

BAB 4

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.5. Persiapan Pembuatan geopolimer

Penelitian ini menggunakan geopolimer abu terbang (GA) dan geopolimer metakaolin (GM). Sebagai bahan pembanding, dibuat pula beton semen Portland (PC). Masing-masing sampel berbentuk kubus berukuran $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$. Sampel disimpan dalam keadaan kering dan perendaman (yaitu perendaman menggunakan aquades dan air laut ASTM). Uji kuat tekan dilakukan pada umur perendaman 7, 28, 56, dan 90 hari masing-masing menggunakan 3 sampel. Jumlah total kebutuhan sampel adalah 36 kubus geopolimer abu terbang, 36 kubus geopolimer metakaolin dan 36 beton Portland. Analisis XRD menggunakan sisa pecahan uji kuat tekan berumur minimal 90 hari (Tabel 4.1).

Tabel 4.1 Jumlah Sampel Kubus yang Diperlukan

Jenis	Uji kuat tekan (perendaman 7, 28, 56, 90 hari)				XRD
	kering	aquades	air laut	jumlah	
GA	12	12	12	36	sis
GM	12	12	12	36	sis
PC	12	12	12	36	-

4.6. Komposisi Kimia Bahan Baku (Abu terbang, Metakaolin, dan Natrium Silikat)

Pembuatan geopolimer dalam penelitian ini menggunakan abu terbang dan metakaolin sebagai bahan utama. Pengetahuan mengenai sifat dan karakteristik kedua bahan baku tersebut dapat menjelaskan sifat geopolimer yang dihasilkan, sehingga dapat dianalisis perbedaan geopolimer yang dihasilkan untuk aplikasi ketahanan air laut.

Karakteristik utama abu terbang dan metakaolin sebagai bahan baku pembuatan geopolimer adalah sifat alumino silikat sehingga unsur Si dan Al perlu diperhatikan dalam analisis komposisi.

4.2.1 Komposisi Abu Terbang

Abu terbang merupakan sisa pembakaran baru bara. Penelitian ini menggunakan abu terbang PLTU Suralaya. Abu terbang berbentuk serbuk, berwarna abu-abu gelap, dan telah diayak menggunakan ayakan no. 200 sehingga tidak ada gumpalan (Gambar 4.1).



Gambar 4. 1
Visual Bahan Penyusun Geopolimer
(Metakaolin, Abu Terbang, Natrium Silikat, dan NaOH)

Abu terbang yang berbentuk serbuk dianalisis menggunakan XRF (*X-Ray Fluorescence*) sehingga diketahui komposisi dalam bentuk oksidanya. Analisis ini dilakukan di Metalurgi sains MIPA UI Salemba. Hasil komposisi XRF dari abu terbang dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Berdasarkan hasil komposisi abu terbang tersebut, ada beberapa hal yang dapat diperhatikan yaitu kandungan Silikon, Alumunium, Kalsium dan Besi. Abu terbang memiliki kandungan yang lebih heterogen dibanding kaolin dan sangat bergantung dari bahan dasar batu bara dan proses pembakarannya. Kandungan silika dan alumina abu terbang cukup tinggi dengan perbandingan molar abu terbang Si/Al adalah 2.2126. Berdasarkan penelitian sebelumnya kuat tekan akan optimal pada perbandingan Si/Al sebesar 2 dan berada pada ambang kewajaran jika besar Si/Al antara 1 sampai 4 (Duxon dkk, 2007b). Pada kenyataannya, tidak semua Si dan Al bereaksi saat bercampur dengan larutan NaOH dan Natrium

silikat. Hanya Si dan Al dalam fasa amorf yang lebih mudah melarut dalam kondisi basa kuat. Kondisi amorf diselidiki berdasarkan difraktogram hasil analisis XRD. Abu terbang Suralaya yang digunakan pada penelitian ini mempunyai fasa amorf yang relatif besar (Gambar 4.2). Hasil difraktogram tersebut kurang baik karena waktu pengukuran yang kurang lama. Namun terlihat satu fasa puncak yang menunjukkan fasa kristalin kuarsa (SiO_2). Sifat amorf dapat diketahui dari bukit (*hump*) pada 2θ antara $20\text{-}30^\circ$. Abu terbang yang amorf lebih reaktif, yaitu mudah mengalami pelarutan Si dan Al oleh larutan alkalin dan pada akhirnya menghasilkan geopolimer yang lebih kuat (Lloyd, dkk, 2009 ; Fernandez-Jimenez, 2007).

Abu terbang yang digunakan memiliki kandungan CaO sebesar 5,15% sehingga dapat disebut abu terbang jenis F, karena kandungan CaO-nya kurang dari 10%. Abu terbang jenis F sangat sesuai digunakan sebagai bahan geopolimer yang diaplikasikan tahan lingkungan agresif. Semakin rendah kadar Ca maka semakin baik digunakan sebagai bahan geopolimer (Hardjito & Rangan, 2005 ; Wallah & Rangan, 2006).

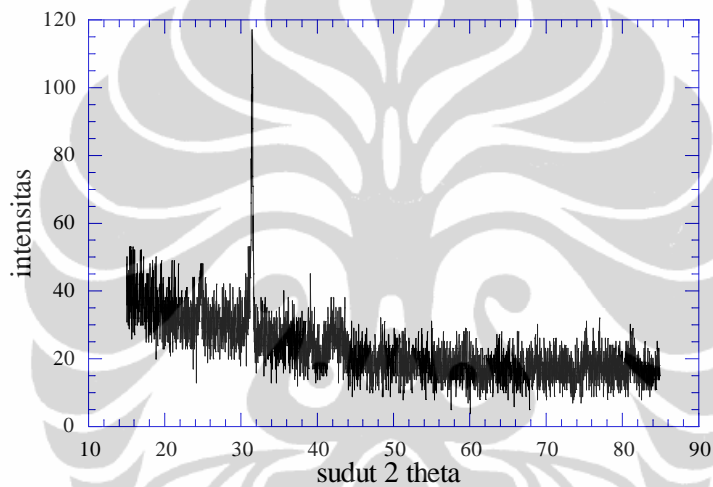
Kandungan lain yang cukup besar pada abu terbang adalah besi yang dinyatakan berbentuk Fe_2O_3 sebesar 16,53%. Besi dapat bereaksi dengan ion hidroksida (OH^-) yang terdapat pada keadaan alkali. Padahal OH^- dari larutan diperlukan untuk pelarutan (*leaching*) Si dan Al dari abu terbang. Besi mengendap kembali sebagai hidroksida atau oksihidroksida. Setelah geopolimer sudah jadi, keberadaan besi tidak mengganggu kestabilan geopolimer (Fernandez-Jimenez & Palamo, 2003 dalam Hardjito & Rangan, 2005). Sisa abu terbang, salah satunya berupa besi, terjebak dalam matriks geopolimer (Lloyd, dkk, 2009; Fernandez-Jimenez, 2007)

