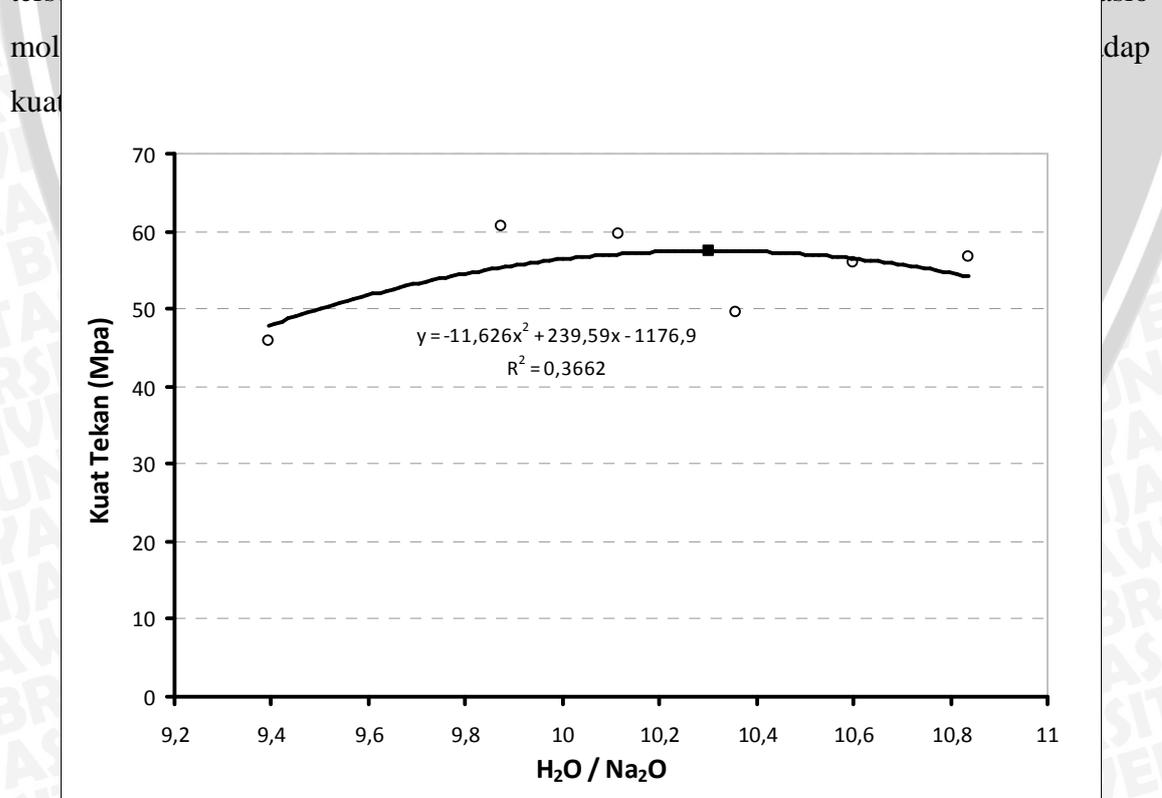
4.4.3. Pengaruh Penambahan Air

Pada beton normal, air digunakan untuk mereaksikan semen sehingga menjadi pasta yang dapat mengikat agregat. Berbeda dengan air yang digunakan pada beton

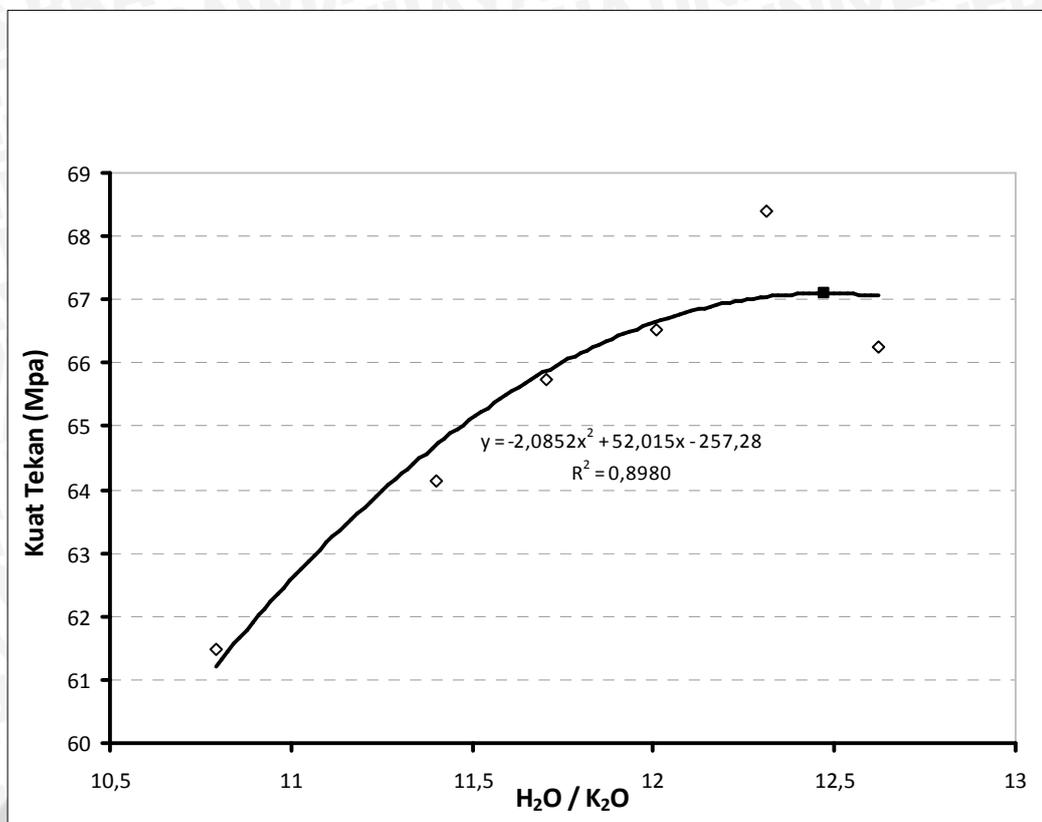
geopolimer yang tidak menyebabkan reaksi kimia. Namun, tidak berarti air tidak berpengaruh sama sekali pada pembuatan beton geopolimer. Secara langsung air akan mempengaruhi kelecakan beton yang berdampak pada kuat tekan beton sendiri. Maka dari itu, dibuat beberapa *mix design* untuk mengetahui pengaruh penambahan air terhadap kuat tekan dan waktu ikat beton geopolimer.

Dalam penelitian ini, penambahan air divariasikan untuk mendapatkan rasio H₂O dengan KOH atau NaOH tanpa mengikuti penelitian-penelitian yang ada sebelumnya dikarenakan kondisi material *fly ash* yang berbeda baik jenis maupun kandungan kimianya. Dalam penelitian yang telah dilakukan oleh Davidovits (1982) mengenai geopolimer yang menggunakan kaolin sebagai bahannya telah didapatkan rasio molar yang sesuai untuk memproduksi beton geopolimer, antara lain: $0,2 < \text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 < 0,28$, $3,5 < \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 4,5$, dan $15 < \text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 17,5$ dimana Na₂O, SiO₂, Al₂O₃, dan H₂O adalah sodium, silikon, aluminium, dan air. Sedangkan Barbosa dkk (2000) mendapatkan komposisi optimum saat rasio Na₂O/SiO₂ adalah 0,25 dan H₂O/Na₂O adalah 10,0.

