

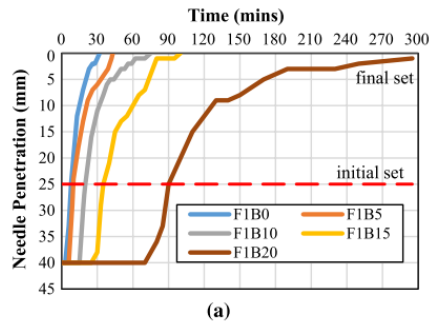
BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

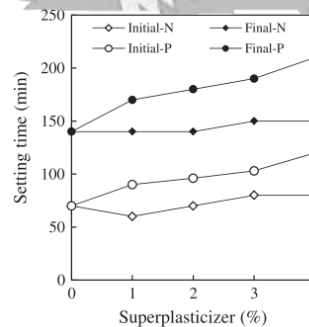
Beton geopolimer merupakan beton yang menggantikan semen Portland pada beton konvensional dengan semen geopolimer. Davidovits mengatakan bahwa semen geopolimer adalah material yang inovatif dan alternatif dari semen konvensional. Terbentuk dari material alam yang diproses secara minimal maupun limbah industri, menghasilkan berkurangnya jejak karbon (Davidovits, 2013). Waktu pengerasan beton geopolimer menjadi salah satu faktor yang sangat penting dalam perencanaan pembangunan menggunakan beton geopolimer. ASTM C150 menyatakan minimum waktu beton mengeras adalah 45 menit sehingga pengerjaan pengecoran dapat terlaksana sebelum beton mengeras. Pengerasan yang terlalu cepat dapat mengakibatkan pelaksanaan pengecoran gagal, atau bahkan tidak dapat dilaksanakan. Pengecoran baiknya dilakukan saat kondisi campuran beton geopolimer masih cair karena jika campurannya mulai mengeras, bisa timbul lubang udara dalam beton karena gelembung udara tidak sempat keluar sebelum beton mengeras. Jika campuran beton geopolimer mengeras sebelum pelaksanaan pengecoran, pengecoran tidak bisa dijalankan karena campuran tidak dapat dituang. Karena itu sangat penting menghindari beton geopolimer mengeras sebelum diselesaikannya pengecoran. Untuk menghindari terjadinya pengerasan yang terlalu cepat, “bisa dihindari dengan menggunakan secara benar bahan tambah tipe *retarding* yang memiliki fungsi untuk menunda *setting*” (Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan, 2016).

Retarder merupakan bahan yang memiliki sifat *retarding*. Namun pemakaian *retarder* yang biasa dipakai pada beton konvensional belum tentu efektif terhadap beton geopolimer karena bedanya mekanisme pengerasan yang terjadi (Liu et al., 2017). Boraks menjadi salah satu bahan penambah yang diketahui dapat menjadi *retarder* terhadap beton geopolimer. Antoni et al., meneliti bahwa penambahan boraks pada beton geopolimer berbasis abu terbang dan mendapatkan bahwa boraks memiliki efek *retarding* terhadap beton geopolimer.



Gambar 1.1 Pengaruh Boraks Terhadap Waktu Pengerasa Beton Geopopimer Berbasis Abu Terbang (Antoni et al., 2020)

Superplasticizer merupakan bahan penambah yang sering dipakai dalam pengecoran beton untuk meningkatkan *workability* dan sebagai *water reducer*, terutama pada beton *Ultra High-Performance Concrete (UHPC)* di mana *workability* sangat rendah. Namun walaupun *superplasticizer* merupakan bahan penambah yang bertujuan meningkatkan *workability* beton dan bukan memperlambat pengerasan beton, Jang et al., menemui bahwa walaupun *superplasticizer* berbasis *naphthalene* tidak mempengaruhi waktu pengerasan, namun *superplasticizer* berbasis *polycarboxylate* dapat memperlambat waktu pengerasan beton geopolimer.



Gambar 1.2 Pengaruh *SP Polycarboxylate* dan *Nepthalene* terhadap Waktu Pengerasan

Penelitian ini meneliti pencampuran bahan penambah (*admixture*) dalam beton geopolimer untuk melihat efek dari bahan penambah terhadap waktu pengerasan, khususnya pada bahan penambah boraks dan *superplasticizer* berbasis *polycarboxylate* dengan penambahan sebesar 1%, 2%, 3%, dan 4% dari massa abu terbang dan membandingkan pengaruh dari kedua bahan penambah. Penambahan 1%, 2%, 3%, dan 4% dipilih untuk melihat pengaruh bahan penambah dengan

jumlah penambahan dengan dosis kecil. Dosis kecil diteliti untuk melihat pemerlambatan waktu pengerasan pada penambahan yang minim. Kuat tekan juga dilihat untuk melihat pengaruh bahan penambah terhadap kuat tekan beton geopolimer dan apakah terdapat pengaruh negatif terhadap beton. Topik yang akan dibicarakan adalah “Pengaruh Penambahan Boraks dan *Superplasticizer* terhadap Waktu Pengerasan dari Beton Geopolimer berbasis Abu Terbang”

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang dapat diambil dari latar belakang diatas adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penambahan boraks dan *superplasticizer* terhadap waktu pengerasan beton geopolimer berbasis abu terbang?
2. Bagaimana pengaruh penambahan boraks dan *superplasticizer* berbasis *polycarboxylate* terhadap kuat tekan beton geopolimer berbasis abu terbang?

1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan studi mengenai *admixture* yang dapat dipakai untuk menambah waktu pengerasan (*setting time*) pada beton geopolimer berbasis abu terbang (*fly ash*).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melihat pengaruh dari bahan penambah (*admixture*), khususnya boraks dan *superplasticizer*, terhadap waktu pengerasan beton geopolimer berbasis abu terbang sehingga dapat diketahui apakah bahan penambah dapat dipakai dalam campuran beton geopolimer untuk implementasi beton geopolimer pada dunia konstruksi.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini tertera sebagai berikut:

1. Abu terbang (*fly ash*) kelas F
2. Larutan alkali berupa Natrium Hidroksida (NaOH) dan Natrium Silikat (Na_2SiO_3)
3. Molaritas NaOH adalah 12 M
4. Agregat menggunakan agregat halus dan kasar

5. Bahan penambah menggunakan boraks dan *superplasticizer* berbasis *polycarboxylate*
6. Jumlah bahan penambah (*admixture*) sebesar 1%, 2%, 3%, dan 4%
7. Benda uji berjumlah 3 untuk setiap persentase penambahan *admixture* dan 3 untuk benda uji kontrol dengan total 54 benda uji
8. Benda uji berupa silinder berukuran diameter 10 cm dan tinggi 20 cm
9. Waktu pengerasan beton geopolimer diuji melalui alat *vicat needle* mengikuti standar ASTM C191.
10. *Curing* untuk semua benda uji dengan *curing* oven pada temperatur 115 C° selama 24 jam.