Tabel 4.2 Komposisi Kimia Abu Terbang dibanding Kaolin (Hasil XRF)

No	Komponen (bentuk oksidanya)	Berat (%) Abu Terbang	Berat (%) Kaolin
1	Al_2O_3	25.26	42.3029
2	SiO_2	47.2992	55.1546
3	CaO	5.1482	-
4	Fe_2O_3	16.5277	1.0902

5	MgO	2.7074	-
6	MnO	0.1238	-
7	S	0.2969	-
8	K ₂ O	0.7009	1.2419
9	P ₂ O ₅	0.08	-
10	TiO ₂	1.7579	0.2068
11	SrO ₂	0.1743	-
12	V ₂ O ₃	-	0.0037

(Laporan hibah Bersaing 2009)



Gambar 4.2 Pola Difraksi XRD abu terbang Suralaya (Laporan hibah Bersaing 2009)

4.2.2 Komposisi Metakaolin

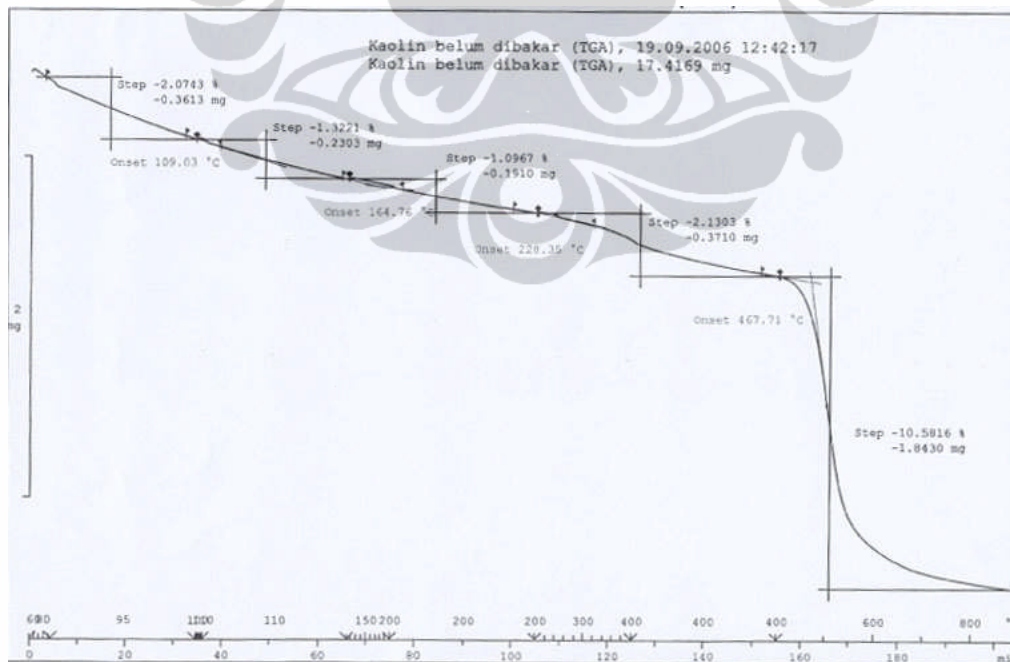
Kaolin merupakan mineral yang bersifat murni silikat dan aluminat disertai sedikit pengotor. Metakaolin yang digunakan pada penelitian ini merupakan kaolin yang dikalsinasi pada temperatur 750°C selama 1-2 jam. Tujuan kalsinasi atau pemanasan tersebut adalah menguapkan H₂O dan pelepasan ikatan -OH pada kaolin sehingga mengubah kaolin yang kristalin menjadi lebih amorf. Oleh karena itu, proses ini disebut dehidroksilasi kaolin.

Penentuan temperatur dehidroksilasi dilakukan berdasarkan analisis termogravimetri (TGA) dari kaolin yang telah dilaporkan dalam Hibah Bersaing 2009 karena kaolin yang digunakan adalah jenis dan waktu pemesanan yang

sama. Hasil analisis termal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan menunjukkan temperatur dehidroksilasi pada minimal ~500 °C.

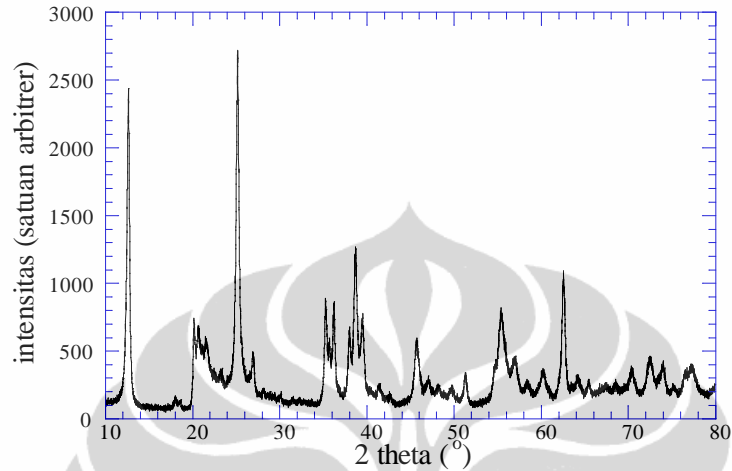
Sifat amorf metakaolin dapat diselidiki dari analisis difraksi sinar X. Pola difraksi sinar X dari kaolin dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan perubahan menjadi lebih amorf dari kaolin yang dikalsinasi dapat dilihat pada Gambar 4.5, terdapat bukit (hump) pada sudut 2θ sekitar $20-30^\circ$ (Lloyd, dkk, 2009). Komposisi kimia kaolin sama dengan metakaolin dan hasil analisis komposisi tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.2 di atas. Dapat dilihat bahwa hampir keseluruhan kaolin adalah SiO_2 dan Al_2O_3 . Sedangkan lainnya dapat dianggap sebagai pengotor. Komposisi metakaolin yang sebagian besar adalah SiO_2 dan Al_2O_3 inilah yang menyebabkan sifat-sifat geopolimer yang dihasilkan memiliki variabel terkontrol.

Bentuk partikel metakaolin adalah serbuk putih, sangat halus, dan berbentuk serpih. Bentuk partikel metakaolin berbeda dari abu terbang yang berbentuk bulat. Bentuk partikel serpih yang padat dan saling menumpuk ketika menjadi geopolimer menjadikan geopolimer berbahan dasar metakaolin memiliki ketahanan serangan kimia lingkungan.