Penambahan air divariasikan berdasarkan persentase dari total berat padatan (*fly ash*, KOH atau NaOH kering, dan K₂SiO₃ atau Na₂SiO₃ kering). Jumlah penambahan terselenggara.



Gambar 4.10. Grafik Pengaruh Perbandingan Molar H₂O dan Na₂O Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer

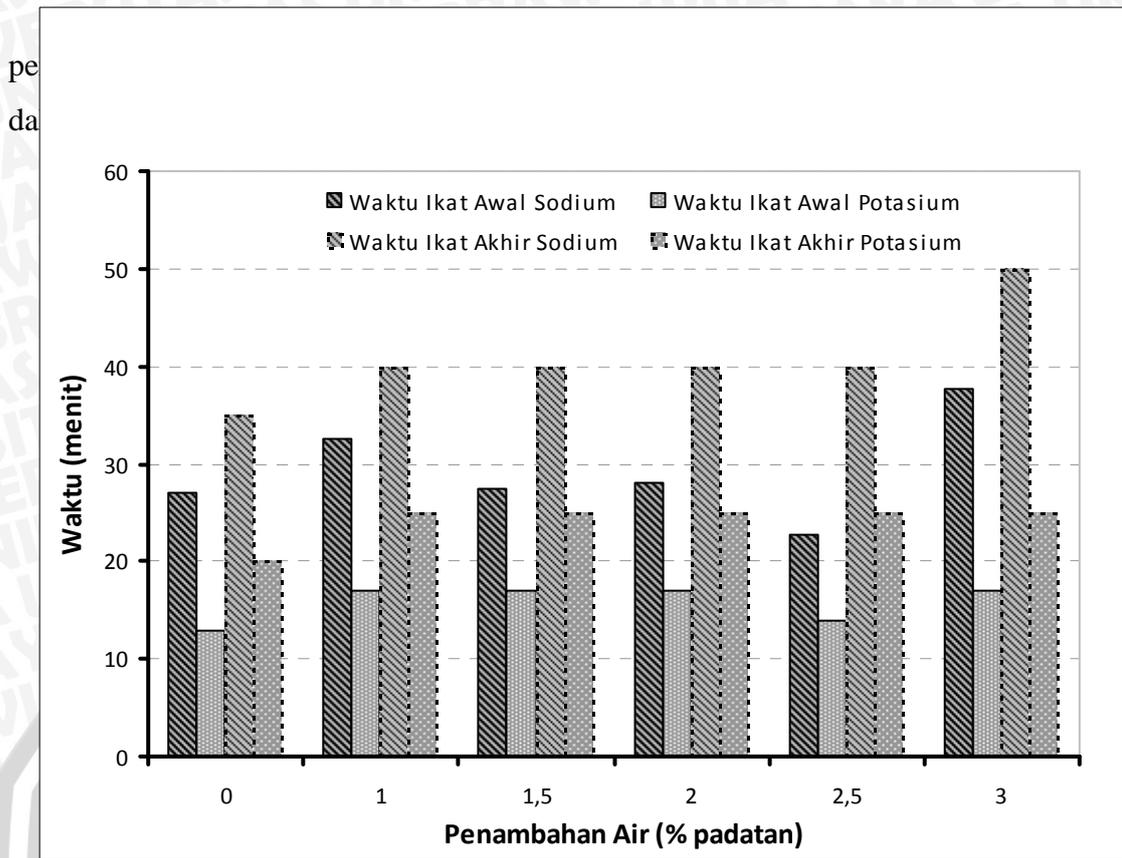


Gambar 4.11. Grafik Pengaruh Perbandingan Molar H₂O dan K₂O Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer

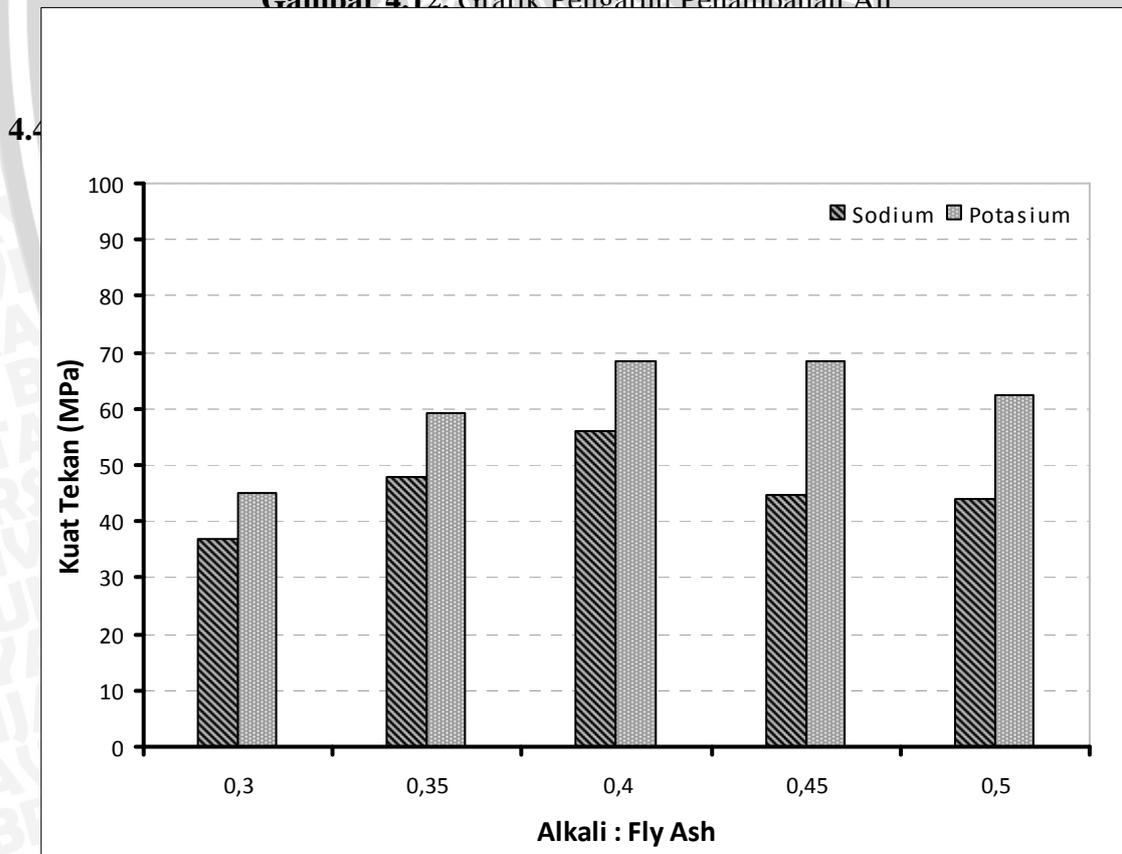
Pada **Gambar 4.10.** terlihat bahwa kuat tekan maksimum mortar sodiun berdasarkan *trendline*-nya adalah 57,475 MPa saat rasio H₂O/Na₂O adalah 10,30 dan pada **Gambar 4.11.** kuat tekan maksimum mortar potasium dicapai saat rasio H₂O/K₂O adalah 12,47 dengan nilai kuat tekan 67,097 MPa.