1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian yang digunakan pada penulisan laporan adalah dengan melakukan penelitian waktu pengerasan pada beton geopolimer berbasis abu terbang. Penelitian ini dilakukan di laboratorium beton Universitas Pelita Harapan.

Penelitian juga mengumpulkan data dan informasi melalui studi literatur yang bertujuan untuk mendukung penelitian. Literatur yang digunakan berupa jurnal, artikel, karya tugas akhir, dan buku. Selanjutnya, hasil dari penelitian ini akan dievaluasi dan diinterpretasi pada laporan ini. Pada bab terakhir dari laporan ini, penulis akan memberikan kesimpulan dan saran yang diharapkan akan membantu penelitian selanjutnya.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari laporan penelitian dengan judul “**Pengaruh Penambahan Boraks dan *Superplasticizer* terhadap Waktu Pengerasan dari Beton Geopolimer berbasis Abu Terbang**” adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi pendahuluan laporan yang membahas latar belakang, rumusan masalah, maksud dan tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi penulisan, serta sistematika penulisan.

BAB II LANDASAN TEORI

Bab ini berisi penjelasan teori yang didapat dari melakukan studi literatur. Teori yang dibahas mengenai beton geopolimer, material penyusun beton geopolimer, pengujian kelayakan material, material penambah (*admixture*), metode perawatan (*curing*) beton, metode pengujian waktu pengerasan (*setting time*), dan pengujian kuat tekan beton.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas metodologi penelitian yang mencakup material penyusun beton geopolimer, peralatan, prosedur uji kelayakan material, *mix design*, metode pengecoran, benda uji, metode uji waktu pengerasan, dan uji kuat tekan pada penelitian ini

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi analisa dan pembahasan dari hasil penelitian yang didapat. Analisa dan pembahasan mencakup hasil uji layak material, hasil uji waktu pengerasan, dan hasil uji kuat tekan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan pada penelitian yang dilakukan, serta saran dan evaluasi yang dapat membantu penelitian selanjutnya.

BAB 2

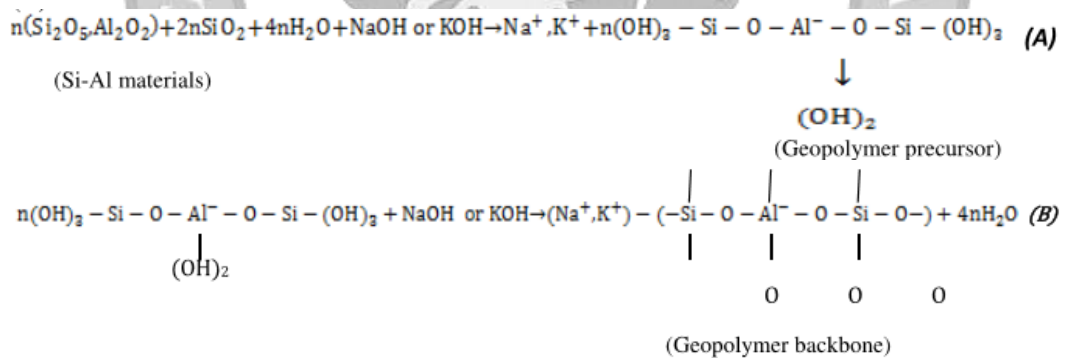
LANDASAN TEORI

2.1 Pendahuluan

Bab ini berisi penjelasan teori yang didapatkan dari peninjauan pustakan untuk mendukung penelitian ini. Teori yang akan dibahas berkisar pada beton geopolimer, material penyusun, material penambah, *mix design*, uji kelayakan material, uji waktu pengerasan, dan perhitungan.

2.2 Beton Geopolimer

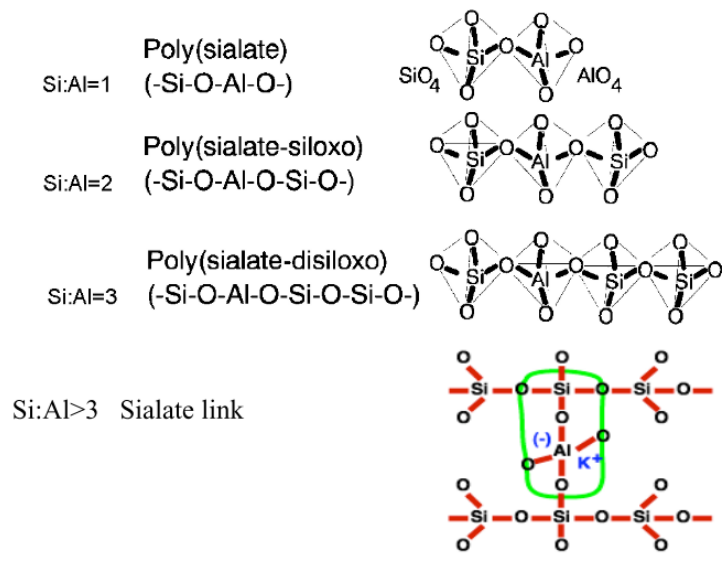
Istilah geopolimer pertama diciptakan oleh Profesor Davidovits pada tahun 1978 untuk mendeskripsikan material yang terbentuk dari gabungan molekul inorganik. Geopolimer bergantung pada bahan yang memiliki banyak atom Silika (Si) dan Alumunium (Al) (*pozzolan*) seperti *fly ash*. Bahan sumber Silika dan alumunium dicampurkan dengan larutan alkalin dan ber-polimerisasi menjadi rantai molekul yang menjadi *binder* (Aleem & Arumairaj, 2012). Larutan Alkali berperan sebagai aktivator di dalam reaksi kimia geopolimer yang menyebabkan terjadinya polimerisasi sehingga campuran dapat mengeras.