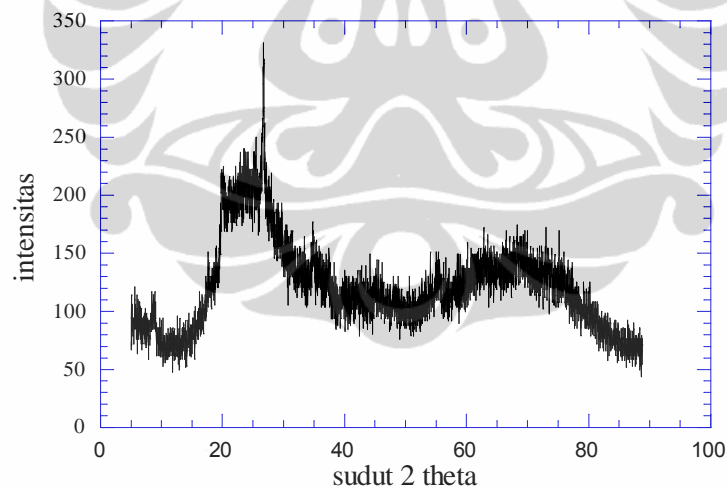


Gambar 4.3 . Analisis termogravimetri (TGA) dari kaolin

(Laporan hibah Bersaing 2009)



Gambar 4.4 Pola difraksi Sinar X dari kaolin (Laporan hibah Bersaing 2009)



Gambar 4.5 Pola difraksi sinar X dari kaolin yang dikalsinasi (Laporan hibah Bersaing 2009)

4.2.3 Komposisi Natrium Silikat

Larutan alkalin atau aktivator yang digunakan untuk pembuatan geopolimer adalah Natrium silikat, NaOH, dan air. Larutan alkalin sering juga disebut larutan aktivator. Natrium silikat dan NaOH adalah jenis teknis (bukan

p.a.) dan didapatkan dari toko kimia Harumsari Jakarta, sedangkan air didapat langsung dari air keran lab Struktur Teknik Sipil FT UI. Natrium silikat merupakan sumber alumino silikat larut sehingga siap berpolimerisasi dengan monomer-monomer yang lain. Natrium silikat sangat berpengaruh memberikan kuat tekan optimum pada geopolimer. Peran penting natrium silikat telah diselidiki sebelumnya dan apabila natrium silikat tidak ada, maka kuat tekan geopolimer akan turun drastis (kolousek dkk,2007). Natrium silikat bermanfaat untuk menaikkan derajat polimerisasi (Duxon dkk 2007a). Komposisi natrium silikat perlu dianalisis karena kandungan air Na Silikat ditentukan dengan menguapkan air sedangkan penentuan komposisi Na dan Si menggunakan analisis AAS dari larutan Na Silikat. Komposisi Na-Silikat hasil AAS dapat dilihat pada lampiran 3 dan diolah lebih lanjut menjadi Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Komposisi Kimia dari Na Silikat (Hasil Analisis AAS)

Molekul	Berat (%)
NaOH	22.0
SiO ₂	46.0
H ₂ O	19.3
lain	12.7

4.7. Pembuatan Geopolimer

Geopolimer yang dibuat dalam penelitian ini menggunakan 2 jenis prekursor , sehingga menghasilkan geopolimer abu terbang dan geopolimer matakaolin. Geopolimer abu terbang dibuat dari abu terbang dan larutan alkalin (NaOH, air, dan Na-Silikat). Pembuatan larutan alkalin harus ditunggu hingga reaksi eksotermis selesai atau temperatur larutan mencapai suhu ruang. Ada beberapa teknis pengerjaan yang perlu diperhatikan dalam pengerjaan geopolimer. Larutan NaOH dapat terkontaminasi oleh CO₂ dari udara yang bersifat asam, sehingga dapat menurunkan pH NaOH. Oleh karena itu, larutan NaOH yang telah dibuat harus disimpan dalam wadah tertutup (Windholtz, 1976). Larutan NaOH konsentrasi tinggi juga dapat melarutkan gelas sehingga digunakan wadah penyimpanan yang terbuat dari plastik.

Larutan natrium silikat dalam jumlah tertentu dicampur dengan larutan NaOH. Natrium silikat merupakan larutan alkalin kuat dan mengandung Na_2O , SiO_2 dan air dalam jumlah tertentu. Campuran larutan natrium silikat dan NaOH ini selanjutnya disebut sebagai larutan alkalin. Komposisi bahan yang digunakan dalam pembuatan geopolimer abu terbang berdasarkan penelitian binder komposisi optimal yang dilakukan sebelumnya oleh Niken Swastika (2007) dan disesuaikan dari pasta menjadi beton.

Beton Geopolimer Metakaolin dibuat dengan cara yang sama dengan geopolimer abu terbang, namun menggunakan komposisi yang berbeda. Hal ini disebabkan workability dari beton basah tidak tercapai. Sehingga komposisi geopolimer metakaolin mengikuti penelitian Kamil Afrizal (2009) dengan pengurangan jumlah air. Bentuk beton geopolimer yang sudah jadi dapat dilihat pada Gambar 4.6.

Gambar 4.7 menunjukkan permukaan patahan kedua jenis geopolimer. Matriks geopolimer dapat menempel dengan kuat pada agregat. Ini menunjukkan bahwa pembuatan geopolimer telah menggunakan metodologi yang tepat dan komposisi yang cukup optimal. Faktor ini juga berpengaruh pada kuat tekan yang tinggi dan ketahanan yang unggul.



Gambar 4.6 Visual Beton Geopolimer abu terbang berwarna abu-abu gelap (kiri) dan metakaolin berwarna putih (kanan)



Gambar 4.7 Permukaan patahan geopolimer abu terbang (kiri) dan geopolimer metakaolin (kanan)

Komposisi bahan penyusun geopolimer berdasarkan perhitungan campuran prekursor dan larutan alkalin. Komposisi tersebut diolah sebagai Rasio Molar (Tabel 4.4) agar geopolimer dengan sifat yang sama dapat disusun dari prekursor atau natrium silikat yang berbeda.

Tabel 4.4 Komposisi Rasio Molar Geopolimer Abu Terbang dan Metakaolin

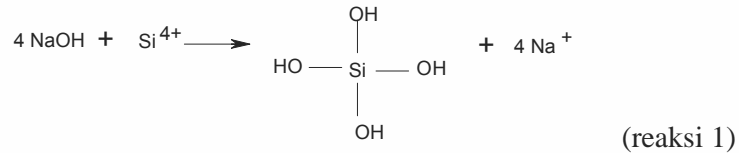
Unsur atau senyawa	Rasio Molar	
	Geopolimer abu terbang	Geopolimer Metakaolin
Na/Al	1.2103	0.5908
Si/Al	1.7414	2.3331
W= H ₂ O/Na ₂ O	8.5648	9.3840
S= SiO ₂ /Na ₂ O	1.0383	1.7840

Beberapa penjelasan mengenai reaksi kimia yang terjadi sehingga serbuk abu terbang dapat mengeras menjadi beton.