Dari hasil pengamatan selama penelitian, penambahan air yang rendah menyebabkan mortar memiliki kelecakan yang buruk dan memiliki banyak rongga udara saat mortar dikeluarkan dari cetakan. Namun sebaliknya, penambahan air yang berlebih menyebabkan segregasi dan *bleeding*. Sehingga air dalam pembuatan beton geopolimer memiliki peran sebagai pengencer untuk memudahkan pengerjaan dan mengurangi kemungkinan terjadinya keropos pada beton. Hal ini dapat terlihat dari **Gambar 4.10.** dan **Gambar 4.11.**, dimana kadar air yang rendah tidak membuat kuat tekan beton menjadi tinggi seperti halnya pada beton semen.

Dilihat dari waktu ikat setiap jenis pasta, pada pasta geopolimer potasium penambahan air 1%, 1,5%, 2%, dan 3% terdapat sedikit perbedaan waktu ikat baik awal maupun akhir, tidak seperti pada pasta geopolimer sodiun dimana pada setiap penambahan air mengalami terdapat perlambatan waktu ikat yang signifikan. Sedangkan dari keseluruhan waktu ikat kedua jenis mortar pada **Gambar 4.12.**, terlihat bahwa setiap penambahan air tidak memberi pengaruh yang signifikan pada waktu ikatnya. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penambahan air hanya berfungsi sebagai



Gambar 4.12. Grafik Pengaruh Penambahan Air

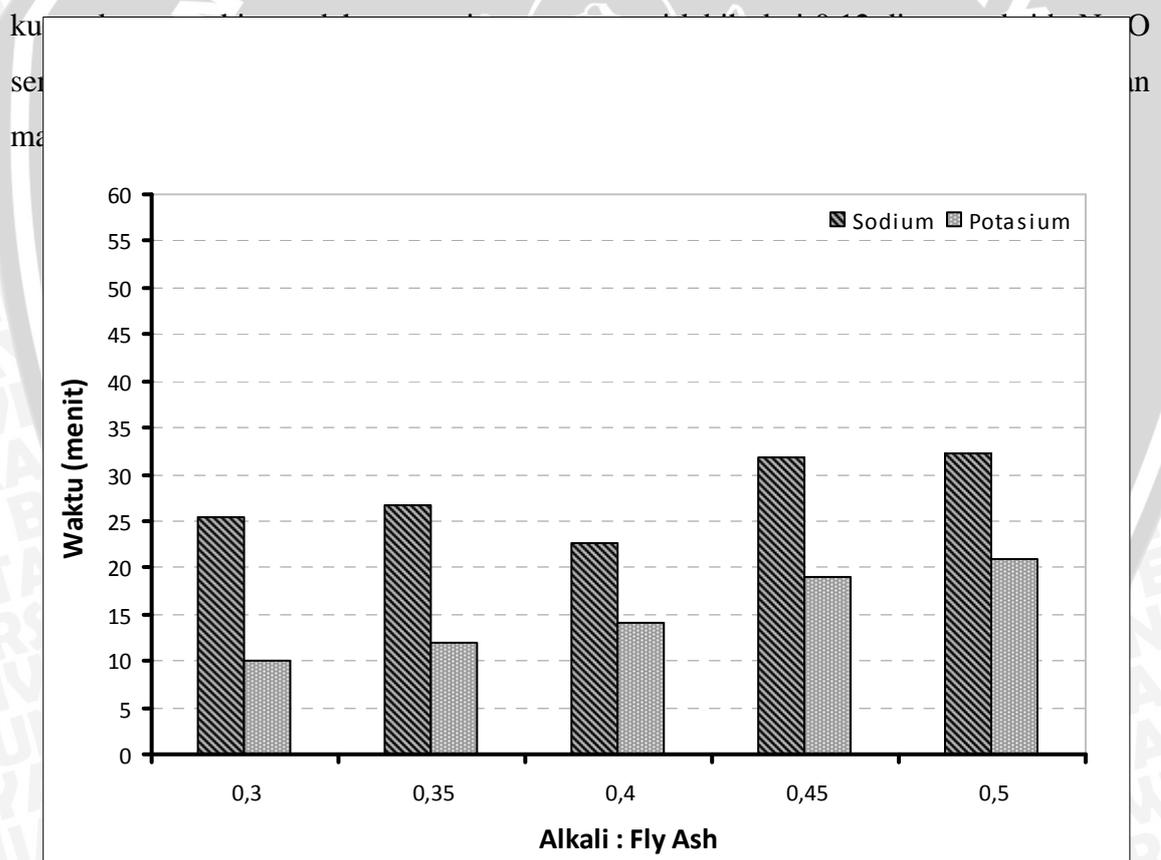


Gambar 4.13. Grafik Pengaruh Perbandingan Massa Alkali dan Fly Ash Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer

Mix design 17, 18, 8a, 19, dan 20 yang dibuat untuk mempelajari pengaruh perbandingan alkali dan *fly ash* terhadap kuat tekan mortar dan waktu ikatnya. Konsentrasi -OH yang digunakan adalah 8 molar dan menggunakan *curing oven* 90°C selama 24 jam. Dari **Gambar 4.13**, terlihat bahwa kuat tekan mortar paling tinggi didapat saat didapatkan kuat tekan maksimum saat perbandingan alkali sodium / *fly ash* adalah 0,4 dan perbandingan alkali potasium / *fly ash* adalah 0,45.

Perbandingan didasarkan atas perbandingan massa larutan alkali dan *fly ash*. Perbandingan dibuat untuk mendapatkan variasi perbandingan molar $\text{Na}_2\text{O} / \text{SiO}_2$ dan $\text{K}_2\text{O} / \text{SiO}_2$, sama halnya dengan perbandingan massa larutan -OH dan Si- . Dimana semakin banyak larutan alkali yang digunakan maka semakin tinggi pula rasio molar $\text{Na}_2\text{O} / \text{SiO}_2$ dan $\text{K}_2\text{O} / \text{SiO}_2$ -nya.

Berdasarkan perhitungan molar pada **LAMPIRAN F**, perbandingan molar Na_2O dan SiO_2 terlihat bahwa kuat tekan tetap didapatkan saat perbandingannya 0,108 dengan



Gambar 4.14. Grafik Pengaruh Perbandingan Massa Alkali dan *Fly Ash* Terhadap Waktu Ikat Awal Pasta Geopolimer

Pada **Gambar 4.14**, terlihat bahwa semakin tinggi perbandingan massa alkali dan *fly ash* maka semakin lama waktu ikatnya dimana semakin tinggi perbandingan massa alkali dan *fly ash* maka semakin tinggi pula rasio molar $\text{Na}_2\text{O} / \text{SiO}_2$ dan $\text{K}_2\text{O} /$