Gambar 2.1 Skema Reaksi Geopolimer (Aleem & Arumairaj, 2012)

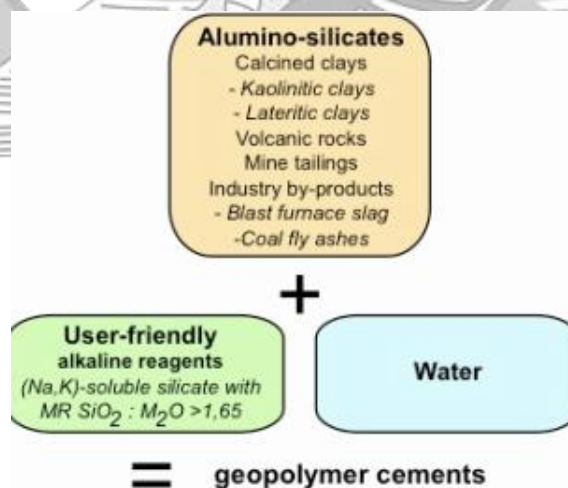
Profesor Davidovits mengatakan bahwa kimiawi geopolimer berdasarkan silika-alumina (*silicate aluminate*), dianjurkan *poly(sialate)*. *Sialate* adalah singkatan dari *silicon-oxo-aluminate*. *Polysialate* adalah rantai polimer dengan Si^{4+} dan Al^{3+} dalam koordinasi IV-fold dengan oksigen dan berkisaran dari *amorphous* sampai *semi-crystalline* (Davidovits, 2002). Struktur 3 dimensi

amorphous sampai *semi-crystalline* dari silika alumina dibagi menjadi 4 tipe berdasarkan perbandingan Si dan Al. Perbandingan Si dan Al serta tipe dari perbandingan dapat dilihat dari gambar 2.2.



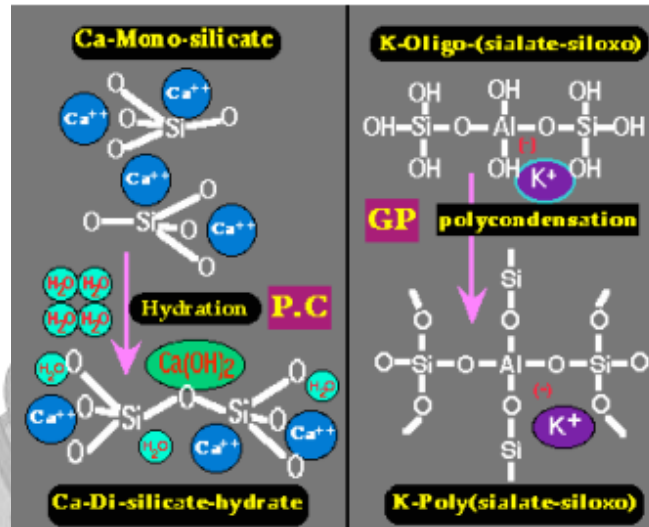
Gambar 2.2 Tipe Silika Alumina berdasarkan Si:Al (Davidovits, 2002)

Beton geopolimer merupakan beton yang memakai semen geopolimer sebagai bahan pengikat (*binder*) agregat menggantikan semen Portland pada beton konvensional. Menurut (Davidovits, 2013), semen geopolimer memiliki komposisi material alumina silikat, *user-friendly* alkalin reagen, dan air.



Gambar 2.3 Material Pembentuk Semen Geopolimer (Davidovits, 2013)

Pengerasan (*setting*) pada semen geopolimer terjadi melalui proses *polycondensation*, berbeda dengan semen Portland pada beton konvensional yang mengeras melalui proses hidrasi.



Gambar 2.4 Pengerasan (*Setting*) Pada Semen Portland (Kiri) Dan Semen Geopolimer (Kanan) (Davidovits, 2013)

Semen Portland mengeras melalui hidrasi dari Kalsium Silikat menjadi Kalsium Di-silikat hidrat dan kapur ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Berbeda dengan semen Portland, semen geopolimer mengeras melalui *polycondensation* dari *Potassium Oligo (Sialate-Siloxo)* menjadi rangkaian *Pottasium Poly (sialate-siloxo)* (Davidovits, 2013).

2.3 Material Penyusun Beton Geopolimer

Beton geopolimer pada penelitian ini mencakup material penyusun abu terbang, larutan alkali berupa Natrium Hidroksida (NaOH) dan Natrium Silikat (Na_2SiO_3), serta agregat berupa agregat kasar dan agregat halus.

2.3.1 Abu Terbang (*Fly Ash*)

SNI 2460:2014 mendefinisikan abu terbang (*fly ash*) sebagai “residu halus yang dihasilkan dari pembakaran atau pembubukan batubara dan ditransportasikan oleh aliran udara panas” (Badan Standarisasi Nasional Indonesia, 2014). Pada SNI 03-6863-2002, didefinisikan lebih lanjut bahwa abu terbang “berbentuk halus, bundar, serta bersifat pozolanik” (Badan Standarisasi Nasional Indonesia, 2002). Abu terbang adalah material *pozzolan*, sebuah “bahan alam atau buatan yang

sebagian besar terdiri dari unsur-unsur silikat dan atau aluminat yang reaktif”(Badan Standarisasi Nasional Indonesia, 2002). ASTM C618 mengklasifikasikan material pozzolan dalam 3 kelas, yakni:

1. Kelas N – *Pozzolan* alam mentah maupun *calcined* yang ber-kalsinasi untuk menghasilkan property yang memuaskan, seperti abu atau batu apung vulkanik, tanah liat, dan tanah diatom
2. Kelas F – Abu terbang yang memiliki sifat-sifat pozzolanik.
3. Kelas C – Abu terbang yang memiliki sifat pozzolanik serta sedikit sifat sementasi

Tabel 2.1 Komposisi Kimiawi Abu Terbang Berdasarkan Kelas (ASTM Standard C618, 2019)

<i>Composition</i>	<i>Class</i>		
	N	F	C
<i>Sum of SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃</i> <i>(min, %)</i>	70.0	50.0	50.0
<i>CaO, %</i>	<i>Report only</i>	18.0 <i>max</i>	>18.0
<i>SO₃ (max, %)</i>	4.0	5.0	5.0
<i>Moisture Content (max, %)</i>	3.0	3.0	3.0
<i>Loss of Ignition (max, %)</i>	10.0	6.0	6.0

2.3.2 Larutan Alkali

Larutan Alkali memiliki peran sebagai aktivator untuk membentuk *binder* pada beton geopolimer. Penelitian ini menggunakan 2 larutan alkali sebagai aktivator, yakni Natrium Hidroksida dan Natrium Silikat.

