

SKRIPSI

**PERILAKU MORTAR YANG MENGGUNAKAN ABU TERBANG
DAN PORTLAND *CEMENT* COMPOSITE DI BAWAH BEBAN
TITIK DAN TEKAN**

DISUSUN DAN DIAJUKAN OLEH:

MUHAMMAD MEGUMI TJARONGE

D011 19 1082



PROGRAM STUDI SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2023

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Muhammad Megumi Tjaronge

NIM : D011 19 1082

Program Studi : Teknik Sipil

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{ PERILAKU MORTAR YANG MENGGUNAKAN ABU TERBANG DAN PORTLAND CEMENT COMPOSITE DI BAWAH BEBAN TITIK DAN TEKAN }

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 9 Maret 2023



Yang Menyatakan

Muhammad Megumi Tjaronge

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

PERILAKU MORTAR YANG MENGGUNAKAN ABU TERBANG DAN
PORTLAND CEMENT COMPOSITE DI BAWAH BEBAN TITIK DAN TEKAN

Disusun dan diajukan oleh:

MUHAMMAD MEGUMI TJARONGE

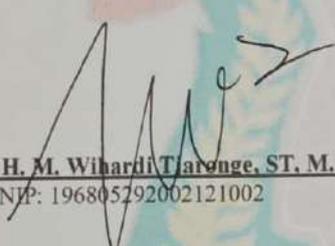
D011 19 1082

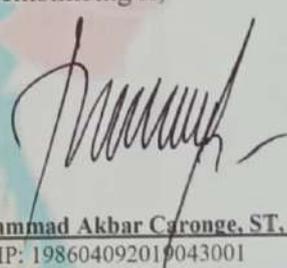
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 8 Maret 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

menyetujui,

Pembimbing I,

Pembimbing II,


Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng
NIP: 196805292002121002


Dr. Eng. Muhammad Akbar Cjaronge, ST, M.Eng
NIP: 198604092019043001

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng
NIP: 196805292002121002

ABSTRAK

MUHAMMAD MEGUMI TJARONGE *PERILAKU MORTAR YANG MENGGUNAKAN ABU TERBANG DAN PORTLAND CEMENT COMPOSITE DI BAWAH BEBAN TITIK DAN TEKAN*

Di Indonesia, banyak pembangkit listrik berupa pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakar. Proses pembakaran batu bara akan menghasilkan abu terbang (*fly ash*), dimana kedua material tersebut di kategorikan hasil sampingan (*by-product*). Namun hingga sekarang ini, sebagian besar abu terbang disimpan di kolam penampungan. Abu terbang memiliki silika dalam jumlah yang banyak yang memiliki sifat pozolan dan memiliki kemiripan dengan unsur silika pada semen. Karena unsur-unsur silika pada semen, abu terbang adalah sama maka abu terbang dapat digunakan sebagai bahan mortar, yang selanjutnya pembuatan mortar yang mengandung abu terbang akan mengurangi jumlah abu terbang di tempat penampungan. Usaha tersebut akan mendukung pengembangan infrastruktur berkelanjutan yang mengurangi kerusakan lingkungan.

Penelitian ini menggunakan abu terbang sebagai pengganti semen dan melakukan pengujian kuat beban titik untuk mengevaluasi kelayakan abu terbang sebagai material pembentuk mortar yang menggunakan semen portland komposit sebagai pengikat. Pengujian kuat tekan yang dilaksanakan pada umur 7 hari dan 28 hari digunakan sebagai parameter untuk menyelidiki hubungan tegangan regangan *mortar fly ash* dengan *blended cement*. Proporsi penggunaan abu terbang dalam penelitian ini adalah 0% (FA-0), 10% (FA-10), 20% (FA-20), dan 30% (FA-30) dari berat semen. Dengan melihat nilai dari pengujian kuat tekan mortar yang dilakukan, maka dapat dilihat bahwa mortar yang mengandung abu terbang masih memenuhi persyaratan yang ada.

Kata kunci: ABU TERBANG, KUAT TEKAN, BEBAN TITIK

ABSTRACT

MUHAMMAD MEGUMI TJARONGE *BEHAVIOR OF MORTAR USING FLY ASH AND PORTLAND CEMENT COMPOSITE UNDER PRESS AND POINT LOAD*

In Indonesia, many power plants are in the form of steam power plants (PLTU) which use coal as fuel. The process of burning coal will produce fly ash, where the two materials are categorized as by-products. But until now, most of the fly ash is stored in holding ponds. Fly ash has a large amount of silica which has pozzolanic properties and is similar to the silica element in *cement*. Because the silica elements in *cement*, fly ash are the same, fly ash can be used as a mortar material, which in turn makes mortar containing fly ash will reduce the amount of fly ash in the shelter. The effort will support the development of sustainable infrastructure that reduces environmental damage.

This study used fly ash as a substitute for *cement* and conducted a point load strength test to evaluate the feasibility of fly ash as a mortar forming material using composite portland *cement* as a binder. The compressive strength test carried out at 7 days and 28 days was used as a parameter to investigate the stress-strain relationship between fly ash mortar and blended *cement*. The proportion of fly ash used in this study was 0% (FA-0), 10% (FA-10), 20% (FA-20), and 30% (FA-30) by weight of *cement*. By looking at the value of the mortar compressive strength test performed, it can be seen that the mortar containing fly ash still meets the existing requirements.

KEYWORDS: FLIGHT ASH, COMPRESSIVE STRENGTH, POINT LOAD

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
KATA PENGANTAR	x
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Manfaat Penelitian/Perancangan	3
1.5. Ruang Lingkup/Asumsi perancangan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 MORTAR.....	5
2.1.1 Defenisi dan Penggunaan Mortar.....	5
2.1.2 Jenis-jenis mortar	5
2.1.3 Penelitian terdahulu Abu terbang mortar	8
2.2 Semen Portland	15
2.2.1 Semen Portland	15
2.2.2 Komposisi Kimia Semen Portland.....	18
2.3 Agregat halus dan Material Pozzolan.....	19
2.3.1 Agregat Halus.....	19
2.3.2 Material Pozzolan.....	22
2.4 Air.....	26
2.4.1 Fungsi air pada pembuatan mortar dan beton	26
2.4.2 Spesifikasi air sabagai bahan bangunan.....	27

2.5	SIFAT-SIFAT MEKANIS BAHAN.....	28
2.5.1	Beban titik.....	28
2.5.2	Tegangan dan Regangan sejajar sumbu akibat beban tekan.....	29
2.5.3	Regangan.....	30
2.6	Kuat Tekan Mortar.....	31
2.6.1	Perilaku Tegangan-Regangan Mortar.....	31
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		33
3.1.	Bagan Alir Penelitian.....	33
3.2.	Waktu dan Lokasi Penelitian.....	35
3.3.	Metode Penelitian dan Sumber Data.....	35
3.4.	Alat dan Bahan Penelitian.....	35
3.5.	Pemeriksaan Karakteristik Material.....	37
3.5.1.	Abu Terbang.....	37
3.5.2.	Agregat Halus (Pasir) dan Abu Terbang.....	37
3.6.	Pembuatan Benda Uji.....	37
3.7.	Perawatan (<i>Curing</i>) Benda Uji.....	38
3.8.	PLI test (point load test).....	38
3.9.	Pengujian kuat tekan.....	40
3.10.	Ketepatan.....	40
BAB IV PEMBAHASAN.....		42
4.1	Karakteristik Material.....	42
4.1.1	Agregat Halus.....	42
4.1.2	Semen Portland Komposit (PCC).....	42
4.1.3	Abu Terbang.....	43
4.2	Beban titik.....	44
4.3	Karakteristik mekanik mortar benda uji kubus.....	45
4.3.1	Kuat tekan mortar benda uji yang berbentuk kubus 50 x 50 mm.....	45
4.3.2	Tegangan regangan mortar.....	47
4.3.3	Modulus elastisitas benda uji.....	56
4.3.4	Toughness benda uji.....	57
4.4	Penggunaan mortar.....	58