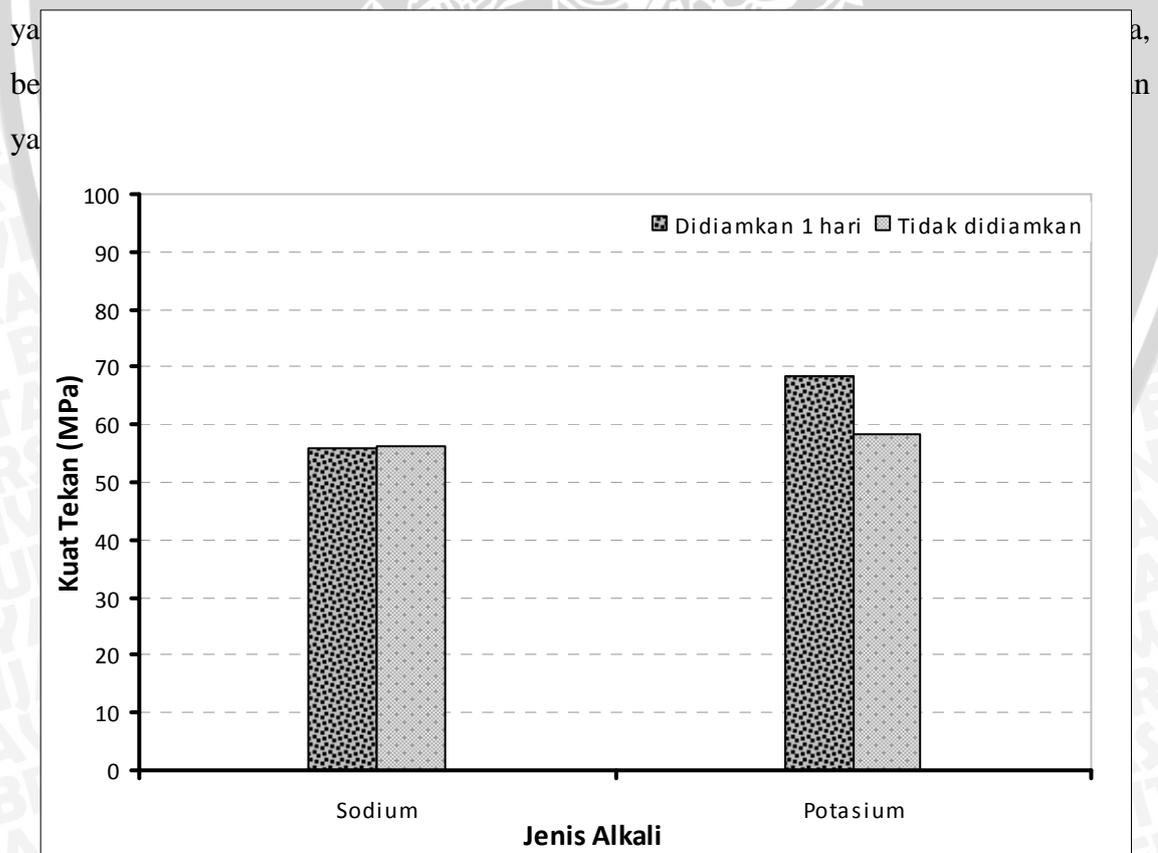
SiO₂. Rasio molar Na₂O / SiO₂ dan K₂O / SiO₂ tinggi mengindikasikan bahwa kadar SiO₂ semakin rendah yang memperlambat reaksi geopolimer. Hal ini semakin membuktikan bahwa silikat berperan penting dalam reaksi geopolimerisasi karena mempunyai fungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi.

4.4.5. Pengaruh Perlakuan Larutan

Perlakuan larutan divariasikan yakni didiamkan selama 1 hari dan langsung dicampurkan ke dalam *fly ash* tanpa *delay time*. Perlakuan terhadap larutan alkali ini perlu untuk dianalisis karena dari kedua perlakuan tersebut terdapat perbedaan dimana larutan alkali yang baru dicampurkan akan menghasilkan panas yang diakibatkan reaksi kimia sedangkan larutan alkali yang didiamkan selama 1 hari tidak (suhu sesuai dengan suhu ruang $\pm 25^{\circ}\text{C}$).

Dalam pembuatan beton geopolimer, *fly ash* direaksikan dengan larutan alkali secara kimia. Dalam reaksi kimia, terdapat laju reaksi yang akan mempengaruhi hasil reaksi kimia.

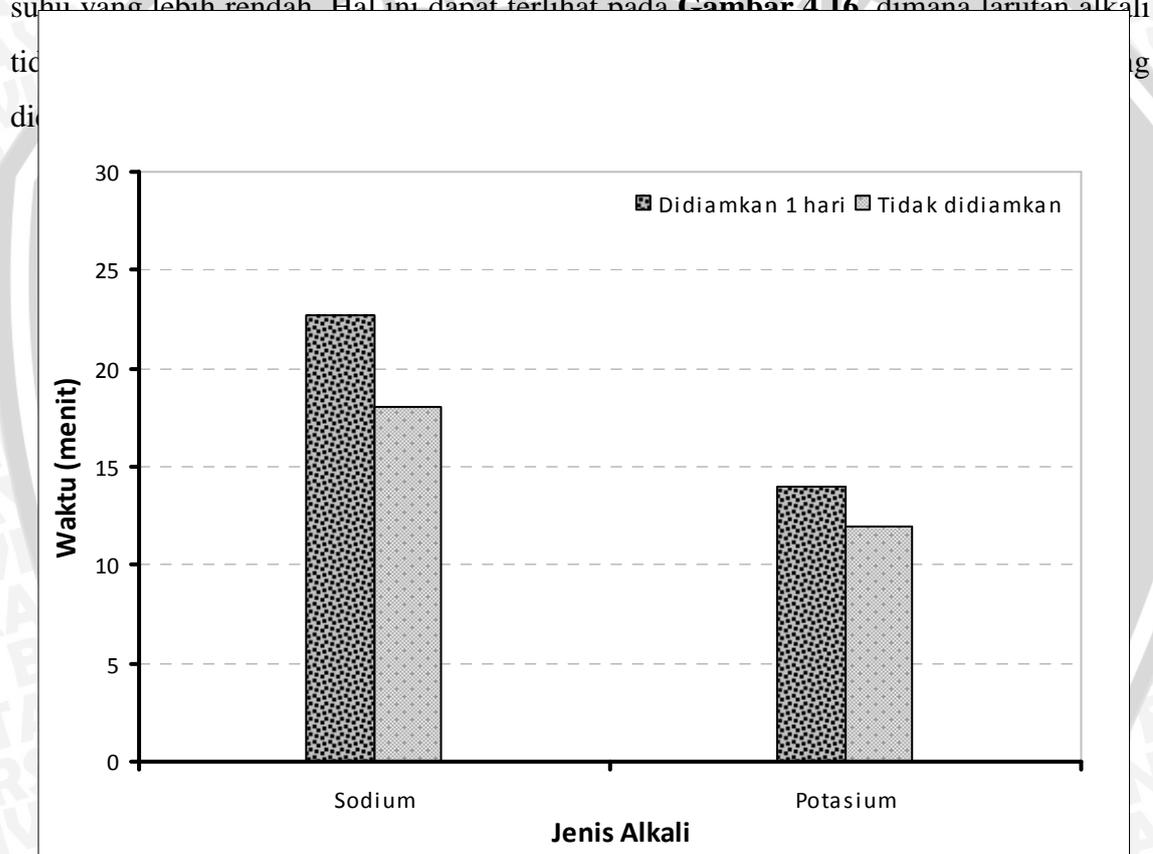
Menurut Stephanus Peter dan Ferawati Hariyanto (2008) pembuatan larutan