1. Natrium Hidroksida (NaOH)

Natrium Hidroksida adalah salah satu larutan alkali yang dipakai di dalam penelitian ini. Natrium Hidroksida diperoleh dalam bentuk padat atau *flakes* yang dilarutkan ke dalam air untuk mendapatkan larutan Natrium Hidroksida dengan molaritas tertentu. Molaritas ditentukan dengan perbandingan *flakes* Natrium Hidroksida dan air. Molaritas Natrium Hidroksida mempengaruhi kekuatan beton geopolimer, waktu

pengerasan (*setting time*) dari beton geopolimer. Dalam penelitian ini, ditentukan molaritas Natrium Hidroksida yang dipakai adalah 12 M (zailani). Perbandingan pencampuran dari *flakes* Natrium Hidroksida dan air didapatkan dari tabel 2.1 yang diambil dari buku *Perry's Chemical Engineers' Handbook 8th Edition* oleh Bruce E. Poling, et al.

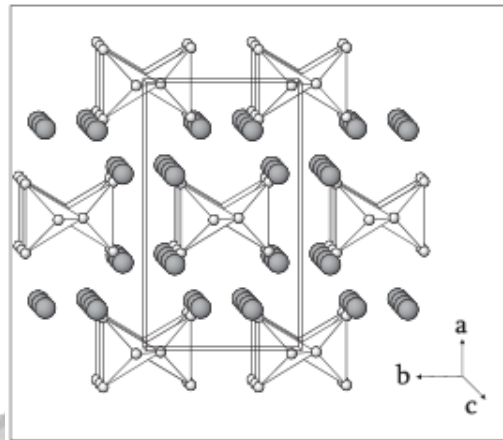
Tabel 2.2 Perbandingan Air dan NAOH Padat Berdasarkan Molaritas (Poling et al., 2007)

Molarity M mole/l col (1)	For preparation of 1 kg of SHS			Concentration of SHS	
	SH Solids	Water	SHS		
	grams Col (2)	grams Col (3)	grams Col (4)	ws, mass/mass Col (4)	% Col (5)
1.00	39	961	1000	0.39	3.9
2.00	74	926	1000	0.74	7.4
3.00	108	892	1000	1.08	10.8
4.00	140	860	1000	1.40	14.0
5.00	171	829	1000	1.71	17.1
6.00	200	800	1000	2.00	20.0
7.00	228	772	1000	2.28	22.8
8.00	255	745	1000	2.55	25.5
9.00	281	719	1000	2.81	28.1
10.00	306	694	1000	3.06	30.6
11.00	331	669	1000	3.31	33.1
12.00	354	646	1000	3.54	35.4
13.00	377	623	1000	3.77	37.7
14.00	400	600	1000	4.00	40.0
15.00	422	578	1000	4.22	42.2
16.00	443	557	1000	4.43	44.3
17.00	464	536	1000	4.64	46.4
18.00	485	515	1000	4.85	48.5
19.00	505	495	1000	5.05	50.5

2. Natrium Silikat (Na_2SiO_3)

Na_2SiO_4 , atau sering disebut sebagai *waterglass*, adalah salah satu larutan alkali yang dipakai di dalam penelitian ini. *Waterglass* di peroleh dalam bentuk larutan dengan konsentrasi 48,23%. Volker Kahlenber dalam *Structural Chemistry of Anhydrous Sodium Silicates* mengatakan bahwa sebuah rantai silikat, struktur Natrium Silikat berdasarkan *zweier single chains*. Ikatan antara rantai berasal dari atom Na yang di kelilingi

oleh 5 atom oksigen *anion* dalam bentuk *distorted trigonal bipyramids* (Kahlenberg, 2010).



Gambar 2.5 Sisi samping dari struktur kristal Na_2SiO_3 (Kahlenberg, 2010)

2.3.3 Agregat

SNI 2847-2019 mendefinisikan agregat sebagai “bahan berbutir seperti pasir, kerikil, batu pecah, dan slag tanur (*blast-furnace slag*), yang digunakan dengan media perekat untuk menghasilkan beton”(Badan Standarisasi Nasional Indonesia, 2019). Agregat merupakan material yang dapat diperoleh di alam maupun dibuat dan menjadi penyumbang kekuatan terbesar dalam campuran beton.

ASTM C33-18 mengklasifikasikan agregat yang dipakai pada konstruksi menjadi 2 klasifikasi, yakni agregat halus (*fine*) dan agregat kasar (*course*). Agregat halus merupakan agregat yang tidak melebihi ukuran butir dengan besar 4,75mm. Agregat kasar merupakan agregat yang masuk pada ukuran yang lebih besar dari pada 4,75 mm. Umumnya agregat kasar yang dipakai di dalam konstruksi tidak melebihi 40 mm karena terdapat unsur lain seperti tulangan baja, namun agregat yang melebihi 40 mm dapat dipakai dalam pekerjaan konstruksi seperti pembuatan jalan aspal (*flexible pavement*). Agregat pada penelitian ini ditetapkan untuk tidak melebihi 40 mm. Berikut adalah material yang dapat termasuk pada kedua klasifikasi agregat.

1. Agregat halus (*fine*) termasuk pasir alam, pasir buatan, atau agregat daur ulang yang memenuhi persyaratan agregat halus, atau gabungan dari yang tertera.
2. Agregat Kasar

Agregat Kasar (*course*) termasuk kerikil, kerikil pecah (*crushed gravel*), batu pecah, *air-cooled blast furnace slag*, beton yang dihancurkan dengan perhatian khusus, atau agregat daur ulang yang memenuhi persyaratan agregat kasar.