4.5	Korelasi beban titik dan kuat tekan	58
BAB V KESIMPULAN		60
5.1	Kesimpulan.....	60
DAFTAR PUSTAKA		61

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Jenis-jenis spesifikasi proporsi mortar	6
Tabel 2 Panduan untuk memilih mortar pasangan	6
Tabel 3 Persyaratan spesifikasi properti	8
Tabel 4 Syarat kimia utama (SNI 2049-2015) Satuan dalam %	16
Tabel 5 Syarat fisika utama (SNI 2049-2015)	17
Tabel 6 Mineral utama dalam klinker semen Portland	19
Tabel 7 Karakteristik fisik Abu terbang (ASTM C618-03, 2003)	25
Tabel 8 kandungan kimia Abu terbang (ASTM C618-03, 2003)	26
Tabel 9 Pemeriksaan karakteristik Abu terbang dan bottom ash.....	37
Tabel 10 Pemeriksaan karakteristik pasir	37
Tabel 11 Rentang koefisien variasi yang dapat diterima	41
Tabel 12 Karakter Agregat Halus	42
Tabel 13 Komposisi kimia dan fisika semen PCC.....	43
Tabel 14 Abu terbang.....	43
Tabel 15 Beban titik strength index umur 7 dan 28 hari.....	44
Tabel 16 CoV kuat tekan mortar benda uji kubus.....	46
Tabel 17 Nilai CoV modulus elastisitas benda uji kubus	57
Tabel 18 Toughness benda uji kubus	57
Tabel 19 penggunaan mortar.....	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 contoh penggunaan mortar	5
Gambar 2 Spesimen kubus.....	28
Gambar 3 Pengujian beban titik.....	29
Gambar 4 Tegangan 1 arah, 2 arah dan 3 arah.....	30
Gambar 5 Regangan tarik dan regangan tekan	30
Gambar 6 Hubungan tegangan dan regangan	32
Gambar 7 Bagan alir penelitian.....	34
Gambar 8 Material mortar.....	36
Gambar 9 Curing air benda uji.....	38
Gambar 10 PLI test (point load test).....	39
Gambar 11 Pengujian kuat tekan	40
Gambar 12 Kuat tekan mortar benda uji kubus	45
Gambar 13 Strength activity index	47
Gambar 14 Tegangan regangan vertical control (FA-0).....	49
Gambar 15 Tegangan regangan vertical 10% (FA-10).....	51
Gambar 16 Tegangan regangan vertical 20% (FA-20).....	53
Gambar 17 Tegangan regangan vertical 30% (FA-30).....	55
Gambar 18 Modulus Elastisitas benda uji kubus	56
Gambar 19 korelasi beban titik dan kuat tekan.....	59

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kita panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “PERILAKU MORTAR YANG MENGGUNAKAN ABU TERBANG DAN PORTLAND *CEMENT* COMPOSITE DI BAWAH BEBAN TITIK DAN TEKAN” yang merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa banyak kendala yang dihadapi dalam penyusunan tugas akhir ini, namun berkat bantuan dari berbagai pihak, maka tugas akhir ini dapat terselesaikan. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. **Bapak Prof Dr.Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST.,MT.,IPM., ASEAN.Eng.** selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
2. **Bapak Prof. Dr. H. M Wihardi Tjaronge ST., M.Eng.,** selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan selaku dosen pembimbing I yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
3. **Bapak Dr. Eng. M. Akbar Caronge, ST., MT.,** selaku dosen pembimbing II yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
4. **Bapak Dr. Eng. A. Arwin Amiruddin, ST., MT.,** selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.
5. Seluruh dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Seluruh staf dan karyawan Departemen Teknik Sipil, staf dan karyawan Fakultas Teknik serta staf Laboratorium dan asisten Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu ayahanda **Prof. Dr. Ir. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng** dan ibunda **Nur Indah, SE** atas doa, kasih sayang, dan segala dukungan selama ini, baik spritiual maupun material,
2. serta seluruh keluarga besar atas sumbangsih dan dorongan yang telah diberikan.
3. Saudara-saudari tercinta **Hikari Khalilah Tjaronge, ST. , Muhammad Wirda Nur Tjaronge, Muhammad Yusuf Inori Tjaronge, Muhammad Umar Kenzo Tjaronge, dan Nur Fatimah Kaori Tjaronge** yang selalu memberikan semangat dalam penyelesaiannya tugas akhir ini.
4. Seluruh rekan-rekan di Laboratorium Riset Eco Material, yang senantiasa memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
5. Saudara-saudari Portland 2020 yang senantiasa memberikan warna yang sangat begitu indah, dukungan yang tiada henti, semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan pernah luput dari kekurangan, oleh karena itu mengharapkan kepada pembaca kiranya dapat memberi sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan tugas akhir ini.

Akhirnya semoga Tuhan Yang Maha Esa melimpahkan berkat dan karunia-Nya kepada kita dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

Gowa, 9 Maret 2023

Penulis

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kemudahan pembuatan mortar berbasis semen hidrasi (*hydrated cement*), serta material dasar lainnya berupa pengikat berbahan semen (*cementitious material*) atau semen Portland, pasir sungai maupun partikel lolos saringan no.4 dari pengolahan batu pecah yang digunakan sebagai agregat halus juga dapat dijumpai dengan jumlah yang mencukupi secara ekonomis dan tersebar di banyak tempat. Faktor-faktor di atas menyebabkan mortar banyak diaplikasikan sebagai material bangunan untuk mengikat pasangan batu bata, plester untuk permukaan pasangan batu bata, pengikat pasangan batu kali atau batu gunung untuk pondasi rumah maupun tanggul (*revetment*) tebing sungai dan pantai atau pengikat pasangan batu untuk saluran irigasi, drainase serta terdapat banyak lagi pemanfaatan mortar berbasis semen. Seiring dengan meningkatnya permintaan akan rumah tinggal maupun gedung serta infrastruktur yang banyak menggunakan mortar sebagai bahan perekat maka diperkirakan kebutuhan akan mortar dan material penyusunnya akan terus bertambah secara substansial di masa mendatang.

Di Indonesia, banyak pembangkit listrik berupa pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakar. Proses pembakaran batu bara akan menghasilkan abu terbang, dimana kedua material tersebut dikategorikan hasil sampingan (*by-product*). Namun hingga sekarang ini, sebagian besar abu terbang disimpan di kolam penampungan. Bertambahnya kebutuhan akan energi listrik akan meningkatkan jumlah abu terbang yang tersimpan di kolam penampungan, dimana lahan penyimpanan semakin berkurang dan abu terbang akan memberikan dampak lingkungan yang negatif bila penyimpanannya tidak terkontrol, misalnya abu terbang akan terbang ke wilayah pemukiman atau ke perairan yang menyebabkan terganggunya kesehatan warga dan berpengaruh pada biota perairan.

Abu terbang memiliki silika dalam jumlah yang banyak yang memiliki sifat pozzolan. Karena unsur-unsur silika pada semen, abu terbang adalah sama maka abu terbang dapat digunakan sebagai bahan mortar, yang selanjutnya pembuatan mortar yang mengandung abu terbang akan mengurangi jumlah abu terbang di tempat penampungan. Usaha tersebut akan mendukung pengembangan infrastruktur berkelanjutan yang mengurangi kerusakan lingkungan.

Mortar yang menggunakan *abu terbang* sebagai inovasi teknologi untuk mendukung pembangunan infrastruktur berbasis green ekonomi. Beton atau mortar yang menggunakan abu terbang sebagai bahan tambah semen campuran. Abu terbang merupakan limbah hasil sampingan industry yang berkelanjutan sehingga dapat dikelola dengan baik sehingga dapat mendukung infrastruktur yang ramah lingkungan diantaranya dapat menggantikan OPC dalam industri konstruksi. Ada perhatian besar untuk meningkatkan daya tahan struktur beton. Selain itu, mortar dengan menggunakan abu terbang dan semen campuran tidak hanya akan menghemat konsumsi energi dan mengurangi efek rumah kaca, tetapi juga menghilangkan limbah produk sampingan dari bahan alumino-silikat. Bahan limbah telah menjadi salah satu aspek terpenting dan menantang yang mengarah pada masalah lingkungan. Sumber alumino silikat merupakan produk sampingan seperti terak nikel, abu terbang, dan asap silika.

Salah satu beban yang akan dipikul oleh mortar sebagai perekat adalah beban tekan. Perilaku tegangan regangan yang terjadi pada suatu material termasuk mortar ketika merespons beban tekan merupakan parameter yang penting untuk diketahui. Beban titik merupakan salah satu metode uji yang awalnya digunakan untuk mengestimasi kekuatan batuan. Penelitian ini menerapkan beban titik bersama beban tekan untuk mempelajari mortar yang mengandung abu terbang sebesar 10%,20%,30% sebagai pengganti semen.

Telah umum diketahui abu terbang dapat menggantikan semen tapi masih kurangnya pengetahuan mengenai penggunaan abu terbang sebagai pengganti agregat halus.

Berdasarkan latar belakang di atas, maka dilakukanlah penelitian dengan judul:

“PERILAKU MORTAR YANG MENGGUNAKAN ABU TERBANG DAN SEMEN CAMPURAN DI BAWAH BEBAN TITIK DAN TEKAN”

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan maka rumusan masalah dalam studi ini adalah kuat tekan beban titik serta perilaku tegangan dan regangan mortar yang mengandung abu terbang akibat beban tekan.