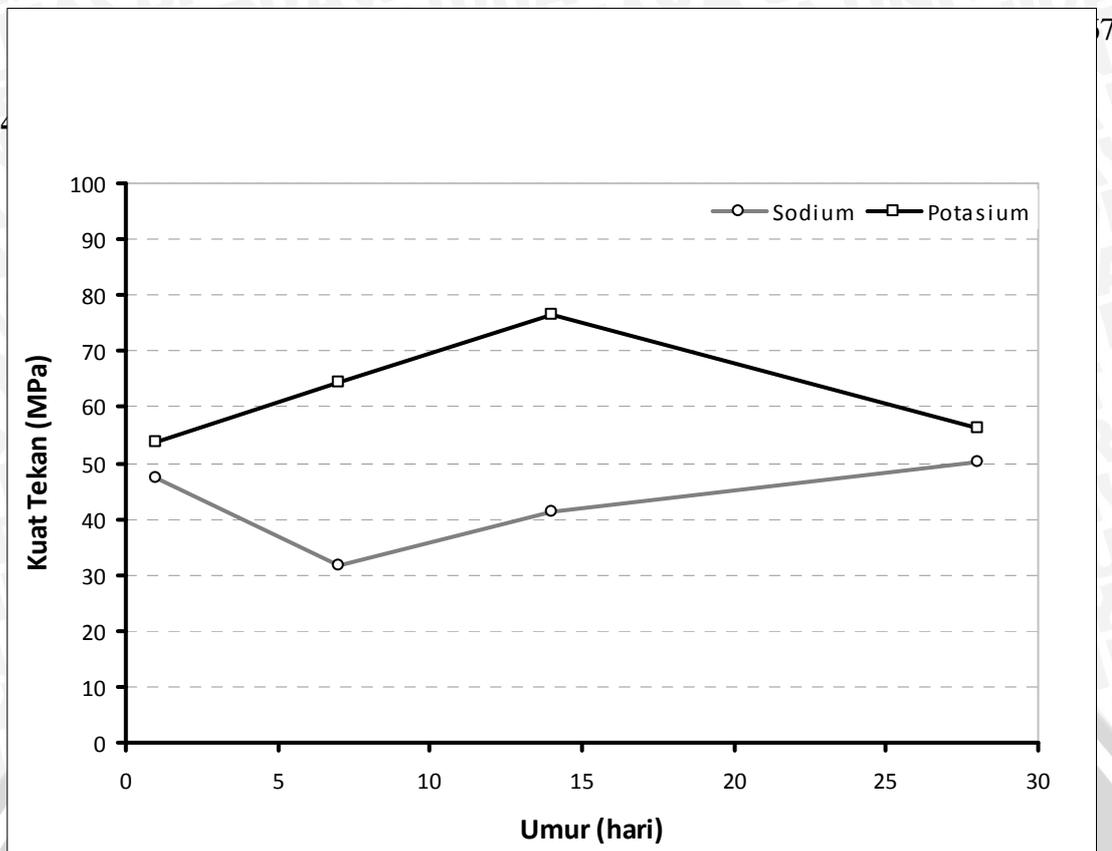
Gambar 4.15. Grafik Pengaruh Perlakuan Larutan Alkali Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer

Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, dari **Gambar 4.15**, terlihat tidak banyak perbedaan antara kedua perlakuan pada geopolimer sodium dimana larutan alkali yang didiamkan 1 hari menghasilkan kuat tekan mortar 56,00 MPa dan larutan alkali yang tidak didiamkan menghasilkan kuat tekan mortar 56,40 MPa. Namun pada mortar geopolimer potasium terdapat perbedaan yang signifikan antara kedua perlakuan. Sehingga hasil penelitian ini sesuai dengan hasil penelitian Stephanus Peter dan Ferawati Hariyanto (2008).

Pencampuran larutan alkali ke *fly ash* secara seketika setelah pencampuran larutan menyebabkan pelepasan panas (reaksi eksotermis) menyangkut perubahan energi. Suhu yang tinggi ini menyebabkan laju reaksi berlangsung cepat dibandingkan suhu yang lebih rendah. Hal ini dapat terlihat pada **Gambar 4.16**, dimana larutan alkali



Gambar 4.16. Grafik Pengaruh Perlakuan Larutan Alkali Terhadap Waktu Ikut Awal Pasta Geopolimer



Gambar 4.17. Grafik Pengaruh Umur Mortar Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer

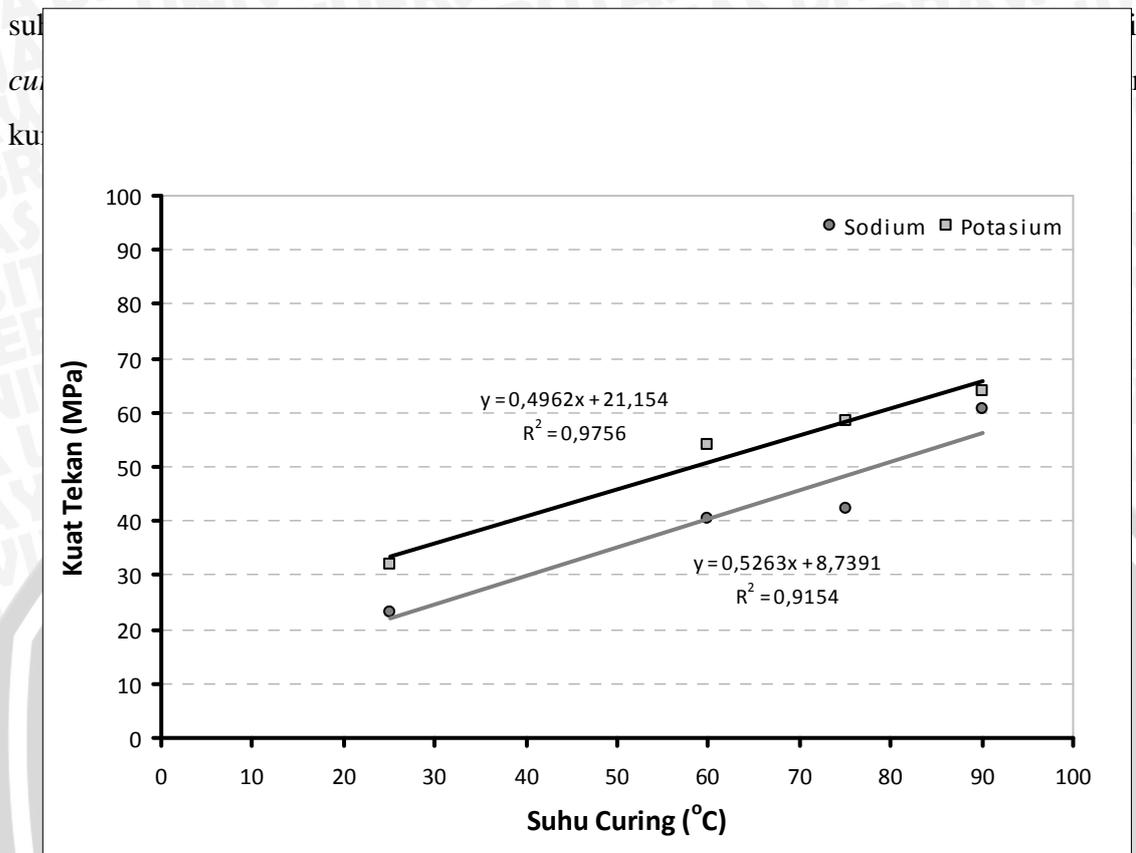
Gambar 4.17. menunjukkan pengaruh umur mortar terhadap kuat tekannya. Dari grafik terlihat bahwa mortar potasium mengalami peningkatan kuat tekan pada umur 14 hari namun pada umur 28 hari mengalami penurunan sedangkan pada mortar sodium mengalami penurunan pada umur 14 hari namun setelah itu mengalami peningkatan hingga umur mortar mencapai 28 hari.

Secara keseluruhan kedua jenis mortar mengalami sedikit peningkatan kuat tekan dari umur 1 hari ke 28 hari. Berbeda dengan beton yang menggunakan semen dimana umur beton sangat mempengaruhi kuat tekannya. Hal ini dikarenakan reaksi kimia pada beton geopolimer adalah reaksi polimerisasi yang terjadi secara cepat (Hardjito dan Rangan, 2004). Namun karena reaksinya yang cepat, beton geopolimer memiliki kelebihan yaitu kuat tekan awal yang tinggi.