2.4 Pengujian Kelayakan Material

Material yang diuji untuk penelitian ini berupa agregat halus, agregat kasar, dan abu terbang. Berikut adalah pengujian kelayakan dari material yang tertera:

2.4.1 Uji Kadar Lumpur Agregat Halus

Uji kadar lumpur dilakukan untuk melihat kadar lumpur yang terdapat pada agregat halus sehingga dapat menentukan apakah kadar lumpur dapat menurunkan mutu dari beton secara signifikan. ASTM C33 menetapkan bahwa kadar lumpur tidak boleh melebihi 5%. Prosedur uji dilakukan berdasarkan SNI 03-4142-1996. Pengukuran kadar lumpur agregat halus dapat dilakukan dengan 2 metode, yakni metode berat dan volume. Berikut adalah rumus yang dipakai dalam perhitungan kadar lumpur agregat halus berdasarkan metode berat (persamaan 1-3) dan metode volume (persamaan 4)

$$(1) \quad A_{lb} = W_{kal} - W_k$$

$$(2) \quad B_{lb} = W_{ka} - W_k$$

$$(3) \quad KLB = \frac{(A_{lb} - B_{lb}) \times 100}{A_{lb}}$$

$$(4) \quad KLV = \frac{(A_{lv} - B_{lv}) \times 100}{A_{lv}}$$

Dimana: A_{lb} = Berat Agregat Kering + Lumpur

W_{kal} = Berat Kontainer + Agregat Kering + Lumpur

W_k = Berat Kontainer

B_{lb} = Berat Agregat Kering

W_{ka} = Berat Kontainer + Agregat Kering

KLB = Kadar Lumpur berdasarkan Berat

A_{lv} = Volume Agregat + Lumpur

B_{IV} = Volumer Agregat

KL_V = Kadar Lumpur berdasarkan Volume

2.4.2 Uji Kadar Air Agregat Halus

Uji kadar air dilakukan untuk melihat kadar air dari agregat. Prosedur dan perhitungan kadar air mengacu pada SNI 03-1971-1990. Kadar air digunakan untuk perhitungan selanjutnya. Berikut persamaan yang dipakai dalam perhitungan kadar air.

$$(5) \quad A_{ka} = W_{kab} - W_k$$

$$(6) \quad B_{ka} = W_{kak} - W_k$$

$$(7) \quad KA = \left(\frac{(A_{ka} - B_{ka}) \times 100}{B_{ka}} \right)$$

Dimana: A_{ka} = Berat Agregat (Kadar Air)

W_{kab} = Berat Kontainer + Agregat Basah (Kadar Air)

W_k = Berat Kontainer

B_{ka} = Berat Agregat Kering (Kadar air)

W_{kak} = Berat Kontainer + Agregat Kering (Kadar Air)

KA = Kadar Air

2.4.3 Uji Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus

Uji berat jenis dilakukan untuk mendapatkan berat jenis dari agregat halus. Pengujian penyerapan (*absorption*) dilakukan di saat yang bersamaan. Uji ini mengikuti ASTM C128 sebagai pedoman dalam prosedur pengujian. Prosedur pengujian dilakukan dengan merendam agregat dalam air selama 24 ± 4 jam sehingga air memenuhi pori-pori agregat. Agregat lalu dikeluarkan dari air dan didiamkan sampai permukaan agregat terlihat kering. Massa agregat dan volume agregat diukur dari agregat yang telah kering di permukaan. Lalu sampel dikeringkan secara oven lalu diukur massanya. Terdapat beberapa persamaan yang dipakai dalam uji ini untuk mencari *bulk specific gravity*, *bulk specific gravity* saat *SSD*, *apparent specific gravity*, dan *absorption*. Persamaan yang dipakai sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
(8) \quad A_{ah} &= W_{kkh} - W_k \\
(9) \quad BSGH &= \frac{A_{ah}}{(B_a + S_{ah} - C_{ah})} \\
(10) \quad SSDH &= \frac{S_{ah}}{(B_a + A_{ah} - C_{ah})} \\
(11) \quad ASGH &= \frac{A_{ah}}{(B_a + A_{ah} - C_{ah})} \\
(12) \quad AH &= \left(\frac{(S_{ah} - A_{ah}) \times 100}{A_{ah}} \right)
\end{aligned}$$

Dimana: A_{ah} = Berat Agregat Kering (Agregat Halus)

W_{kkh} = Berat Kontainer + Agregat Kering (Agregat Halus)

W_k = Berat Kontainer (Agregat Halus)

$BSGH$ = *Bulk Specific Gravity* Agregat Halus

S_{ah} = Berat Agregat Halus (SSD)

B_a = Berat Gelas Ukur + Air

C_{ah} = Berat Gelas Ukur + Agregat Halus + Air

$SSDH$ = *Bulk Specific Gravity* (SSD) Agregat Halus

$ASGH$ = *Apparent Specific Gravity* Agregat Halus

AH = *Absorption* Agregat Halus

2.4.4 Uji Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

Uji berate jenis agregat kasar memiliki prosedur yang sama dengan uji berat jenis agregat halus. ASTM C127 dipakai sebagai pedoman prosedur. Terdapat beberapa persamaan yang dipakai dalam uji ini, yakni sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
(13) \quad A_{ak} &= W_{kkk} - W_k \\
(14) \quad B_{ak} &= W_{ksk} - W_k \\
(15) \quad BSGK &= \frac{A_{ak}}{(B_{ak} - C_{ak})} \\
(16) \quad SSDK &= \frac{B_{ak}}{(B_{ak} - C_{ak})} \\
(17) \quad ASGK &= \frac{A_{ak}}{(A_{ak} - C_{ak})}
\end{aligned}$$

$$(18) \quad AK = \left(\frac{(B_{ak} - A_{ak}) \times 100}{A_{ak}} \right)$$

Dimana: A_{ak} = Berat Agregat Kering (Agregat Kasar)

W_{kkk} = Berat Kontainer + Agregat Kering (Agregat Kasar)

W_k = Berat Kontainer (Agregat Kasar)

B_{ak} = Berat Agregat Kasar SSD

W_{ksk} = Berat Kontainer Agregat SSD (Agregat Kasar)

$BSGK$ = *Bulk Specific Gravity* Agregat Kasar

C_{ak} = Berat Agregat Kasar dalam air

$SSDK$ = *Bulk Specific Gravity (SSD)* Agregat Kasar

$ASGK$ = *Apparent Specific Gravity* Agregat Kasar

AK = *Absorption* Agregat Kasar

2.4.5 Uji Sieve Analysis

Uji *sieve analysis* dilakukan untuk mengetahui gradasi dari agregat. Syarat gradasi yang dipakai mengikuti ASTM C33. Pedoman prosedur pengujian mengikuti ASTM C136. Agregat yang telah diukur massanya sebelum akan diayak dengan mesin ayak berstandar dengan ayakan-ayakan yang sudah ditentukan. Agregat yang tertahan pada tiap ayakan akan diukur massanya.