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang terkait, maka dapat dirumuskan beberapa tujuan, yaitu:

1. Tujuan melakukan pengujian beban titik untuk mengukur kemampuan mortar normal, mortar dengan 10%,20%,dan 30% yang mengandung abu terbang sebagai pengganti semen menerima beban terkonsentrasi berupa beban titik.
2. Tujuan melakukan pengujian kuat tekan yang dilengkapi dengan defelksi sehingga dapat Menyusun hubungan tegangan regangan yang digunakan untuk mengukur kuat tekan, elastisitas dan toughness mortar normal, mortar dengan 10%,20%,dan 30% yang mengandung abu terbang sebagai pengganti semen.

1.4. Manfaat Penelitian/Perancangan

Manfaat dari penelitian ini adalah menggambarkan pengaruh dari beban titik dan beban dan beban tekan pada mortar yang mengandung *cement Portland* dan abu terbang

1.5. Ruang Lingkup/Asumsi perancangan

Agar penelitian ini berjalan dengan baik dan sesuai dengan rencana, maka penelitian ini diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Abu terbang yang digunakan adalah rendah kalsium (kelas F).
2. Semen yang digunakan adalah salah satu jenis semen campuran (*blended cement*), yaitu semen Portland Komposit (SNI).
3. Pengujian kuat tekan dilaksanakan pada umur 7 dan 28 hari pada kondisi curing air

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 MORTAR

2.1.1 Defenisi dan Penggunaan Mortar

Campuran antara semen, air dan agregat halus atau pasir dikenal sebagai mortar. Mortar pada umumnya digunakan pada bagian bangunan non struktural seperti plesteran yang mengisi siar-siar pada susunan batu bata sehingga mampu mengikat susunan batu bata dan membentuk dinding yang kuat. Mortar juga digunakan untuk menutupi susunan batu bata sehingga terhindar dari hujan dan sengatan matahari secara langsung. Selain itu mortar digunakan sebagai perekat keramik di dinding, ferosemen dan sebagainya. Kemampuan mortar untuk mengikat batu bata atau keramik dan daya tahan mortar terhadap cuaca ditentukan oleh mutu atau kekuatan suatu campuran mortar. Gambar 1 memperlihatkan penggunaan mortar sebagai bahan pengikat batu bata dan plesteran permukaan.



Gambar 1 contoh penggunaan mortar

2.1.2 Jenis-jenis mortar

Terlihat pada SNI 03-6882-2014: Spesifikasi Mortar Untuk Pekerjaan Pasangan, Badan. Standarisasi Nasional, mendefinisikan jenis-jenis mortar seperti Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1 Jenis-jenis spesifikasi proporsi mortar

Mortar	Tipe	campuran dalam volume (bahan bersifat semen)				Rasio agregat
		semen portland/ semen giling	semen pasangan			
			M	S	N	
kapur semen	M	1	2 1/4 - 3 kali jumlah volume bahan bersifat semen
	S	1	...	...	...
	N	1	...	...	...
	O	1	...	...	...
Semen	M	1	1	2 1/4 - 3 kali jumlah volume bahan bersifat semen
	M	...	1	...	...
	S	1,2	...	...	1
	S	...	...	1	...
	N	...	...	...	1
O	...	...	...	1	

Tabel 2 Panduan untuk memilih mortar pasangan

Lokasi	Bagian Bangunan	Tipe Mortar	
		Rekomendasi	Alternatif
bagian luar, di atas level	dinding pemikul beban	N	S atau M
	dinding bukan pemikul beban sandaran dinding	O	S atau M
		N	S
bagian luar, di bawah level	pondasi, dinding, dinding pemikul beban, manhole, sumur, jalan, setapak	S	M atau N
bagian dalam	Dinding pemikul beban, Partisi bukan pemikul beban	N	S atau M
		O	N
Bagian luar dan dalam	Dekoratif	O	N

Menurut ASTM C270 – 14a, *Standard Specification for Mortar for Unit Masonry*, mortar untuk adukan pasangan dapat dibedakan atas 5 tipe, yaitu:

a. Mortar tipe M

Mortar tipe M merupakan campuran dengan kuat tekan yang tinggi yang direkomendasikan untuk pasangan bertulang maupun pasangan tidak bertulang yang akan memikul beban tekan yang besar. Kuat tekan minimumnya 17,2 MPa.

b. Mortar tipe S

Mortar tipe ini direkomendasikan untuk struktur yang akan memikul beban tekan normal tetapi dengan kuat lekat lentur yang diperlukan untuk menahan beban lateral besar yang berasal dari tekanan tanah, angin dan beban gempa. Karena keawetannya yang tinggi, mortar tipe S juga direkomendasikan untuk struktur pada atau di bawah tanah, serta yang selalu berhubungan dengan tanah, seperti pondasi, dinding penahan tanah, perkerasan, saluran pembuangan dan *mainhole*. Kuat tekan minimumnya adalah 12,4 MPa.

c. Mortar tipe N

Mortar Tipe N merupakan mortar yang umum digunakan untuk konstruksi pasangan di atas tanah. Mortar ini direkomendasikan untuk dinding penahan beban interior maupun eksterior. Mortar dengan kekuatan sedang ini memberikan kesesuaian yang paling baik antara kuat tekan dan kuat lentur, workabilitas, dan dari segi ekonomi yang direkomendasikan untuk aplikasi konstruksi pasangan umumnya. Kuat tekan minimumnya adalah 5,2 MPa.

d. Mortar tipe O

Mortar tipe O merupakan mortar dengan kandungan kapur tinggi dan kuat tekan yang rendah. Mortar tipe ini direkomendasikan untuk dinding interior dan eksterior yang tidak menahan beban struktur, yang tidak menjadi beku dalam keadaan lembab atau jenuh. Mortar tipe ini sering digunakan untuk pekerjaan setempat, memiliki workabilitas yang baik dan biaya yang ekonomis. Kuat tekan minimumnya adalah 2,4 MPa.

e. Mortar tipe K

Mortar tipe K memiliki kuat tekan dan kuat lekat lentur yang sangat rendah. Mortar tipe ini jarang digunakan untuk konstruksi baru, dan direkomendasikan dalam ASTM C270 hanya untuk konstruksi bangunan lama yang umumnya menggunakan mortar kapur. Kuat tekan minimumnya adalah 5,2 MPa.

Persyaratan spesifikasi properti mortar dapat dilihat pada Tabel 3 sesuai dengan SNI 6882-2014 :

Tabel 3 Persyaratan spesifikasi properti

Mortar	Tipe	Kekuatan tekan rata-rata pada umur 28 hari, min, MPa (psi)	Retensi air, min, %	Kadar udara, maks, % ^B	Rasio agregat (diukur dalam kondisi lembab, lepas)
Semen-kapur	M	17,2 (2 500)	75	12	Tidak kurang dari 2¼ dan tidak lebih dari 3½ jumlah dari volume -volume terpisah dari material sementisius
	S	12,4 (1 800)	75	12	
	N	5,2 (750)	75	14	
	O	2,4 (350)	75	14	
Semen mortar	M	17,2 (2 500)	75	12	
	S	12,4 (1 800)	75	12	
	N	5,2 (750)	75	14	
	O	2,4 (350)	75	14	
Semen pasangan	M	17,2 (2 500)	75	18	
	S	12,4 (1 800)	75	18	
	N	5,2 (750)	75	20	
	O	2,4 (350)	75	20	

2.1.3 Penelitian terdahulu Abu terbang mortar

Young Keun Cho dkk (2019) melakukan penelitian mengenai pengaruh komposisi kimia pada fase amorf dan fase kristal dari abu terbang terhadap kuat tekan mortar semen abu terbang. Mortar semen berbasis abu terbang dibuat dengan mengganti 25% berat semen dengan 16 jenis abu terbang, dan dievaluasi kuat tekan benda uji. Hasil penelitian memperlihatkan kuat tekan meningkat seiring dengan usia mortar karena perbedaan reaktivitas pozzolan. Pengaruh berbagai parameter kimia dari abu terbang dianalisis dan menunjukkan reaksi pozzolan abu terbang sangat

dipengaruhi oleh komponen SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 yang membentuk kerangka fasa kaca (gelas), serta komponen CaO , MgO , Na_2O , dan K_2O yang mendepolimerisasi struktur kaca.