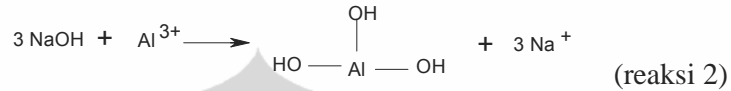
- Disolusi Si dan Al

Proses pertama dalam reaksi geopolimerisasi adalah reaksi antara komponen-komponen silika (SiO₂) dan alumina (Al₂O₃) pada permukaan partikel-partikel abu terbang dengan larutan alkalin. Unsur-unsur Si dan Al mengalami disolusi dalam larutan alkalin pekat dan menghasilkan monomer-monomer yang diperlukan untuk pembentukan rantai geopolimer sebagaimana digambarkan oleh reaksi 1 dan 2.

Disolusi Si:



Disolusi Al:



(Zongjin Li dkk, 2001).

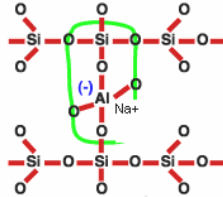
Bentuk amorf lebih mudah mengalami pelarutan daripada bentuk kristalin. Hal ini disebabkan bentuk kristal adalah bentuk yang kompak dan mempunyai ikatan yang lebih sulit ditembus nukleofil sehingga tidak seluruh molekul Si dan Al mengalami pelarutan. Abu terbang mempunyai bentuk yang lebih amorf dibanding mineral lain seperti kaolinit dan albit (Xu *et al*, 2002). Abu terbang Suralaya yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai fasa yang relatif amorf.

- Geopolimerisasi

Proses yang terjadi setelah pelarutan silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) adalah geopolimerisasi yaitu polimerisasi oligomer-oligomer aluminosilikat membentuk gel aluminosilikat yang amorf. Jalan polimerisasi yang berbeda dapat menciptakan ion kluster yang berbeda sehingga hasilnya juga berbeda. Polimerisasi dari oligomer-oligomer ini terjadi secara tidak teratur atau amorf.

Davidovits (1991) menyatakan bahwa geopolimer yang berasal dari abu terbang mengandung rantai Si-O-Al dengan tetrahedra SiO_4 dan AlO_4 yang tersambung secara bergantian dengan menggunakan semua unsur oksigennya. Fakta bahwa unsur Al memiliki koordinasi 4 dengan unsur O, membuat ketidakseimbangan muatan negatif dalam struktur geopolimer. Karena itu kehadiran kation-kation seperti K^+ , Na^+ dan Ca^{2+} berperan penting untuk tetap mempertahankan kenetralan muatan di dalam

matriks geopolimer tersebut. Ikatan yang terjadi dalam geopolimer digambarkan dalam Gambar 4.8.



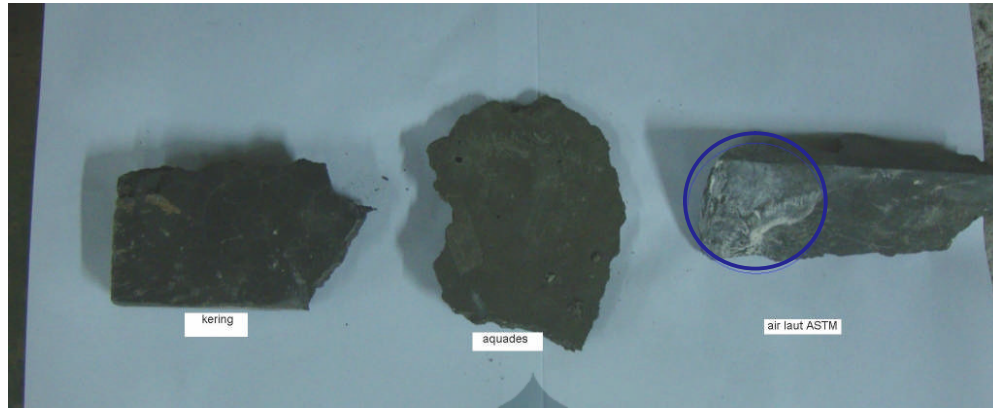
Gambar 4.8: Ikatan Al dan Si pada geopolimer (Davidovits, 2008)

Reaksi geopolimerisasi bersifat eksotermik seperti digambarkan kurva termograf selama proses *curing*. Geopolimerisasi sesungguhnya terus berlangsung dalam waktu yang lama namun sifat eksotermiknya menurun secara eksponensial. Naiknya nilai kuat tekan hingga mencapai nilai maksimum sebagai fungsi usia disebabkan solidifikasi (restrukturisasi ikatan jaringan) yang terus berlangsung (Subaer, 2004). Mekanisme reaksi geopolimerisasi yang diajukan oleh beberapa peneliti berkisar antara pelarutan, transportasi, orientasi dan reprecipitasi (pengendapan kembali) (Lee & Van Deventer, 2002; Panias, 2006; Provis, 2005; Van Deventer, 2006).

4.8. Perbedaan Sifat Geopolimer Abu Terbang dan Geopolimer Metakaolin

4.6.1 Perbedaan visual permukaan beton

Gambar 4.9 menunjukkan bahwa geopolimer abu terbang berwarna abu-abu gelap dan tidak ditemukan retakan pada permukaannya. Selain itu geopolimer abu terbang kondisi kering dan hasil rendaman aquades tidak menunjukkan perbedaan visual, sedangkan hasil rendaman air laut terdapat endapan garam putih. Gambar 4.10 menggambarkan endapan putih tersebut menyelimuti bagian bawah beton.