2.4.6 Uji X-Ray Fluorescence (X-RF) Abu Terbang

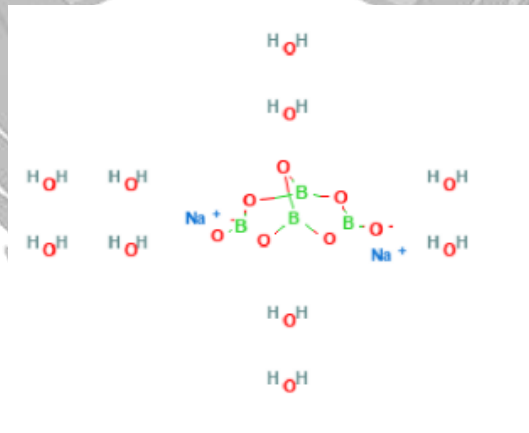
Dalam ASTM E1621 tertulis *X-Ray Fluorescence Spectrometry* dapat menentukan dari berbagai material metalik dan non-metalik dengan berbagai material padat maupun cair secara akurat dan presisi (ASTM Standard E1621, 2013). Uji *X-RF* digunakan untuk menentukan komposisi pada abu terbang, terutama pada komposisi dari Aluminium (Al), Silika (Si), dan Kalsium (Ca).

2.5 Material Penambah (*Admixture*)

Material penambah yang dipakai dalam penelitian ini adalah Boraks dan *superplasticizer* berbasis *polycarboxylate*. Penjelasan masing-masing bahan penambah adalah sebagai berikut:

2.5.1 Boraks (*Sodium Borate Decahydrate*)

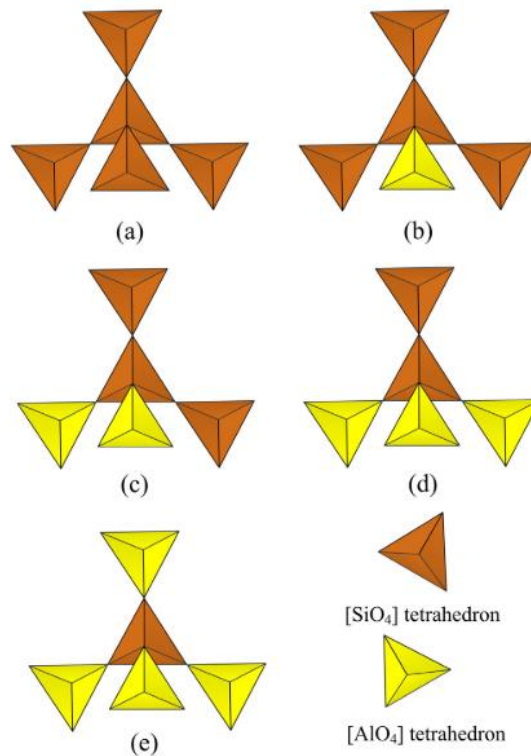
Sodium Borate Decahydrate ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), atau lebih dikenal dengan nama umum boraks merupakan garam *borate*. *Borate* didefinisikan sebagai senyawa yang mengandung atau menjadi sumber *boric oxide* (B_2O_3) (Helvaci, 2005). Boraks memiliki aplikasi di berbagai bidang industri. Boraks merupakan material yang sering digunakan di dalam produksi kaca, sebagai bahan preservatif dan detergen, serta juga dalam penumbuhan tanaman (Wisniak, 2005). Dalam penelitian yang dilaksanakan oleh Mackenzie et al, ditemukan bahwa penambahan boraks dapat memperpanjang waktu pengerasan beton geopolimer dan juga menentukan waktu pengerasan dengan mem-variasikan jumlah dari penambahan boraks (MacKenzie et al., 2005)



Gambar 2.6 Struktur 2 Dimensi Kimiawi Boraks (National Center for Biotechnology Information, 2022)

Oligomer bisa didefinisikan sebagai sebuah senyawa mengandung beberapa atom dari satu atau lebih kelompok yang terikat bersama (Jenkins et al., 1996) dan pada gambar 2.7 memodelkan Si-Si *oligomer* dan Si-Al *oligomer*. Gambar 2.7 model (a) menggambarkan Si-Si oligomer yang terbentuk terlebih dahulu dengan pengikatan antara beberapa $[\text{SiO}_4]$ *tetrahedron* lalu terjadi pembubaran dan pengikatan dengan $[\text{AlO}_4]$ *tetrahedron* membentuk model (b), (c), (d), dan (e) yang merupakan Si-Al *oligomer*. Namun dengan lebih banyaknya $[\text{AlO}_4]$ *tetrahedron* pada Si-Al *oligomer*, aktifitas polimerisasi pun dapat berkurang. Seperti pada model (e), yang memiliki aktifitas polimerisasi yang lebih rendah dibandingkan pada model (c) karena jumlah $[\text{SiO}_4]$ *tetrahedron* pada *oligomer* lebih rendah sehingga reaksi yang dapat terjadi antara $[\text{SiO}_4]$ *tetrahedron* dengan $[\text{AlO}_4]$

tetrahedron pada *oligomer* lainnya berkurang. Dengan berkurangnya aktifitas polimerisasi yang terjadi, maka polimerisasi pun terbatas, menyebabkan terjadinya perlambatan pengerasan.