Ahmed Salih dkk (2021) mengembangkan analisis dimana kekerasan mortar semen dengan abu terbang volume tinggi dievaluasi dan dimodelkan menggunakan teknik model yang berbeda. Untuk membangun model multiskala yang sistematis yang bertujuan memprediksi kekuatan tekan mortar semen yang mengandung abu terbang volume tinggi dan untuk digunakan oleh industri konstruksi tanpa batasan teoritis. Untuk tujuan itu, data eksperimen yang luas (total 450 mortar semen yang diuji dimodifikasi dengan abu terbang) dari studi penelitian akademis yang berbeda dianalisis dan dimodelkan secara statistik. Untuk itu digunakan pendekatan Regresi Linier dan Nonlinier, M5P-tree, dan Jaringan Syaraf Tiruan (JST). Dalam proses pemodelan, parameter yang paling relevan mempengaruhi kekuatan mortar semen, yaitu rasio penyertaan abu terbang (kelas C dan F) (0–70% dari massa semen), rasio air terhadap pengikat (0,235–1,2), dan umur pengawetan (1 sampai 365 hari). Berdasarkan koefisien korelasi (R), Mean Absolute Error (MAE), dan Root Mean Square Error (RMSE), kuat tekan mortar semen dapat diprediksi dengan baik dalam hal w/b, abu terbang, dan waktu pemeraman menggunakan berbagai teknik simulasi. Penyelidikan sensitivitas menyimpulkan bahwa waktu pemeraman adalah parameter yang paling mendominasi untuk prediksi kuat tekan mortar semen dengan kumpulan data yang diolah dan dianalisis.

Y. Sun dkk (2021) memaparkan bahwa pemanfaatan abu terbang halus yang ditingkatkan pada bahan berbasis semen terbukti menjadi metode yang efektif untuk meningkatkan kuat tekan pada usia dini. Penambahan abu terbang halus telah memberikan efek pengenceran, meningkatkan efek reaksi pozzolan, efek nukleasi dan efek pengisian fisik ke dalam sistem semen-abu terbang. Dalam studi tersebut, model reaksi terintegrasi diadopsi untuk mengukur kontribusi dari hidrasi semen dan reaksi pozzolan terhadap kuat tekan. Model yang dimodifikasi terkait dengan efek pengisian fisik digunakan untuk menghitung kenaikan kekuatan tekan dengan

mempertimbangkan pembubaran bertahap partikel abu terbang. Melalui kombinasi dari dua bagian ini, prosedur numerik diusulkan untuk memprediksi perkembangan kekuatan tekan mortar abu terbang halus dengan mempertimbangkan kehalusan abu terbang dan rasio penggantian. Keandalan model divalidasi melalui kesepakatan yang baik dengan hasil eksperimen dari artikel sebelumnya. Selain itu, analisis parametrik dilakukan untuk menganalisis lebih lanjut pengaruh kehalusan abu terbang dan rasio penggantian terhadap kuat tekan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan meningkat secara linier dengan meningkatnya kehalusan Abu terbang. Meskipun kemiringannya tidak terlalu dipengaruhi oleh rasio penggantian abu terbang, kemiringannya meningkat seiring dengan perpanjangan waktu pemeraman. Selain itu, kehalusan Abu terbang dapat meningkatkan hubungan antara kuat tekan dan rasio penggantian. Untuk mortar ultrafine Abu terbang, kuat tekan mortar selama 28 hari menunjukkan tren peningkatan pertama dan kemudian menurun seiring dengan peningkatan rasio penggantian. Dalam kondisi memastikan kekuatan tekan yang sama, Abu terbang yang lebih halus dapat menggantikan lebih banyak semen, sehingga mewujudkan penghematan energi dan pengurangan emisi CO₂.

Penelitian yang dilakukan Shihwen Hsu dkk (2018) menyajikan investigasi eksperimental tentang pengaruh kehalusan Abu terbang dan rasio penggantian terhadap sifat-sifat campuran mortar semen. Abu terbang kelas F digiling menjadi tiga nilai kehalusan yang berbeda yaitu 4610 cm²/g, 5690 cm²/g, dan 6300 cm²/g dengan mesin gerinda bola dan digunakan sebagai perbandingan pengganti 0%, 10%, 15%, dan 20% berat semen untuk menghasilkan campuran mortar semen. Dilakukan uji kuat tekan, serapan air, uji porosimetri intrusi merkuri (MIP), scanning electron microscopy (SEM), dan analisis difraksi sinar-X (XRD). Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan Abu terbang menghasilkan peningkatan yang signifikan dalam kekuatan tekan dan penurunan substansial dalam penyerapan air dan pori-pori kapiler untuk mortar semen campuran dibandingkan dengan mortar OPC. Mortar dengan nilai kehalusan 5690 cm²/g dan rasio penggantian FA 20% memiliki kuat tekan tertinggi dan penyerapan air terendah dan porositas terkecil. Analisis XRD

menunjukkan bahwa Ca(OH)_2 merupakan salah satu produk hidrasi selama reaksi hidrasi. Ketika abu terbang dimasukkan ke dalam campuran mortar semen, puncak intensitas Ca(OH)_2 dalam pola XRD menurun. Peningkatan rasio penggantian Abu terbang menurunkan Ca(OH)_2 . Berdasarkan hasil penelitian, baik kehalusan Abu terbang maupun rasio penggantian Abu terbang memiliki pengaruh yang signifikan terhadap sifat-sifat campuran mortar semen.

J. Payá dkk (2000) mempelajari pengaruh penggilingan abu terbang terhadap pengembangan kekuatan mortar abu terbang/semen yang diawetkan pada suhu yang berbeda. Peningkatan kuat tekan (R_c) yang signifikan untuk mortar Abu terbang ditemukan pada usia dini (3 hari) ketika suhu curing dinaikkan. Namun, nilai R_c tertinggi pada waktu pemeraman 28 hari diperoleh untuk mortar abu terbang yang dirawat pada suhu 40°C . Reaktivitas abu layang ditemukan lebih tinggi pada abu layang (GFA) dibandingkan dengan abu layang (T0). Ketika R_c vs. waktu pemeraman (dalam skala logaritmik) direpresentasikan, nilai kemiringan dari data analisis regresi yang diperoleh untuk deret suhu pemeraman 20°C dan ordinat asal dari data analisis regresi yang diperoleh untuk deret suhu pemeraman 40°C atau 60°C menjadi parameter yang baik untuk mengevaluasi aktivitas pozzolan. Kesetaraan antara nilai R_c yang diperoleh pada suhu pemeraman 20°C dan 40°C dan waktu pemeraman yang berbeda diusulkan dari data perolehan kekuatan untuk mortar yang mengandung persentase penggantian 15%, 30%, 45% dan 60%. Akhirnya, nilai kekuatan tekan (R_c) dan lentur (R_f) untuk usia dini dan suhu perawatan yang berbeda diukur. Sebuah model matematis telah diusulkan untuk sifat mekanik mortar yang mengandung Abu terbang pada usia dini pada kisaran penggantian 15-60% dan curing pada kisaran $20-80^\circ\text{C}$.

P Chindapasirt dkk (2004) melakukan penelitian tentang pengaruh kehalusan Abu terbang terhadap kebutuhan air dan beberapa sifat mortar yang diperkeras. Selain Abu terbang asli (OFA), lima nilai kehalusan Abu terbang yang berbeda diperoleh dengan pengayakan dan dengan menggunakan separator udara. Dua saringan, No. 200 dan 325, digunakan untuk mendapatkan dua lot abu terbang halus bergradasi. Untuk klasifikasi menggunakan air separator, OFA dipisahkan menjadi bagian halus, sedang

dan kasar. Dosis Abu terbang 40% berat bahan pengikat digunakan selama percobaan. Dari pengujian diketahui bahwa kuat tekan mortar bergantung pada kehalusan Abu terbang. Kekuatan mortar yang mengandung Abu terbang halus lebih baik daripada mortar OFA pada semua umur dengan Abu terbang yang sangat halus memberikan kekuatan tertinggi. Penggunaan semua abu layang menghasilkan peningkatan yang signifikan dalam penyusutan pengeringan dengan abu layang kasar yang menunjukkan peningkatan paling sedikit terutama karena rasio air terhadap pengikat (W/B) yang tinggi dari campuran. Peningkatan yang signifikan dari ketahanan terhadap ekspansi sulfat diperoleh untuk semua nilai kehalusan kecuali untuk Abu terbang kasar di mana ekspansi yang lebih besar diamati. Ketahanan terhadap serangan asam sulfat juga ditingkatkan dengan penggabungan semua abu terbang. Dalam hal ini Abu terbang kasar memberikan kinerja terbaik dengan tingkat penurunan berat terendah mungkin karena ikatan yang lebih baik dari partikel Abu terbang kasar ke matriks semen dan produk hidrasi yang lebih sedikit. Disarankan agar abu terbang halus lebih reaktif dan penggunaannya menghasilkan matriks semen yang lebih padat dan sifat mekanik mortar yang lebih baik.