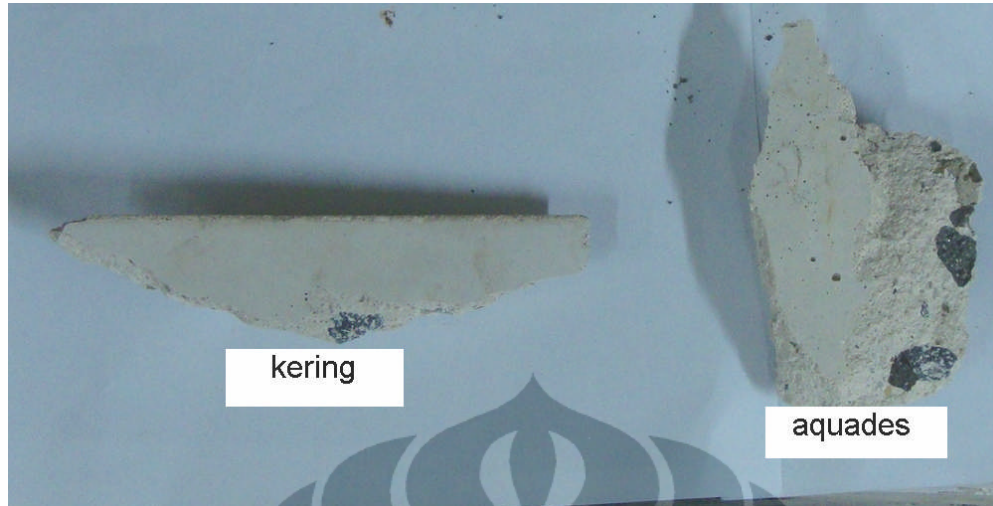


Gambar 4.9 Perbedaan visual pecahan geopolimer abu terbang: kondisi kering (kiri), hasil rendaman aquades (tengah), dan air laut ASTM (kanan)



Gambar 4.10 Visual Permukaan Geopolimer Abu Terbang yang telah Direndam Dalam Air Laut ASTM Selama 90 Hari

Geopolimer metakaolin memiliki warna coklat muda. Geopolimer yang direndam dalam aquades tidak mengalami perubahan warna seperti dapat dilihat pada Gambar 4.11 Perendaman air laut ASTM menyebabkan menempelnya bercak putih pada permukaan geopolimer (Gambar 4.112). Geopolimer yang terbuat dari abu terbang maupun metakaolin memiliki fenomena yang sama. Dampak dari perendaman air laut dapat diselidiki dari perubahan kuat tekan selama perendaman



Gambar 4.11 Permukaan geopolimer metakaolin kering (kiri) dan aquades (kanan) tidak menunjukkan perubahan warna



Gambar 4.12 Visual permukaan bawah geopolimer metakaolin terdapat endapan putih yang melekat

Pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.12 menunjukkan bercak putih yang terdapat pada permukaan geopolimer, baik abu terbang maupun metakaolin, kemungkinan besar adalah deposit gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Bukti lebih lanjut mengenai keberadaan gipsum diselidiki lebih lanjut menggunakan analisis XRD.

4.6.2 Perubahan Kuat Tekan Selama Perendaman

Ada beberapa efek dari beton yang ditempatkan dalam air laut yang terjadi, diantaranya membasah dan mengering, pelarutan, variasi temperatur, korosi baja penguat, gempuran ombak, serangan sulfat, serta membeku dan mencair. Penelitian ini menggunakan air laut sesuai ASTM D1141-90 dalam wadah tertutup, artinya faktor yang memberikan efek terhadap beton hanya pembasahan, serangan sulfat dan klorida.

Larutan apapun yang mengandung sulfat dapat bereaksi dengan C_3A (tricalcium Aluminate) yang terdapat dalam semen. Reaksi ini menghasilkan kalsium sulfoaluminat dan mengakibatkan peningkatan volume beton dan retakan yang merugikan. Retakan terjadi pada titik lemah, seperti sudut dan permukaan (Raina, 1989).

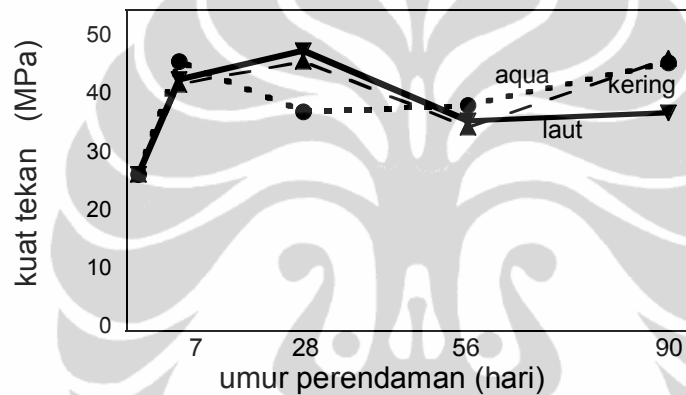
Salah satu sifat geopolimer yang dapat dipakai sebagai tolak ukur ketahanan beton konstruksi adalah kuat tekan (*compressive strength*). Beton yang telah disimpan selama masa *curing* direndam dalam aquades, air laut ASTM, dan kondisi kering. Perubahan sifat yang terjadi selama perendaman dikontrol dengan mengukur kuat tekan masing-masing pada umur perendaman 7, 28, 56, dan 90 hari.

Hasil kuat tekan seluruh beton menggunakan 3 sampel untuk setiap titik dan dilampirkan pada lampiran 2. Kuat tekan geopolimer abu terbang dibandingkan beton PC dijabarkan pada Tabel 4.5. Perubahan kuat tekan selama perendaman digambarkan pada Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 untuk masing-masing geopolimer abu terbang dan beton PC. Awal perendaman (waktu perendaman=0) menunjukkan beton sudah selesai dicuring. Curing beton geopolimer abu terbang adalah 14 hari keadaan kering dan curing beton Portland adalah 28 hari dalam bak perendam.

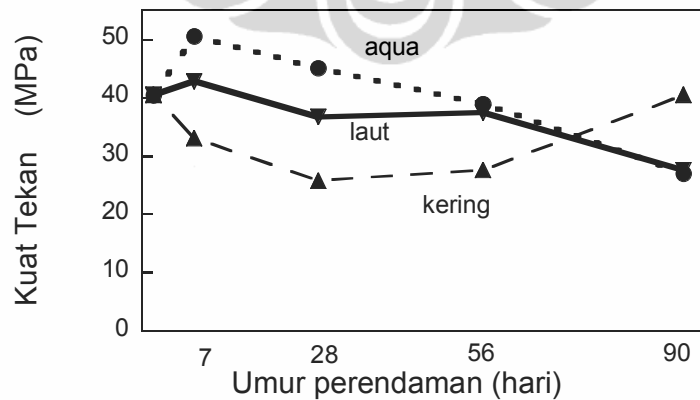
Tabel 4.5 Kuat Tekan Geopolimer Abu Terbang Dibandingkan Beton PC(diolah dari Lampiran 2)

Perendam	Umur (hari)	Kuat tekan rata-rata (MPa)	
		Geopolimer Abu terbang	Beton Portland Cement
Curing	0	26.89	40.44
kering	7	42.26	33.00