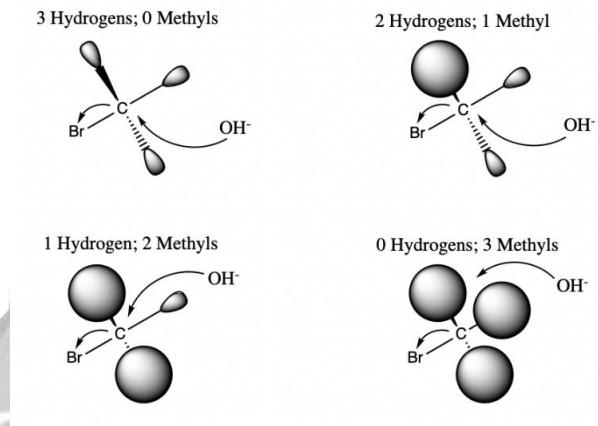
Gambar 2.7 Proses Polimerisasi Pada $[\text{SiO}_4]$ dan $[\text{AlO}_4]$ (Liu et al., 2017)

Ion boron (B) dan ion aluminium (Al) merupakan senyawa pada golongan ke-13 (IIIA) di tabel periodik sehingga mereka memiliki properti kimiawi yang tidak berbeda jauh. Karena itu, $[\text{BO}_4]$ *tetrahedron* dapat terbentuk dari boraks dan bereaksi di tempat $[\text{AlO}_4]$ *tetrahedron* membentuk Si-B *oligomer* yang menggantikan tempat Si-Al *oligomer*. Dengan adanya penambahan boraks, jumlah $[\text{BO}_4]$ *tetrahedron* pun bertambah, mengurangi aktifitas polimerisasi.

2.5.2 Superplasticizer berbasis Polycarboxylate (SP)

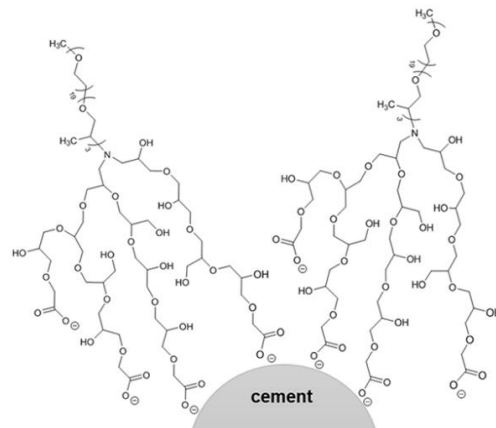
Superplasticizer merupakan sebuah bahan penambah untuk meningkatkan *workability* beton dan terbagi menjadi 3 generasi. Penelitian ini memakai *superplasticizer* berbasis *polycarboxylate* yang merupakan bagian dari *superplasticizer* generasi ke-3. *Superplasticizer* berbasis *polycarboxylate* merupakan polimer berbentuk sisir dengan *anionic backbone* dan beberapa *nonionic pendant chains*, yang biasa terdiri dari *polyethylene glycols* (Ilg & Plank, 2019). Berbeda dengan

generasi sebelumnya, generasi ke-3 *superplasticizer* menggunakan efek *steric hindrance* yang disebabkan oleh rantai kompleks pada *superplasticizer* berbasis *polycarboxylate* dan diketahui dapat memperlambat waktu pengerasan pada beton geopolimer seperti yang didapatkan pada penelitian (Oderji et al., 2019) dan (Laskar & Talukdar, 2018).



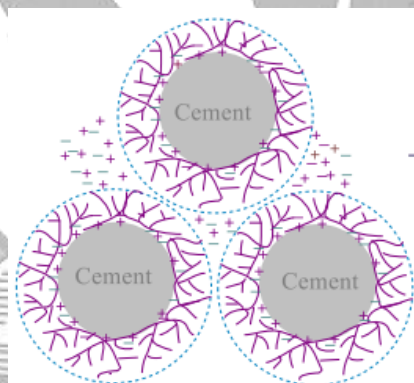
Gambar 2.8 Contoh Efek *Steric Hindrance* (Valqui, 2021)

Efek *steric hindrance* terjadi saat adanya rantai yang kompleks dan padat (Valqui, 2021). Rantai yang padat didefinisikan sebagai rantai yang memiliki sedikit ruang untuk senyawa lain dapat bereaksi. Ruangan yang sedikit menyebabkan reaksi terhambat sehingga terjadi perlambatan reaksi. Perlambatan reaksi dapat mempengaruhi *slump* dan waktu pengerasan (Antoni et al., 2017). Gambar 2.8 merupakan contoh sederhana dari rantai yang memiliki efek *steric hindrance*. Terlihat bahwa saat rantai memiliki 3 hidrogen, terdapat banyak ruang dimana senyawa lain dapat bereaksi, namun saat terdapat 3 *methyl* yang terikat, karena senyawa *methyl* yang lebih besar dari hidrogen, terdapat ruang yang jauh lebih kecil untuk senyawa lain dapat bereaksi.



Gambar 2.9 Rantai *Superplasticizer Polycarboxylate* (Ilg & Plank, 2019)

Superplasticizer berbasis *polycarboxylate* memiliki efek *steric hindrance* karena rantai yang sangat kompleks dan padat seperti yang terlihat pada gambar 2.9. Rantai yang kompleks tersebut akan meliputi material *pozzolan* sehingga reaksi terhambat, menyebabkan reaksi polimerisasi juga ikut terhambat. Karena penghambatan reaksi yang terjadi, waktu pengerasan dari semen geopolimer pun lebih lambat.



Gambar 2.10 Ilustrasi Penghambatan Reaksi (Sha et al., 2020)

Penelitian yang dilakukan oleh (Laskar & Talukdar, 2018) juga mencatat *superplasticizer* berbasis *polycarboxylate* dapat berpengaruh pada waktu pengerasan karena adanya penghambatan terjadinya pembentukan ikatan dari geopolimer. Catatan ini selaras dengan efek *steric hindrance* yang dipunyai *superplasticizer* berbasis *polycarboxylate* yang menghambat pembentukan ikatan dari geopolimer.