Y.L. Wong dkk (199) menulis makalah yang menyelidiki pengaruh abu terbang pada kekuatan dan sifat patah dari antarmuka antara mortar semen dan agregat. Mortar disiapkan pada rasio air-untuk-pengikat 0,3, dengan penggantian Abu terbang 15-55%. Balok mortar berlekuk diuji untuk menentukan kekuatan lentur, ketangguhan patah, dan energi patah dari semen polos dan mortar semen modifikasi fly-ash. Satu set balok berlekuk dengan antarmuka agregat mortar di atas takik diuji untuk menentukan kekuatan lentur, ketangguhan patah, dan energi patah antarmuka. Kubus antarmuka agregat mortar diuji untuk menentukan kekuatan pemisahan antarmuka. Ditemukan bahwa penggantian 15% Abu terbang meningkatkan kekuatan ikatan antarmuka dan ketangguhan patah. Penggantian Abu terbang pada tingkat 45 dan 55% mengurangi kekuatan ikatan antarmuka dan ketangguhan patah pada 28 hari, tetapi memulihkan hampir semua pengurangan pada 90 hari. Penggantian Abu terbang pada semua level yang diteliti meningkatkan energi rekahan antar muka. Abu terbang berkontribusi pada

sifat antarmuka terutama melalui efek pozzolan. Untuk persentase penggantian yang lebih tinggi, perkembangan kekuatan ikatan antar muka pada awalnya berada di belakang perkembangan kekuatan tekan. Tetapi pada usia selanjutnya, yang pertama melampaui yang terakhir. Penguatan antarmuka mengarah pada peningkatan kekuatan jangka panjang yang lebih tinggi dan daya tahan yang sangat baik untuk beton Abu terbang volume tinggi.

Fahad K. Alqahtani dkk (2021) memaparkan Pemanfaatan Abu terbang (FA) dalam mortar/beton sebagai pengganti sebagian semen umumnya sekitar 30% berat dan secara global sebagian besar FA dibuang ke tempat pembuangan akhir yang memiliki beban lingkungan. Pekerjaan eksperimental menyajikan solusi praktis dan hemat biaya untuk potensi pemanfaatan FA volume ultra-tinggi untuk sintesis tiga jenis mortar sebagaimana ditentukan dalam ASTM C1329. Pada awalnya, aktivitas pozzolan FA dievaluasi melalui uji Chapelle yang dimodifikasi, analisis termogravimetri dan indeks aktivitas kekuatan. Kemudian mortar disiapkan dengan mengganti semen dengan FA hingga 100% dan kuat tekan yang ditargetkan diperoleh melalui penyemenan dan dengan aktivasi alkali (geopolimerisasi). Parameter yang berbeda seperti; molaritas aktivator alkali, rasio cair terhadap padat dan rasio natrium silikat terhadap natrium hidroksida, yang mempengaruhi sifat mortar geopolimer juga dipelajari. Uji kuat tarik dan uji kuat tarik belah antar muka juga dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaiannya dengan beton konvensional. Karakterisasi semua jenis mortar dilakukan dengan analisis spektroskopi inframerah transformasi Fourier dan memverifikasi geopolimerisasi serta kinerja mekanisnya. Terakhir, dilakukan analisis komparatif dalam hal keberlanjutan, evaluasi indikator teknis-ekonomi-lingkungan. Disimpulkan bahwa formulasi mortar geopolimer hijau adalah solusi yang berkelanjutan, memiliki kekuatan mekanik yang lebih baik, jejak CO₂ paling sedikit dan ekonomis. Hasil menunjukkan bahwa 60% penggantian FA dimungkinkan melalui penyemenan sedangkan untuk tingkat penggantian yang lebih tinggi, aktivasi alkali diperlukan untuk mencapai kekuatan yang ditargetkan

Dalam penelitian yang dilaksanakan oleh B. Kondraivendhan dan B. Bhattacharjee (2015), kuat tekan dan perilaku aliran abu terbang yang dimasukkan pasta semen dan mortar diselidiki. Untuk tujuan ini, empat rasio air terhadap pengikat ($w/(c+f)$) seperti 0,25, 0,35, 0,45 dan 0,55 dengan tiga umur pemeraman dan lima kisaran tingkat penggantian abu terbang (rasio f/c) yaitu 0, 0,1, 0,2, 0,3 dan 0,4 diperkenalkan dalam skema eksperimental. Kemampuan kerja campuran dipastikan melalui uji Marsh cone dan flow table masing-masing untuk pasta semen dan mortar campuran abu terbang. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kuat tekan meningkat seiring bertambahnya usia seperti yang diharapkan dalam semua kasus dan hubungan empiris untuk kuat tekan campuran pasta semen dan mortar dengan faktor campuran seperti rasio $w/(c+f)$, rasio f/c dan usia juga diajukan. Kurva rasio kuat tekan versus $w/(c+f)$ yang diperkirakan untuk umur pemeraman yang berbeda dan rasio f/c menyerupai sifat kurva rasio kekuatan versus w/c Abrams.

Gengying Li dan Xiaozhong Wu (2005) melaporkan penyelidikan eksperimental tentang efek dari penggabungan volume besar abu terbang pada sifat rekayasa awal dan kekuatan jangka panjang mortar pasangan bat. Pengaruh abu terbang dan ukuran partikel rata-rata (PD) pada variasi kemampuan kerja dan kekuatan telah dipelajari. Ditemukan bahwa Abu terbang dan ukuran partikel rata-rata memainkan peran yang sangat signifikan terhadap kekuatan mortar pasangan bata. Telah diamati bahwa kekuatan jangka awal, kecuali mortar yang menggabungkan abu terbang kasar (CFA), sedikit dipengaruhi oleh penggantian dengan abu terbang. Kekuatan jangka panjang (baik kekuatan ikat maupun kekuatan tekan) akan meningkat secara signifikan, terutama untuk kekuatan ikat mortar yang menggunakan abu terbang kasar. Ditemukan juga bahwa kekuatan ikatan meningkat secara signifikan seiring dengan penurunan ukuran partikel rata-rata abu terbang setelah 28 hari pemeraman. Namun, kekuatan 7 hari sedikit dipengaruhi oleh ukuran partikel Abu terbang. Fluiditas mortar komposit meningkat karena penggantian semen dan kapur dengan Abu terbang, dan rata-rata PD Abu terbang berpengaruh nyata terhadap workability.

2.2 Semen Portland

2.2.1 Semen Portland

Indonesia telah mampu memproduksi semen Portland yang terdiri atas 5 jenis dan penggunaan (semen Portland jenis I,II,III,IV dan V). Dewasa ini, Indonesia juga telah mengembangkan semen Portland Pozzolan dan semen Portland Komposit yang menggunakan material anorganik dan klinker semen.

Semen Portland (menurut SNI 2049-2015) adalah semen hidrolis dengan menggiling terak semen Portland terutama yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambah berupa satu atau lebih kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain. Jenis dan penggunaannya adalah sebagai berikut:

- a. Jenis I yaitu semen portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis lain.
- b. Jenis II yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang.
- c. Jenis III semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi.
- d. Jenis IV yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah.
- e. Jenis V yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat.

B.2 Komposisi Semen Portland (SNI 2049-2015)

tabel 4 Syarat kimia utama (SNI 2049-2015) Satuan dalam %

No.	Uraian	Jenis semen portland				
		I	II	III	IV	V
1	SiO ₂ , minimum	20,0 ^(b,c)				
2	Al ₂ O ₃ , maksimum	6,0				
3	Fe ₂ O ₃ , maksimum	6,0 ^(b,c)	-	6,5	-	-
4	MgO, maksimum	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
	SO ₃ , maksimum					
5	Jika C ₃ A ≤ 8,0	3,0	3,5 ^{d)}	3,5	2,3 ^{d)}	2,3 ^{d)}
	Jika C ₃ A > 8,0	3,5		4,5		
6	Hilang pijar, maksimum	5,0	3,0	3,0	2,5	3,0
7	Bagian tak larut, maksimum	3,0	1,5	1,5	1,5	1,5
8	C ₃ S, maksimum ^{a)}	-	-	-	35 ^{b)}	-
9	C ₂ S, minimum ^{a)}	-	-	-	40 ^{b)}	-
10	C ₃ A, maksimum ^{a)}	-	8,0	15	7 ^{b)}	5 ^{b)}
	C ₄ AF + 2 C ₃ A atau ^{a)}					
11	C ₄ AF + C ₂ F , maksimum	-	-	-	-	25 ^{b)}

Tabel 5 Syarat fisika utama (SNI 2049-2015)