	28	46.22	25.63
	56	34.89	27.56
	90	46.70	40.44
Aquades	7	46.22	50.48
	28	37.63	45.06
	56	38.70	38.89
	90	45.96	26.96
Air Laut ASTM	7	43.04	42.74
	28	48.04	36.63
	56	36.00	37.41
	90	37.41	27.52



Gambar 4.13 Kuat tekan geopolimer abu terbang setelah direndam air laut ASTM dibandingkan rendaman aquades dan kondisi kering (tanpa perendaman)



Gambar 4.14
Kuat tekan beton PC setelah direndam air laut ASTM dibandingkan rendaman aquades dan kondisi kering (tanpa perendaman)

Bandingkan kuat tekan antara geopolimer abu terbang pada Gambar 4.13 dan beton Portland pada Gambar 4.14. Gambar 4.13 menunjukkan kuat tekan beton geopolimer setelah direndam dalam air laut ASTM dibanding rendaman aquades dan kering, masing-masing selama 7, 28,56, dan 90 hari. Dapat dilihat bahwa sampai umur perendaman 56 hari, sifat geopolimer dalam air laut cenderung sama dengan kondisi normalnya. Setelah itu, besar kemungkinan kuat tekannya stabil. Apabila hasil kuat tekan geopolimer tersebut dibandingkan dengan beton Portland, maka geopolimer abu terbang memiliki kelebihan dibandingkan dengan semen portland yang kuat tekannya cenderung menurun selama berada dalam air laut ASTM (Gambar 4.14).

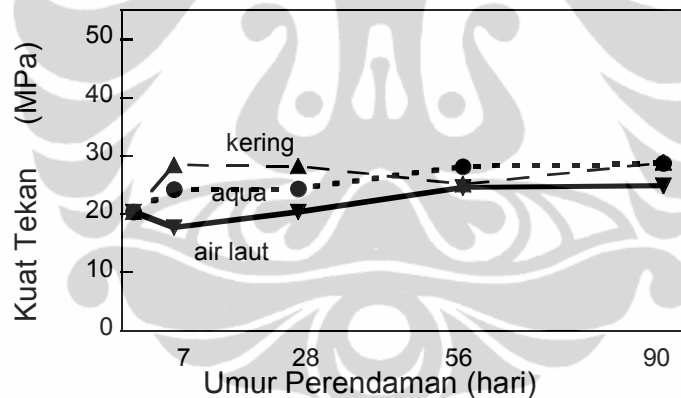
Beton Portland mampu mengeras dan menyatukan bahan-bahan padat karena terjadi reaksi hidrasi antara senyawa-senyawa semen dengan air. Senyawa yang terkandung dalam semen adalah C_2S , C_3S , C_3A , C_4AF . Salah satu senyawa yang terdapat dalam semen adalah C_3A (trikalsium aluminat) rentan serangan kimia, pada air laut adalah ion klorida dan sulfat. Hal ini menyebabkan beton Portland pada lingkungan air laut akan mengalami penurunan kuat tekan (Gambar 4.14). Keberadaan C_3A pada semen Portland tidak dapat dihindari, walaupun dapat diminimalisir.

Geopolimer metakaolin dibuat dengan cara yang sama dengan geopolimer abu terbang tetapi menggunakan larutan alkalin ($NaOH$, air dan Na Silikat) lebih banyak. Hal ini disebabkan kalsinasi kaolin menjadi metakaolin yang berlangsung 2 jam, bisa jadi kurang lama sehingga dehidroksilasi kurang sempurna. Hal ini juga menjadi penyebab kuat tekan geopolimer metakaolin setelah selesai dicuring lebih rendah dibandingkan kuat tekan yang ditargetkan.

Sifat geopolimer metakaolin terhadap paparan air laut ASTM dapat dihubungkan dengan komposisi metakaolin yang relatif lebih murni daripada abu terbang. Bahkan metakaolin tidak mengandung unsur kalsium sehingga kuat tekan geopolimer metakaolin setelah direndam air laut ASTM cenderung mengalami kenaikan kuat tekan yang stabil seperti diperlihatkan Gambar 4.15. Awal perendaman (waktu perendaman=0) menunjukkan beton sudah selesai dicuring. Curing beton geopolimer metakaolin adalah 7 hari keadaan kering

Tabel 4.6 Kuat Tekan Geopolimer Metakaolin (diolah dari Lampiran 2)

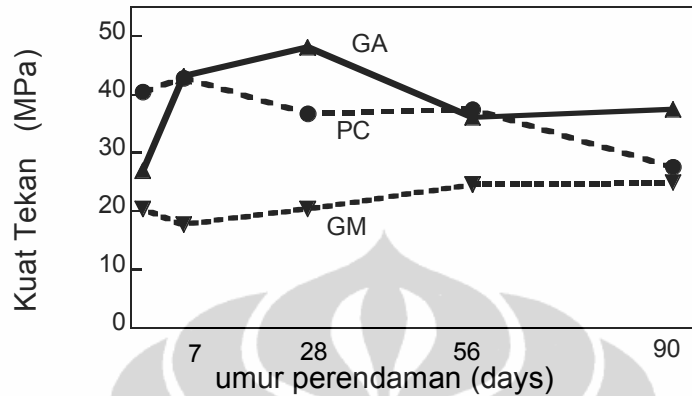
Perendam	Umur (hari)	Kuat tekan rata-rata (MPa)	
		Geopolimer Metakaolin	Geopolimer Abu terbang
Curing	0	20.37	26.89
kering	7	28.41	42.26
	28	28.11	46.22
	56	24.99	34.89
	90	28.81	46.70
Aquades	7	24.15	46.22
	28	24.30	37.63
	56	28.00	38.70
	90	28.70	45.96
Air Laut ASTM	7	17.60	43.04
	28	20.33	48.04
	56	24.52	36.00
	90	24.81	37.41



Gambar 4.15 Kuat Tekan Geopolimer Metakaolin Setelah perendaman

Kuat tekan ketiga jenis beton dalam rendaman air laut ASTM digambarkan pada Gambar 4.16. Dapat dilihat bahwa beton portland mempunyai kuat tekan awal yang optimal, namun mengalami penurunan kekuatan selama berada pada air laut ASTM. Geopolimer abu terbang memiliki kuat tekan awal yang rendah, namun mencapai kuat tekan target setelah 14 hari curing ditambah 7 hari aplikasi. Perilaku geopolimer abu terbang dalam air laut cenderung konstan setelah 56 hari perendaman. Geopolimer metakaolin memiliki kuat tekan awal paling rendah yang bisa disebabkan kurang reaktifnya metakaolin. Namun

geopolimer metakaolin terbukti terus mengalami kenaikan kekuatan, walaupun direndam dalam air laut ASTM.