4.4.7. Pengaruh Suhu Curing

Mix design 15a, 15b, 15c, dan 15d dibuat untuk mengetahui pengaruh suhu *curing* pada kedua jenis mortar terhadap kuat tekan dan *setting time*-nya. Suhu yang digunakan adalah 90°C, 75°C, 60°C, dan suhu ruang yang berkisar 25°C. Sesudah *d-curing* selama 24 jam, sampel diletakkan pada suhu ruang hingga *testing day*.

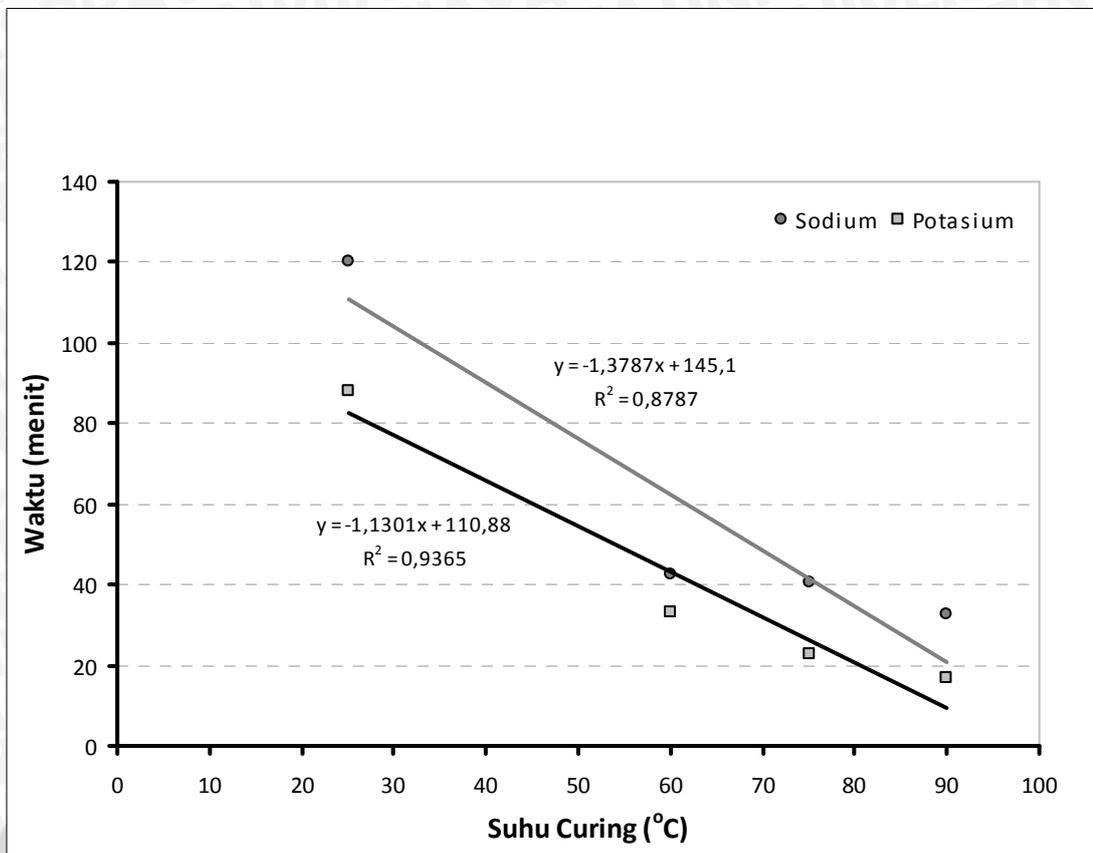
Pada **Gambar 4.18**, terlihat bahwa semakin tinggi suhu *curing* maka akan semakin tinggi pula kuat tekannya untuk kedua jenis mortar. *Curing* mortar dengan



Gambar 4.18. Grafik Pengaruh Suhu *Curing* Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer

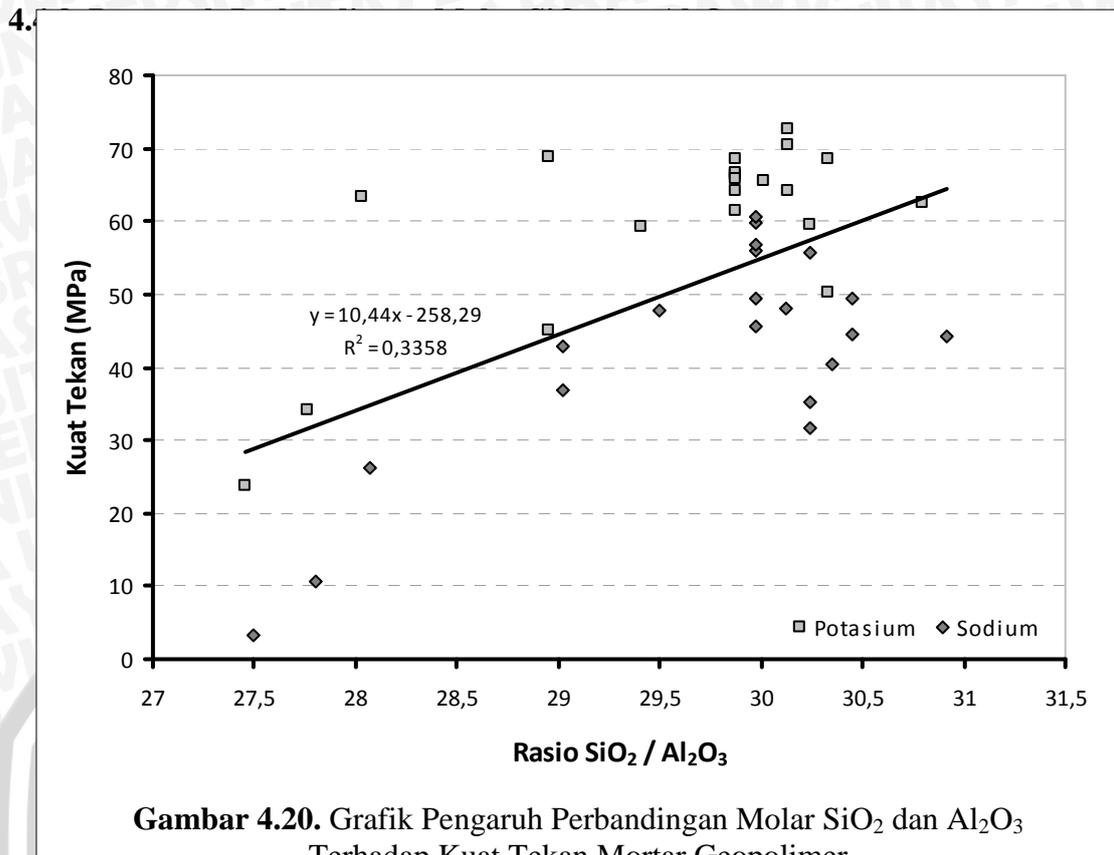
Suhu dalam proses setting beton geopolimer sangat berpengaruh. Terlihat pada **Gambar 4.19**, bahwa pasta geopolimer pada suhu ruang memiliki *initial setting time* hingga 120 menit dan semakin cepat mengeras apabila di-*curing* pada suhu tinggi. Hal ini disebabkan karena suhu yang tinggi akan menyebabkan laju reaksi kimia yang semakin cepat.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Djwantoro Hardjito, Chua Chung Cheak, dan Carrie Ho Lee Ing (2008), *initial* dan *final setting time* beton geopolimer mencapai 129 menit dan 165 menit pada suhu *curing* 80°C. Hasil ini berbeda jauh dengan hasil yang telah didapatkan dimana waktu terlama untuk *initial setting time* adalah 120 menit pada suhu *curing* 25°C. Hal ini disebabkan karena adanya perbedaan kandungan kimia dari material *fly ash* yang digunakan sehingga waktu ikatnya menjadi lebih cepat.