No	Uraian	Jenis semen portland				
		I	II	III	IV	V
1	Kehalusan: Uji permeabilitas udara, m ² /kg					
	Dengan alat :					
	Turbidimeter, min	160	160	160	160	160
	Blaine, min	280	280	280	280	280
2	Kekekalan : Pemuaiian dengan autoclave, maks %	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
3	Kuat tekan:					
	Umur 1 hari, kg/cm ² , minimum	-	-	120	-	-
	Umur 3 hari, kg/cm ² , minimum	125	100	140	-	80
	Umur 7 hari, kg/cm ² , minimum		70 ^{a)}			
	Umur 28 hari, kg/cm ² , minimum	200	175	-	70	150
		280	120 ^{a)}	-	170	210
4	dengan alat:					
	Gillmore					
	- Awal, menit, minimal	60	60	60	60	60
	- Akhir, menit,maksimum	600	600	600	600	600
	Vicat					
- Awal, menit, minimal	45	45	45	45	45	
- Akhir, menit,maksimum	375	375	375	375	375	

2.2.2 Komposisi Kimia Semen Portland

Klinker semen Portland mengandung empat senyawa kimia utama, yang disebut sebagai mineral-mineral klinker. Komposisi mineral klinker semen dirangkum dalam Tabel 6. Komposisi kimia yang potensial dari semen Portland dapat dianalisa dengan menggunakan komposisi Bogue, seperti yang diperlihatkan di bawah.

$$C_3S = 4,071(\text{total CaO, kapur bebas}) - 7,600SiO_2 - 6,718Al_2O_3 -$$

$$1,430Fe_2O_3$$

$$C_2S = 2,867SiO_2 - 0,7544C_3S$$

$$C_3A = 2,65Al_2O_3 - 1,692Fe_2O_3$$

$$C_4AF = 3,043Fe_2O_3$$

Kedua mineral kalsium silikat, C_3S dan C_2S (dalam bentuk β - C_2S) merupakan unsur utama dalam pengembangan kekuatan dan memiliki pengaruh yang besar terhadap ketahanan dan sifat struktural jangka panjang dari semen Portland. Namun, reaksi antara CaO (kapur dari batu kapur) dan SiO_2 (silika dari pasir) sangat sulit dicapai, bahkan pada suhu pembakaran yang tinggi. Untuk itu perlu ditambahkan sejumlah alumina (Al_2O_3) sebesar 5% dan oksida besi (Fe_2O_3) sebesar 3% untuk membentuk fluks cair yang membantu kapur dan silika dapat larut, dan kemudian bereaksi untuk menghasilkan C_3S dan C_2S .

Tabel 6 Mineral utama dalam klinker semen Portland

Rumus Kimia	Nama Mineral	Singkatan	Jumlah (%)	Batas (% berat)
3CaOSiO_2 atau, Ca_3SiO_5	Alite	C_3S	57	45-65
2CaOSiO_2 atau, Ca_2SiO_5	Belite	C_2S	16	10-30.
$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ atau, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	Aluminate	C_3A	9	5-12.
$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ atau, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	Ferrite	C_4AF	10	6-12.

2.3 Agregat halus dan Material Pozzolan

2.3.1 Agregat Halus

2.3.1.1 Agregat Halus secara Umum

Agregat yang terdiri atas agregat kasar dan halus menempati sekitar 75% dari isi total beton, demikian juga mortar mengandung agregat halus sekitar 75%. Faktor ini menyebabkan sifat-sifat agregat sangat mempengaruhi kekuatan beton dan mortar, dan juga mempengaruhi ketahanan (durability, daya tahan terhadap kemunduran mutu akibat pengaruh cuaca dan pengaruh umur serta material agresif). Agregat kasar dan halus lebih murah dari semen, sehingga digunakan dengan persentase setinggi mungkin pada campuran beton dan mortar. Penggunaan agregat diatur jumlahnya berdasarkan ukuran dan suatu komposisi campuran agregat yang menunjukkan persentase dari agregat yang halus dan yang kasar.

Agregat halus (pasir) adalah bahan yang lolos dari ayakan No. 4 [yaitu, lebih kecil dari 3/16 inci (5mm) di dalam diameter]. Agregat kasar (kerikil atau batu pecah) adalah semua bahan yang berukuran lebih besar dari ayakan no.4. Agregat alamiah yang memenuhi standar dipakai dalam kebanyakan konstruksi beton dan mortar. Materi pasir sebagai agregat halus harus bersih dari kandungan lumpur dan kotoran. Batu pecah (cipping dan split) berbentuk kotak dan tidak berbentuk pipih panjang.

- Data-data karakteristik agregat yang harus diketahui adalah:

- Berat jenis
- Gradasi
- Kadar air
- Kadar lumpur
- Berat volume
- Keausan
- Resapan agregat
- Kandungan organik
- Modulus kehalusan
- Diameter maksimum agregat

- 1) Agregat halus untuk beton adalah agregat berupa pasir alam sebagai hasil desintegrasi alami dari batuan-batuan atau berupa pasir buatan yang dihasilkan oleh alat-alat pemecah batu dan mempunyai ukuran butir sebesar 5 mm;
- 2) Pasir standar, yang dimaksud dalam standar ini adalah pasir kwarsa alam dari, dengan susunan butir dan sifat-sifat tertentu yang digunakan untuk uji semen portland.

Agregat halus harus memenuhi persyaratan di bawah ini:

1. agregat halus harus terdiri dari butir-butir tajam dan keras, dengan indeks kekerasan $\leq 2,2$;
2. butir-butir agregat halus harus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh-pengaruh cuaca, seperti terik matahari dan hujan;

3. sifat kekal, apabila diuji dengan larutan jenuh garam sulfat sebagai berikut:
 - 3.1. jika dipakai Natrium Sulfat, bagian yang hancur maksimum 12%;
 - 3.2. jika dipakai Magnesium Sulfat, bagian yang hancur maksimum 10%.
4. agregat halus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5% (ditentukan terhadap berat kering). Yang diartikan dengan lumpur adalah bagian-bagian yang dapat melalui ayakan 0,060 mm. apabila kadar lumpur melampaui 5%, maka agregat harus dicuci;
5. agregat halus tidak boleh mengandung bahan-bahan organis terlalu banyak yang harus dibuktikan dengan percobaan warna dari Abrams-Herder. Untuk itu bila direndam dalam larutan 3% NaOH, cairan di atas endapan tidak boleh lebih gelap dari warna larutan pembanding. Agregat halus yang tidak memenuhi percobaan warna ini dapat juga dipakai, asal kekuatan tekan adukan agregat tersebut pada umur 7 dan 28 hari tidak kurang dari 95% dari kekuatan adukan agregat yang sama tetapi dicuci dalam larutan 3% NaOH yang kemudian dicuci hingga bersih dengan air, pada umur yang sama;
6. susunan besar butir agregat halus mempunyai modulus kehalusan antara 1,5 – 3,8 dan harus terdiri dari butir-butir yang beraneka ragam besarnya. Apabila diayak dengan susunan ayakan yang ditentukan, harus masuk salah satu dalam daerah susunan butir menurut zone: 1, 2, 3, atau 4 (SKBI/BS.882) dan harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:
 - 6.1. sisa di atas ayakan 4,8 mm, harus maksimum 2% berat;
 - 6.2. sisa di atas ayakan 1,2 mm, harus minimum 10% berat;
 - 6.3. sisa di atas ayakan 0,30 mm, harus minimum 15%.
7. untuk beton dengan tingkat keawetan yang tinggi, reaksi pasir terhadap alkali harus negatif;
8. pasir laut tidak boleh dipakai sebagai agregat halus untuk semua mutu beton, kecuali dengan petunjuk-petunjuk dari lembaga pemeriksaan bahan-bahan yang diakui;
9. agregat halus yang digunakan untuk maksud spesi plesteran dan spesi terapan harus memenuhi persyaratan di atas (pasir pasang).

Standar pasir

Standar pasir menguji semen portland dan *Abu terbang* harus digunakan pasir kwarsa alam, berbentuk bulat, bersih, keras, serta memenuhi ketentuan tersebut di bawah ini.

- 1) Kadar Silika (SiO_2), minimum: 95,0%
- 2) Kadar Silika (SiO_2), yang larut dalam HCl, maksimum: 0,25%
- 3) Kadar Zat Organik, dibanding dengan standar warna: lebih jernih dari warna standar.
- 4) Kadar lumpur: 0,0%
- 5) Susunan butir, antara lobang 1,2 dan 0,6 mm, jumlahnya: $100\% \pm 2$.

2.3.2 Material Pozzolan

2.3.2.1 Material Pozzolan secara Umum

Material Pozzolan adalah material yang komposisi penyusunnya mengandung silika atau alumina-silika atau kombinasi keduanya. Material pozzolan tidak akan mengeras dengan sendirinya bila dicampur dengan air tetapi, ketika ditumbuk halus dan dengan adanya air, mereka bereaksi pada suhu kamar normal dengan kalsium hidroksida terlarut ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) untuk membentuk kekuatan dengan mengembangkan senyawa kalsium silikat dan kalsium aluminat. Senyawa-senyawa ini mirip dengan yang dibentuk dalam pengerasan material hidrolis.