2.6 Mix Design Beton Geopolimer

Mix design merupakan perbandingan bahan yang menjadi acuan di dalam pencampuran bahan dalam pengecoran. Penelitian ini mengacu pada *mix design* (Giovanni, 2022) yang dilakukan sebelumnya di Universitas Pelita Harapan sebagai acuan dalam perbandingan bahan dengan target mutu 30 Mpa. Perbandingan bahan pada *mix design* yang dipakai adalah sebagai berikut:

- Molaritas NaOH 12M
- Perbandingan Agregat : *binder* = 65% : 35%
- Perbandingan Agregat kasar : Agregat halus = 54% : 46%
- Perbandingan Na_2SiO_3 : NaOH = 3 : 1
- Perbandingan Abu terbang : Larutan Alkali = 0,51 : 1

2.7 Metode Perawatan (*Curing*) Beton

Metode perawatan (*curing*) menjadi faktor yang penting dalam kuat tekan beton. Penelitian ini menggunakan metode perawatan (*curing*) oven selama 24 jam. Spesimen geopolimer berbasis abu terbang yang diaktivasi dengan larutan alkali dengan *curing* pada temperatur yang lebih tinggi menunjukkan kuat mekanis yang lebih besar (Nurruddin et al., 2018). *Curing* dengan oven pada suhu tinggi mempercepat proses polimerisasi sehingga beton geopolimer dapat memiliki kuat tekan awal yang tinggi.

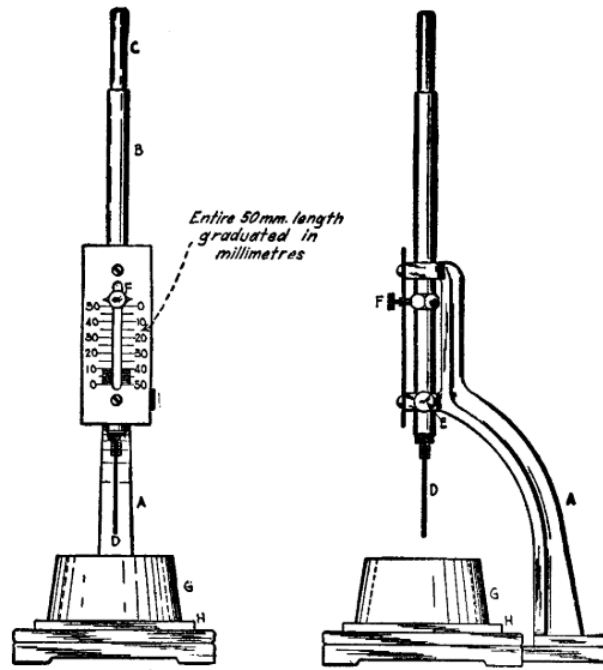
2.8 Waktu Pengerasan (*Setting Time*)

Waktu Pengerasan (*Setting Time*) sebuah *binder* dapat dicari berdasarkan standar ASTM C191. Standar ASTM C191 merupakan pengujian untuk menentukan *setting time binder* melalui *Vicat Needle Test*. Terdapat 2 metode yang bisa dilakukan. Metode A melalui alat *Vicat* yang dioperasikan secara manual, dan Metode B melalui alat *Vicat* otomatis. Penelitian ini menggunakan metode A.

Alat *Vicat* yang digunakan pada pengujian waktu pengerasan menggunakan metode A harus mengikuti ketentuan sebagai berikut:

1. Batang besi (*rod*) dengan massa $300 \pm 0.5\text{g}$
2. Jarum (*Needle*) dengan diameter $1,00 \pm 0,05\text{mm}$ dan panjang tidak melebihi 50mm. Ujung jarum datar dan 90° terhadap axis jarum.

3. Wadah berbentuk cincin kerucut (*conical ring*) dengan tinggi $40 \pm 1\text{mm}$, diameter dalam pada sisi atas $60 \pm 3\text{mm}$, serta diameter dalam pada sisi bawah $70 \pm 3\text{mm}$.
4. Plat *non-adsorptive* seperti plat kaca berbentuk persegi berukuran $100 \pm 5\text{mm}$.



Gambar 2.11 Alat Vicat Mengikuti Standard ASTM C191-21 (ASTM Standard C191, 2008)

Hasil yang diperoleh melalui pengujian *Vicat needle test* dapat dipakai untuk menentukan waktu pengerasan awal (*initial*) dan waktu pengerasan akhir (*final*). Waktu pengerasan awal adalah waktu yang berlalu dari pencampuran komponen dari *binder* sampai waktu saat penetrasi diukur sebesar 25mm. Waktu pengerasan akhir adalah waktu yang berlalu dari pencampuran komponen dari *binder* sampai waktu saat tidak terlihat ada lekukan melingkar pada permukaan pasta, atau saat penetrasi diukur sebesar 0 mm. Penelitian ini melihat pengerasan yang terjadi seiring bertambah waktu, serta melihat waktu pengerasan awal dan waktu pengerasan akhir yang terjadi pada *binder*. Setting time awal dihitung melalui perhitungan berikut:

$$(19) \quad \left(\left(\frac{(H-E)}{(C-D)} \right) \times (C - 25) \right) + E$$

Dimana:

E = waktu saat penetrasi melebihi 25 mm terakhir

H = waktu saat penetrasi kurang dari 25 mm pertama

C = hasil penetrasi pada E dan,

D = hasil penetrasi pada H

ASTM C150 menentukan bahwa waktu pengerasan awal tidak boleh kurang dari 45 menit. Hal ini ditetapkan sehingga pengerjaan pengecoran dapat dilakukan sebelum beton mengeras. IS-269-1989 menganjurkan bahwa waktu pengerasan akhir beton tidak melebihi 600 menit atau 10 jam sehingga tahap pengecoran selanjutnya dapat terlaksana.

2.9 Pengujian Kuat Tekan Beton

Kuat tekan merupakan seberapa beton dapat menahan beban aksial tekan per satuan luas sampai terjadinya retak (*cracking*) pada beton di mana beton dianggap gagal. Pada ASTM C39 tertulis bahwa pengujian kuat tekan dilakukan dengan memberikan beban tekan aksial terhadap silinder atau *core* yang telah terbentuk secara bertahap pada jangkauan yang telah ditentukan sampai kegagalan terjadi. Kuat tekan dihitung dengan membagi hasil tekan maksimum yang didapatkan dari uji dengan luas penampang dari spesimen. Dengan definisi ini, perumusan kuat tekan beton dapat ditulis sebagai berikut:

$$(20) \quad f_c' = \frac{P_u}{A_{kt}}$$

Dimana f_c' = Kuat Tekan Beton (Mpa)

P_u = Beban Aksial Tekan Maksimum (N)

A_{kt} = Luas Penampang Benda Uji (mm²)