Gambar 4.16 Perubahan Kuat Tekan Setelah direndam air laut ASTM untuk geopolimer abu terbang(GA), metakaolin (GM) dan beton Portland (PC)

4.6.3 Unsur yang larut dalam larutan perendam

Geopolimer abu terbang dan metakaolin masing-masing direndam dalam aquades dan air laut ASTM dalam wadah perendam yang berbeda. Oleh karena itu, hasil rendamannya merupakan data kualitatif dari perubahan senyawa pada perendam akibat kontak dengan geopolimer. Ion atau unsur yang larut dalam perendam dapat ditentukan dengan analisis AAS.

Unsur yang larut dalam rendaman dapat berasal dari komponen bahan geopolimer yang tidak bereaksi (kimiawi) atau tidak terikat (fisik) selama proses geopolimerisasi. Kemungkinan yang lain adalah berkurangnya ion atau unsur dari air laut ASTM yang terabsorpsi ke dalam beton. Gambar 4.17 memperlihatkan rendaman geopolimer metakaolin lebih keruh dibandingkan geopolimer abu terbang. Hal ini sejalan dengan kuat tekan awal geopolimer metakaolin yang rendah. Bukti visual ini menegaskan bahwa reaksi geopolimerisasi belum terjadi secara optimal disebabkan karena kurang reaktifnya metakaolin atau kurang tepatnya larutan alkalin yang ditambahkan saat pembuatan geopolimer metakaolin. Rendaman aquades memperlihatkan warna yang lebih keruh. Ini menunjukkan bahwa aquades juga mampu melarutkan beberapa unsur dalam geopolimer



Gambar 4.17 Perbandingan Hasil Rendaman Geopolimer Abu Terbang (GA) dan Geopolimer Metakaolin(GM)

Tabel 4.7 Unsur yang Terlarut pada Rendaman Geopolimer (Hasil AAS)

Unsur terlarut	Jumlah unsur yang terlarut (g/g)				
	Air laut ASTM	Geopolimer Abu terbang		Geopolimer Metakaolin	
		aquades	Air laut	aquades	Air laut
Na	0.010543	0.0021	0.0138	0.0025	0.0138
Fe	-	$9.70 \cdot 10^{-6}$	$1.77 \cdot 10^{-6}$	$1.35 \cdot 10^{-6}$	td
Ca	$418 \cdot 10^{-6}$	$54.80 \cdot 10^{-6}$	$126.1 \cdot 10^{-6}$	td	td

Ket: td= tidak diukur

Hasil rendaman yang telah digunakan untuk merendam geopolimer selama 90 hari menunjukkan unsur yang dikeluarkan atau diserap oleh geopolimer dan dapat dianalisa AAS (Lampiran 4). Tabel 4.7 adalah hasil analisis AAS dari masing-masing larutan perendam. Unsur Natrium (Na) yang larut dari geopolimer abu terbang dan metakaolin cenderung sama, masing-masing pada aquades dan air laut. Pada perendaman aquades, unsur Na berasal dari larutan alkalin yang tidak bereaksi selama proses geopolimerisasi dan tersisa sebagai serbuk Na_2O . Apabila

geopolimer dilarutkan dalam air, maka Na_2O yang reaktif dalam air menjadi larut dalam aquades. Selain itu, jumlah Na yang larut dari geopolimer metakaolin lebih banyak daripada geopolimer abu terbang disebabkan karena NaOH yang digunakan saat pembuatan juga relatif lebih banyak. Pada perendaman air laut, unsur Na juga disumbangkan oleh bahan pembuat air laut.

Abu terbang kering mengandung Fe yang cukup besar, yaitu 16,5277 %. Fe yang larut pada geopolimer metakaolin lebih rendah dibandingkan pada hasil rendaman geopolimer abu terbang (Tabel 4.7). Hal ini disebabkan serbuk abu terbang lebih banyak mengandung Fe dibandingkan serbuk metakaolin (Tabel 4.2). Fe pada abu terbang dapat bereaksi dengan ion hidroksida (OH^-) yang terdapat pada keadaan alkali. Besi mengendap kembali sebagai hidroksida atau oksihidroksida di dalam beton. Setelah geopolimer sudah jadi, keberadaan besi tidak mengganggu kestabilan geopolimer kering (Fernandez-Jimenez & Palamo, 2003 dalam Hardjito & Rangan, 2005). Saat beton direndam, konsentrasi Fe dalam aquades lebih tinggi sesuai teori kelarutan. Suatu bahan lebih mudah larut dalam konsentrasi yang lebih rendah.

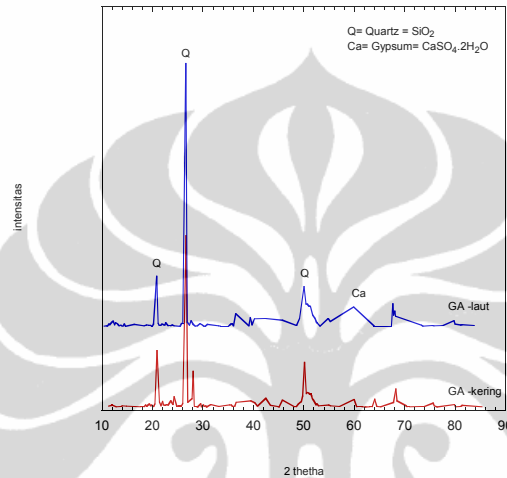
Proses geopolimerisasi metakaolin kurang sempurna sehingga matriks geopolimer metakaolin tidak mampu menjebak seluruh partikel yang tidak bereaksi. Serbuk abu terbang mengandung Ca rendah yaitu 5,15 %, dan serbuk metakaolin tidak mengandung Ca. Tabel 4.7 menunjukkan apabila beton geopolimer metakaolin direndam dalam aquades, maka Ca yang larut adalah 54,8 ppm. Sedangkan geopolimer abu terbang yang direndam dalam air laut, maka Ca yang terkandung dalam air laut berkurang.

4.6.4 Analisis XRD

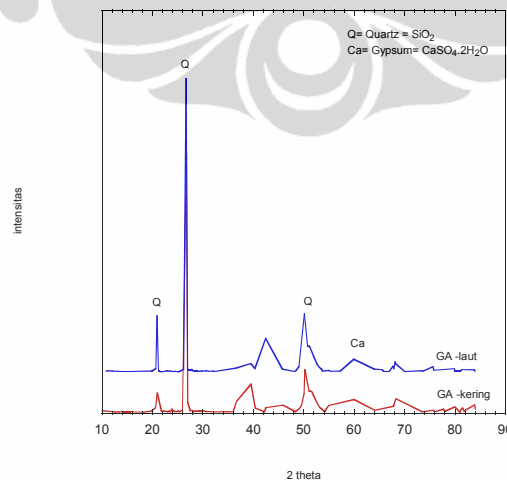
Gambar 4.17 dan Gambar 4.18 di bawah ini merupakan hasil analisa difraksi sinar-X (XRD) dari geopolimer abu terbang dan geopolimer metakaolin yang masing-masing telah direndam dalam air laut dan kondisi kering selama 90 hari. Analisis difraksi sinar X memperlihatkan perubahan fasa yang terjadi apabila beton mengalami perendaman air laut.