Pozzolan terutama terdiri dari silikon dioksida reaktif (SiO_2) dan aluminium oksida (Al_2O_3). Sisanya adalah besi oksida (Fe_2O_3) dan oksida lainnya. Proporsi kalsium oksida yang reaktif untuk pengerasan dapat diabaikan. Jumlah silikon dioksida yang reaktif harus tidak kurang dari 25,0% dari massa.

2.3.2.2 Pozzolan Alami

Pozzolan alami merupakan material-material yang berasal dari gunung berapi atau hasil sedimentasi bebatuan dengan komposisi kimia dan mineralogi harus memenuhi pozzolan.

2.3.2.3 Material Pozzolan Berkapur Alami (*Natural Calcined Pozzolana*)

Material pozzolan berkapur adalah material pozzolan alam yang dikalsinasi yang merupakan material pozzolan yang berasal dari abu vulkanik, lempung, serpihan lempung (*shale*) atau batuan sedimen, yang diaktifkan oleh perlakuan thermal.

2.3.2.4 Abu Terbang (*Abu terbang*)

Abu terbang atau abu terbang merupakan residu pembakaran batu bara yang diperoleh dengan mengendapkan secara elektrostatis atau mekanis debu partikel hasil pembakaran batu bara dari gas buang pada tungku pembakaran. Abu terbang terdiri atas 2 macam yaitu yang pertama mengandung silika (*siliceous*) memiliki karakteristik pozzolan. Jenis abu terbang yang kedua berkapur dalam bentuk alami (*calcareous*), mungkin memiliki karakteristik pozzolan, di samping itu, memiliki sifat hidrolik. Kehilangan massa akibat pembakaran (*lost of ignition*, LoI atau hilang pijar) dengan waktu pembakaran 1 jam harus dalam dari batasan sebagai berikut:

- a) 0% sampai 5,0% massa
- b) 2,0 % sampai 7,0% massa
- c) 4,0% sampai 9,0% dari massa

Batas atas LoI dari abu terbang yang digunakan sebagai kandungan utama untuk produksi semen harus dicantumkan pada kemasan atau catatan pengiriman. Tujuan dari persyaratan untuk LoI adalah untuk membatasi residu karbon yang tidak terbakar dalam abu terbang. Oleh karena itu cukup untuk menunjukkan, melalui pengukuran langsung dari residu karbon yang tidak terbakar, bahwa jumlah karbon yang tidak terbakar ada dalam batas-batas kategori tersebut di atas.

A. Abu Terbang (*Abu terbang*) Jenis Siliceous

Abu terbang jenis siliceous adalah serbuk halus dari partikel berbentuk bola yang sebagian besar memiliki sifat pozzolanik. Pada dasarnya terdiri dari silikon dioksida (SiO_2) dan aluminium oksida (Al_2O_3) yang reaktif. Sisanya mengandung besi oksida (Fe_2O_3) dan senyawa lainnya. Kandungan kalsium oksida reaktif (CaO) harus kurang dari 10,0% massa, kandungan kalsium oksida bebas, tidak melebihi 1,0% massa. Abu terbang yang memiliki kandungan kalsium oksida bebas lebih tinggi dari

1,0% massa tetapi kurang dari 2,5% massa juga dapat diterima, asalkan persyaratan pada ekspansi (*soundness*) tidak melebihi 10 mm saat diuji menggunakan campuran 30% massa dari abu terbang jenis siliceous dan 70% massa dari semen CEM sesuai dengan EN 197-1. Kandungan silikon dioksida yang reaktif tidak kurang dari 25,0% massa.

B. Abu Terbang Berkapur (Calcareous Abu terbang)

Abu terbang berkapur adalah kapur bubuk halus, yang memiliki sifat hidrolik dan/atau pozzolanik. Pada dasarnya terdiri dari oksida kalsium reaktif (CaO), reaktif silikon dioksida (SiO₂) dan aluminium oksida (Al₂O₃). Sisanya mengandung besi oksida (Fe₂O₃) dan senyawa lainnya. Proporsi kalsium oksida reaktif tidak kurang dari 10,0% massa. Abu terbang berkapur mengandung kalsium oksida reaktif antara 10,0% hingga 15,0% dari jumlah massa dan harus memuat silikon dioksida reaktif tidak kurang dari 25,0% dari jumlah massa. Abu terbang berkapur yang telah dihaluskan mengandung kalsium oksida reaktif lebih dari 15,0% dari jumlah massa, harus mempunyai kuat tekan minimal 10,0 MPa pada umur 28 hari bila diuji sesuai dengan EN 196-1. Sebelum pengujian, abu terbang harus dihaluskan dan kehalusannya pada ayakan basah dengan saringan 40 µm harus antara 10% dan 30% dari jumlah massa.

C. Kategori abu terbang

ASTM C618-05 membagi Abu terbang dalam tiga kelas yaitu kelas N, F dan C seperti pada Tabel 7. Minimum kandungan senyawa SiO₂, Al₂O₃ dan Fe₂O₃ adalah 70% untuk kelas N dan kelas F, sedangkan kelas C antara 50% - 70 %. Sehingga, kandungan CaO pada Abu terbang kelas N dan F relatif kecil dibandingkan dengan kelas C dimana kandungan CaO lebih besar dari pada 10% (ASTM C618-05, 2005)

Tabel 7 Karakteristik fisik Abu terbang (ASTM C618-03, 2003)

Kebutuhan	Kelas		
	N	F	C
<i>Fineness:</i>			
Amount retained when wet-sieved on 45 μm (No. 325) sieve,max,% ^A	34	34	34
<i>Strength activity index:^B</i>			
With portland <i>cement</i> , at 7 days min, percent of control	75 ^c	75 ^c	75 ^c
With portland <i>cement</i> , at 28 days min, percent of control	75 ^c	75 ^c	75 ^c
Water requirement, max,percent of control	115	105	105
<i>Soundness:</i>			
Autoclave expansion or contraction, max,%	0.8	0.8	0.8
Uniformity requirements:			
The density and fineness of individual samples shall not vary from the average established by the ten preceding tests, or by all preceding tests if the number is less than ten, by more than :			
Density, max variation from average, %	5	5	5
Percent retained on 45 μm (No.325,max variation, percentage points from average	5	5	5

Tabel 8 kandungan kimia Abu terbang (ASTM C618-03, 2003)

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

2.4 Air

2.4.1 Fungsi air pada pembuatan mortar dan beton

Air merupakan komponen penting yang diperlukan untuk pembuatan beton dan mortar. Mengingat beton dan mortar merupakan material komposit dimana air memiliki peran utama agar terjadi proses kimiawi dengan semen untuk membasahi agregat dan untuk melumas campuran agar mudah saat proses pengerjaan atau biasa dikenal dengan workabilitas beton atau mortar. Selain itu, air merupakan bahan utama selain dari agregat yang digunakan untuk membuat beton dan mortar. Pada umumnya air minum dapat dipakai untuk campuran beton maupun mortar. Air yang mengandung senyawa-senyawa yang berbahaya, yang tercemar garam, minyak, gula, atau bahan-bahan kimia lain, bila dipakai untuk campuran beton akan sangat menurunkan kekuatannya dan juga dapat mengubah sifat-sifat dari semen serta mengganggu reaksi hidrasi antara air dan semen.

Karena karakteristik pasta semen merupakan hasil reaksi kimiawi antara semen dengan air, maka bukan perbandingan jumlah air terhadap total (semen + agregat halus + agregat kasar) material yang menentukan, melainkan hanya perbandingan antara air dan semen pada campuran yang menentukan. Air yang berlebihan akan menyebabkan banyaknya gelembung air setelah proses hidrasi selesai, sedangkan air yang terlalu

sedikit akan menyebabkan proses hidrasi tidak seluruhnya selesai. Sebagai akibatnya beton yang dihasilkan akan kurang kekuatannya (Edward G. Nawy,1998:14).

2.4.2 Spesifikasi air sebagai bahan bangunan

Air yang dimaksud disini adalah air sebagai bahan yang digunakan untuk pembuatan dan perawatan beton, pemadaman kapur, adukan pasangan dan adukan plesteran. Air berfungsi untuk melakukan reaksi hidrolis dengan semen sehingga dapat membentuk pasta. Jumlah air harus diperhitungkan agar dapat mencukupi kebutuhan untuk melaksanakan reaksi hidrolis dengan semen dan diserap oleh pori-pori agregat.