Gambar 4.19. Grafik Pengaruh Suhu *Curing* Terhadap Waktu Ikat Awal Pasta Geopolimer

Dari hasil pengujian suhu *curing* ini, didapatkan kesimpulan bahwa semakin tinggi suhu *curing* akan semakin tinggi pula laju reaksi geopolimerisasi pada kedua jenis mortar geopolimer dan mempercepat pengerasan mortar geopolimer. Sehingga, suhu *curing* berperan penting dalam proses geopolimerisasi untuk kedua jenis mortar.



Dalam reaksi polimerisasi Aluminium (Al) dan Silica (Si) mempunyai peranan penting dalam ikatan polimerisasi. Dari **Gambar 4.20.** terlihat bahwa semakin tinggi rasio molar SiO_2 dan Al_2O_3 maka akan semakin tinggi pula kuat tekan mortar yang dihasilkan karena peranan unsur silikat dan aluminium sangat penting dalam proses polimerisasi. Semakin besar rasio Si / Al karakter polimer semakin terbentuk kuat.

4.5. Mix Design Beton

Berdasarkan pengujian kuat tekan mortar diambil tiap parameter pada pembuatan mortar yang menghasilkan kuat tekan paling maksimum untuk dipakai sebagai *mix design* beton. *Mix design* yang dipakai adalah sebagai berikut:

Tabel 4.16. Komposisi yang Menghasilkan Kuat Tekan Mortar Sodium Maksimum (*Mix Design A*)

Parameter	Nilai
Perbandingan alkali dan <i>fly ash</i>	0,4
Perbandingan OH : Si	1 : 2
Konsentrasi OH	12 molar
Penambahan air (% padatan)	1%
Perlakuan larutan	Tidak didiamkan
Suhu <i>curing</i>	90°C

Tabel 4.17. Komposisi Yang Menghasilkan Kuat Tekan Mortar Potasium Maksimum (*Mix Design B*)

Parameter	Nilai
Perbandingan alkali dan <i>fly ash</i>	0,45
Perbandingan OH : Si	1 : 1
Konsentrasi OH	12 molar
Penambahan air (% padatan)	2,5%
Perlakuan larutan	Didiamkan 1 hari
Suhu <i>curing</i>	90°C

4.6. Hasil Pengujian Beton

Tabel 4.18. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Geopolimer Sodium Umur 28 hari

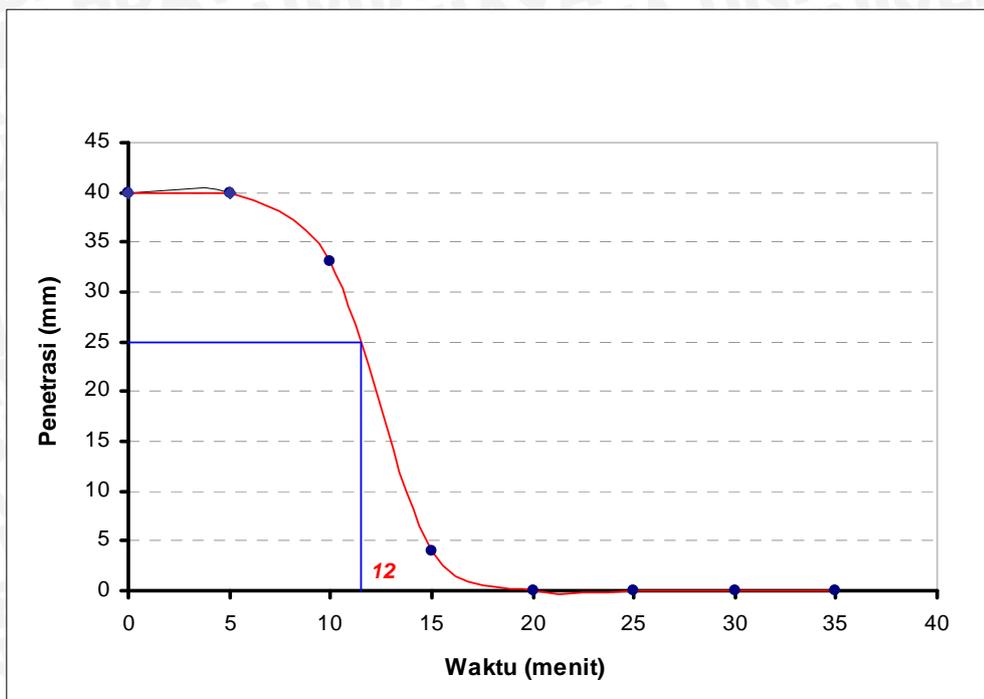
Nomor Beton	Slump	Berat (gram)	Berat jenis (kg/m ³)	Rata-rata (kg/m ³)	Kuat tekan (kN)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
S1	18 cm	2181,2	2712,1	2670,52	133	26,46	32,63
S2		2087,6	2595,7		184	36,61	
S3		2120,8	2637,0		159	31,63	
S4		2168,2	2695,9		188	37,40	
S5		2181,0	2711,9		156	31,04	

Tabel 4.19. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Geopolimer Potasium Umur 28 hari

Nomor Beton	Slump	Berat (gram)	Berat jenis (kg/m ³)	Rata-rata (kg/m ³)	Kuat tekan (kN)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
P1	16 cm	1946,4	2420,1	2485,65	215	42,77	41,34
P2		1998,4	2484,8		220	43,77	
P3		1988	2471,9		199	39,59	
P4		2135,2	2654,9		205	40,78	
P5		1927,4	2396,5		200	39,79	

Tabel 4.20. Hasil Pengujian Waktu Ikut Pasta Geopolimer *Mix Design Sodium (Mix Design A)*

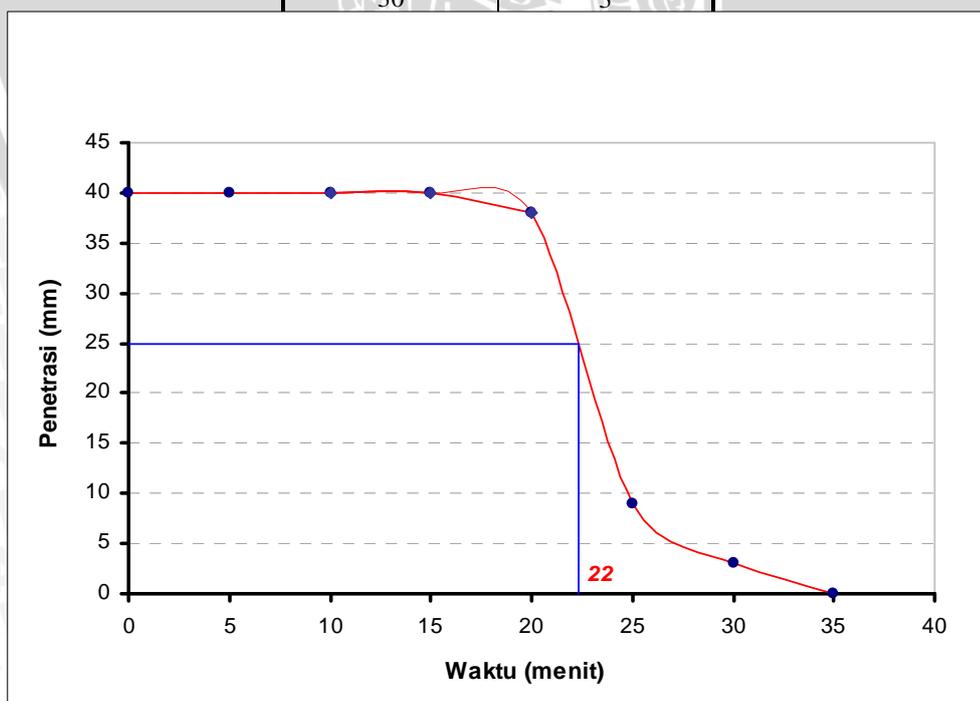
Waktu (menit)	Penetrasi (mm)
0	40
5	40
10	33
15	4
20	0
25	0
30	0
35	0