Fasa utama dari kedua geopolimer tersebut adalah kuarsa (SiO_2) yang memberikan puncak paling tinggi pada 2θ sekitar 26.6° ; 20.8° ; dan 50.1° .

Geopolimer memang mengandung kuarsa. Fasa yang mengalami kenaikan intensitas adalah gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Temuan mengenai endapan putih juga pernah dianalisis oleh Song dkk (2005) yang merendam geopolimer abu terbang dalam sulfat 10%.



Gambar 4.17 Pola Difraksi Geopolimer Abu Terbang Setelah Perendaman Air Laut (Atas) Dibandingkan Dengan Kering (Bawah)



Gambar 4.18 Pola Difraksi Geopolimer Metakaolin Setelah Perendaman Air Laut (Atas) Dibandingkan Dengan Kering (Bawah)

4.7 Analisis Faktor yang Mempengaruhi Ketahanan Geopolimer

Ketahanan geopolimer erat kaitannya dengan pembuatan beton yang lebih berkualitas. Faktor teknis pembuatan sehingga menghasilkan beton yang solid dan meminimalisir rongga dalam beton. Pembuatan geopolimer dari bahan dengan kualitas dan jumlah yang tepat juga mempengaruhi ketahanan geopolimer, artinya reaksi geopolimerisasi harus berlangsung secara optimal. Pada akhirnya, semua partikel dalam beton terikat kuat dalam matriks geopolimer. Selain itu, pemilihan prekursor juga mempengaruhi ketahanan geopolimer.

Lemahnya ketahanan semen Portland untuk aplikasi air laut disebabkan oleh keberadaan komponen C_3A (trikalsium Aluminat) yang rentan terhadap serangan kimia (Raina, 1989). kandungan C_3A tidak dapat dihilangkan dari semen, namun dapat dikurangi saja. Ini disebabkan kalsium merupakan unsur penting dalam pengerasan beton Portland

Geopolimer mengalami pengerasan disebabkan reaksi geopolimerisasi. Namun demikian, keberadaan unsur kalsium masih ada sebagai kandungan abu terbang tetapi metakaolin tidak mengandung kalsium. Efek keberadaan kalsium terhadap sifat-sifat geopolimer telah diselidiki dalam penelitian sebelumnya. Kalsium tinggi (biasanya ada dalam abu terbang jenis C) dapat mempercepat pengerasan awal geopolimer (dalam satuan menit hingga jam) namun memiliki kuat tekan yang rendah dan ketahanan (*durability*) yang rendah terhadap lingkungan (Hardjito & Rangan 2005). Penyelidikan lebih lanjut mengenai efek kandungan kalsium terhadap ketahanan geopolimer dapat dilakukan dengan memvariasikan jumlah kalsium.

Efek keberadaan kalsium juga dapat dilihat dalam penelitian ini. Metakaolin merupakan prekursor yang tidak mengandung unsur kalsium. Oleh karena itu, geopolimer metakaolin cenderung tidak dipengaruhi oleh korosi air laut. Abu terbang yang digunakan dalam penelitian ini adalah abu terbang jenis F (kandungan Ca rendah). Hal ini juga bertujuan untuk mendapatkan ketahanan geopolimer abu terbang terhadap air laut.

Keunggulan lain dari geopolimer metakaolin adalah bentuk partikelnya berupa serpihan, yang apabila saling menumpuk, menghasilkan penataan yang lebih solid. Hal ini menghambat absorpsi geopolimer metakaolin. Bandingkan

dengan abu terbang yang memiliki bentuk partikel berupa bulat sehingga penataannya relatif kurang teratur.

4.8 Perbandingan Harga

Geopolimer memiliki berbagai kelebihan, diantaranya lebih tahan terhadap air laut, serangan sulfat, dan waktu pengerjaan yang jauh lebih cepat. Pertimbangan lain dalam aplikasi geopolimer adalah harga. Tabel dibawah ini memperlihatkan harga ketiga jenis material yang digunakan. Perhitungan tersebut tidak mempertimbangkan penggunaan agregat pasir dan kerikil. Tabel 4.8 menunjukkan perhitungan harga beton portland yang relatif murah. Harga geopolimer abu terbang ternyata dua kali lebih mahal daripada beton Portland (Tabel 4.9) untuk mjencaapai kuat tekan yang sama, yaitu 40 Mpa. Harga geopolimer metakaolin dua kali lebih mahal daripada geopolimer abu terbang (Tabel 4.10). Padahal bahan utama berupa abu terbang dan metakaolin sangat murah. Namun penggunaan larutan alkalin atau aktivator membuat harga beton geopolimer menjadi relatif mahal. Apabila beton geopolimer ingin dibuat lebih ekonomis, maka penggunaan larutan alkalin dapat dikurangi walaupun akan mereduksi kekuatannya. Pada kenyataannya, aplikasi di lapangan banyak yang membutuhkan kuat tekan rendah.

Tabel 4.8 Perhitungan Harga Beton Portland

Bahan	Kg/M ³	Harga (Rp)	Total Harga (Rp)
semen	501.532	1,000.00	501,532.00
air	186.96		-
Agr. Pasir	650.809		-
Agr. Kasar	1037.508		-
Total			501,532.00

Tabel 4.9 Perhitungan Harga Beton Geopolimer abu terbang

Bahan	Kg/M ³	Harga /Kg (Rp)	Total Harga (Rp)
fly ash	xxx	-	-
NaOH	xxx	13,500.00	xxx
Na- Silikat	xxx	7,000.00	xxx
air	xxx	-	-
Agr. Pasir	xxx	-	-
Agr.Kasar	xxx	-	-
Total			1,246,074.93

Ket: xxx= nilai tidak diperlihatkan

Tabel 4.10 Perhitungan Harga Beton Geopolimer abu terbang

Bahan	Kg/M ³	Harga /Kg (Rp)	Total Harga (Rp)
metakaolin	xxx	2,300.00	xxx
NaOH	xxx	13,500.00	xxx
Na- Silikat	xxx	7,000.00	xxx
air	xxx	-	-
Agr. Pasir	xxx	-	-
Agr. Kasar	xxx	-	-
Total			2,792,948.92

Ket: xxx= nilai tidak diperlihatkan