Gambar 4.21. Grafik Waktu Ikat Mix Design Sodium (*Mix Design A*)

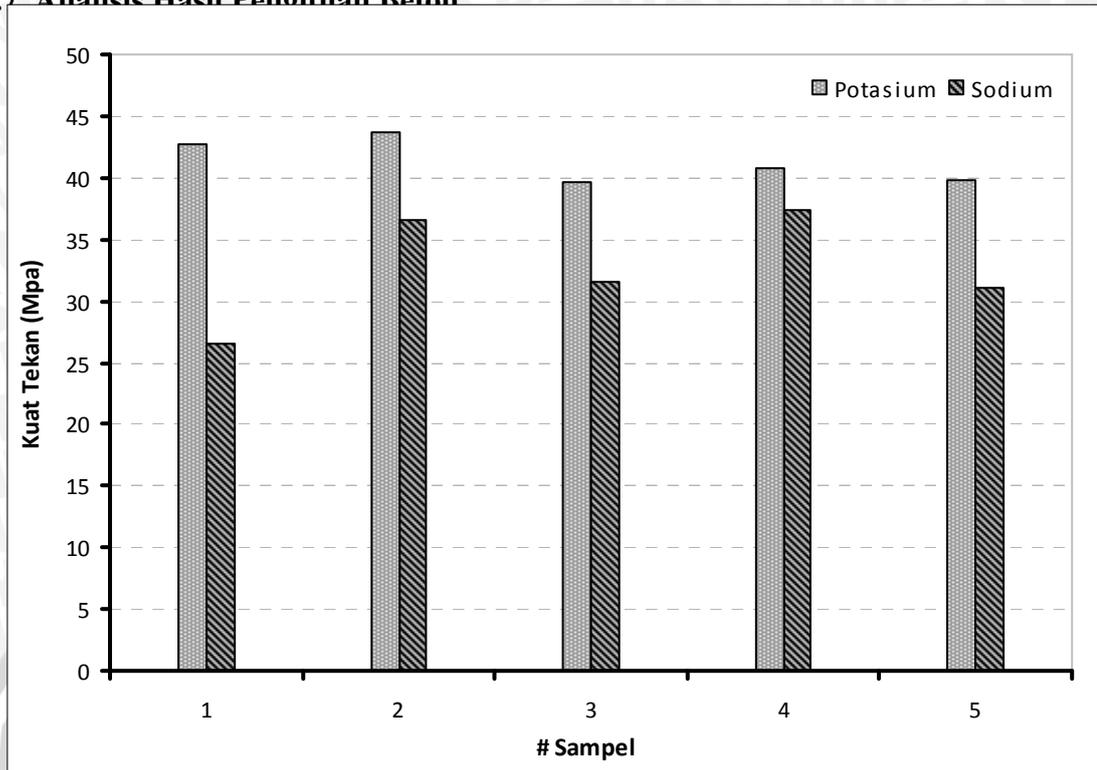
Tabel 4.21. Hasil Pengujian Waktu Ikat Pasta Geopolimer *Mix Design* Potasium (*Mix Design B*)

Waktu (menit)	Penetrasi (mm)
0	40
5	40
10	40
15	40
20	38
25	9
30	3



Gambar 4.22. Grafik Waktu Ikat Mix Design Potasium (*Mix Design B*)

4.7 Analisis Hasil Pengujian Beton



Gambar 4.23. Grafik Perbandingan Kuat Tekan Beton Geopolimer Potasium dan Sodium

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton, kuat tekan beton geopolimer potasium rata-rata yang didapatkan mencapai 41,34 MPa, berbeda jauh dengan hasil kuat tekan mortarnya yang mencapai 76,67 MPa. Hal ini dikarenakan dalam pembuatan beton diperlukan kelecakan yang baik dan waktu ikat yang sesuai. Pada **Gambar 4.22**, terlihat bahwa waktu ikat awal untuk pasta geopolimer potasium yang didapat adalah 22 menit. Waktu ikat ini terlalu cepat karena beton yang terlalu cepat mengeras akan mengakibatkan beton geopolimer akan sulit untuk dikerjakan dan pasta geopolimer sulit untuk mengisi pori-pori di antara agregat serta memperlemah kuat tekannya.

Dalam pengujian beton geopolimer ini, beton geopolimer yang berbahan dasar potasium memiliki kuat tekan yang lebih baik daripada beton geopolimer yang berbahan dasar sodium dan beton geopolimer potasium memiliki waktu ikat pasta yang lebih lama. Perbedaan waktu ikat ini disebabkan adanya perbedaan perlakuan larutan dimana larutan alkali potasium didiamkan terlebih dahulu selama 1 hari sebelum dicampurkan ke *fly ash*. Namun secara keseluruhan hasil pengujian waktu ikat pasta geopolimer potasium jauh lebih cepat dibandingkan waktu ikat pasta geopolimer sodium.

Dari segi waktu ikatnya, beton geopolimer potasium akan sulit untuk diaplikasikan sebagai beton struktural dikarenakan waktu ikatnya yang relatif cepat. Waktu ikat yang terlalu cepat ini akan membuat beton geopolimer sulit untuk mengisi rongga-rongga yang ada di dalam bekisting beton dan menyebabkan kuat tekan beton lebih rendah sehingga diperlukan beberapa solusi untuk memperlambat waktu ikatnya.

Berdasarkan hasil pengujian pada penelitian ini dan penelitian sebelumnya, waktu ikat dapat diperlambat dengan cara:

- a. Menggunakan perbandingan larutan silikat dan larutan hidroksida yang sesuai, semakin tinggi kadar larutan silikat akan menyebabkan waktu ikat semakin cepat.
- b. Menggunakan larutan alkali yang telah didiamkan selama 1 hari sebelum dicampurkan ke dalam *fly ash*.
- c. Menggunakan suhu *curing* yang lebih rendah, namun penggunaan suhu *curing* yang rendah akan mengurangi kuat tekan beton geopolimer sehingga cara ini kurang disarankan.
- d. Menambahkan *superplasticizer* ke dalam campuran beton.

Sedangkan dari segi kuat tekannya, beton geopolimer yang berbahan dasar potasium sudah sesuai untuk digunakan dalam aplikasi struktural. Kuat tekan yang dihasilkan telah setara dengan kuat tekan yang dihasilkan beton PC normal.