Persyaratan air sebagai bahan bangunan harus memenuhi syarat sebagai berikut :

- A. Air harus bersih;
- B. Tidak mengandung lumpur, minyak dan benda terapung lainnya yang dapat dilihat secara visual;
- C. Tidak mengandung benda-benda tersuspensi lebih dari 2 gram/liter;
- D. Tidak mengandung garam-garam yang dapat larut dan dapat merusak beton (asam-asam, zat organik dan sebagainya) lebih dari 15 gram/liter. Kandungan klorida (Cl), tidak lebih dari 500 p.p.m dan senyawa sulfat tidak lebih dari 1000 p.p.m sebagai SO₃;
- E. Bila dibandingkan dengan kekuatan tekan adukan dan beton yang menggunakan air suling, maka penurunan kekuatan adukan dan beton yang memakai air yang diperiksa tidak lebih dari 10%;
- F. Semua air yang mutunya meragukan harus dianalisa secara kimia dan dievaluasi mutunya menurut pemakaiannya;
- G. Khusus untuk beton pratekan, kecuali syarat-syarat tersebut diatas air tidak boleh mengandung klorida lebih dari 50 p.p.m.

2.5 SIFAT-SIFAT MEKANIS BAHAN

2.5.1 Beban titik

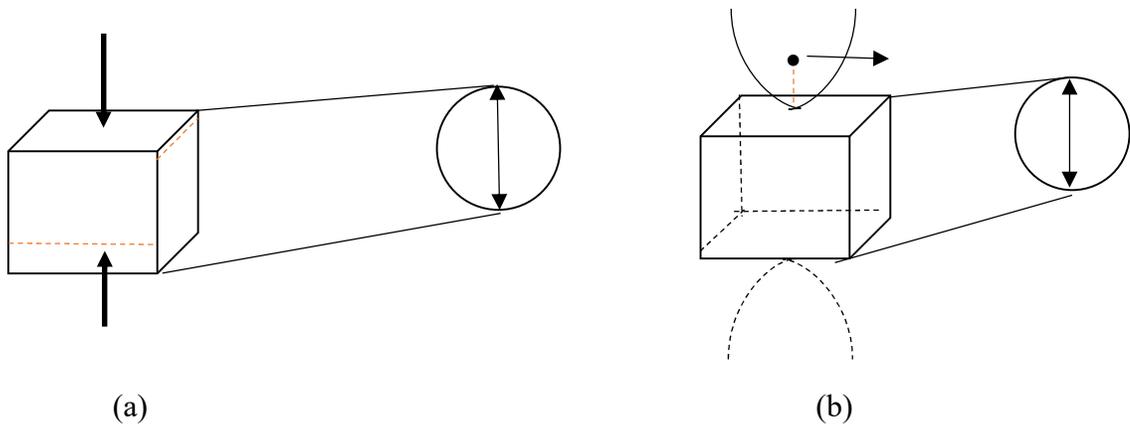
Dalam pengujian aksial yang terdapat pada ASTM D5731-16 diterapkan pada specimen mortar dengan rasio panjang/diameter antara 0.3 dan 1 yang melakukan uji beban titik pada benda uji batuan dengan bentuk yang hampir menyerupai kubus. Rumus 1, 2 dan 3 digunakan untuk memperoleh kekuatan mortar dimana I_s adalah beban titik index (N/mm^2), P merupakan failure load (N) dan D_x diameter (mm).

$$I_{s(50)} = \frac{P}{De^2} \quad (1)$$

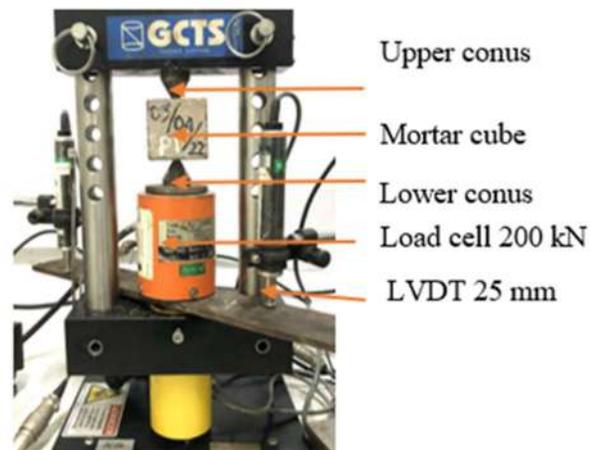
$$D_e = \sqrt{4DW/\pi} \quad (2)$$

$$F = \sqrt{\frac{De}{50}} \quad (3)$$

Pengujian PLSI pada sampel ukuran ekuivalent 50 mm. Untuk pengujian tidak berukuran standar 50 mm, factor koreksi diperhitungkan menggunakan perkiraan F.



Gambar 2 Spesimen kubus a) diameter load cube, b) pelat kerucut secara diametric



Gambar 3 Pengujian beban titik

2.5.2 Tegangan dan Regangan sejajar sumbu akibat beban tekan

Kapasitas suatu material untuk menahan terjadinya kerusakan dipengaruhi oleh tegangan-tegangan yang terjadi. Tegangan akan timbul pada suatu material adalah sebagai akibat dari adanya beban ataupun faktor-faktor lainnya. Beban tekan atau tarik yang sejajar sumbu akan menimbulkan tegangan berupa:

Tegangan tekan (compressive - stress)

Tegangan tarik (tensile - stress)

Tegangan tekan atau tarik merupakan gaya atau beban yang bekerja sejajar sumbu dibagi dengan luas bidang yang menerima gaya tekan atau tarik.

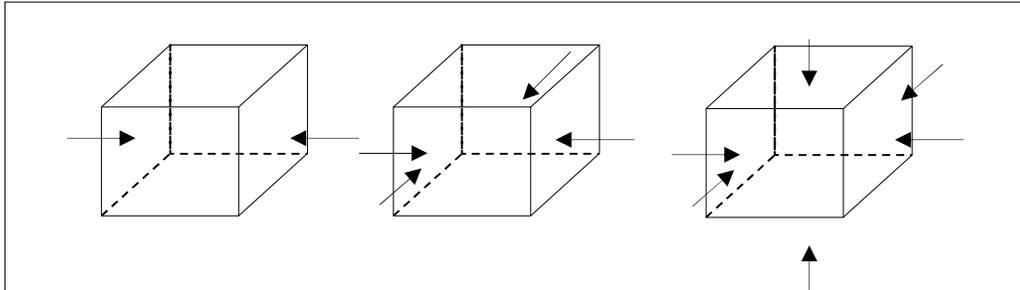
Tegangan (σ) tekan atau tarik ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{P}{A} \text{ kg/cm}^2 \quad (1.1)$$

dimana,

$$\sigma = \text{N/mm}^2, P = \text{gaya atau beban (N)}, A = \text{luas penampang tekan/tarik (mm}^2\text{)}$$

Tegangan ada yang 1 arah, 2 arah dan tiga arah seperti yang terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Tegangan 1 arah, 2 arah dan 3 arah

2.5.3 Regangan

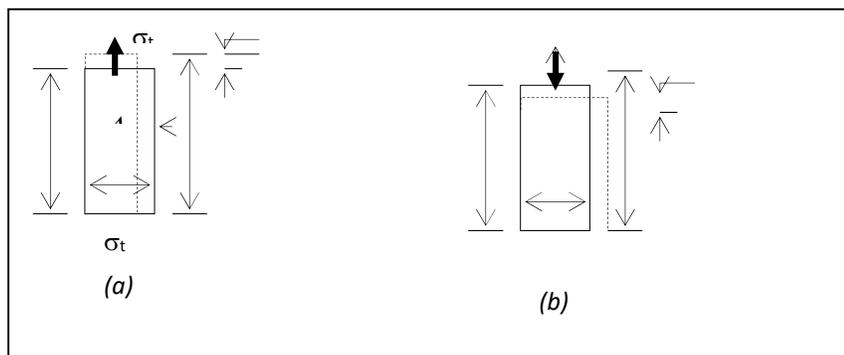
Regangan adalah panjang pertambahan dibagi dengan panjang mula-mula. Gambar 5 memperlihatkan regangan tarik dan regangan tekan.

$$e_t = \frac{\Delta L}{L_o} \quad (1.2)$$

e_t = regangan Tarik

$$e_c = \frac{L_o - L}{L_o} = \frac{\Delta L}{L_o} \quad (1.3)$$

e_c = regangan tekan



Gambar 5 Regangan tarik dan regangan tekan

$$\text{regangan geser } e = \frac{\theta r}{L} \quad (1.4)$$

2.6 Kuat Tekan Mortar

Kuat tekan mortar merupakan kuat tekan maksimum yang dapat dipikul mortar per satuan luas dengan satuan N/mm^2 , yang setara dengan satuan MPa. Dalam mortar maupun beton kuat tekan ditentukan oleh perbandingan semen, agregat halus, agregat kasar, air dan berbagai campuran lainnya. Kuat tekan mortar geopolymer mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya umur mortar.

Berdasarkan SNI 03-6825-2002, kuat tekan mortar dapat dihitung dengan rumus :

$$f'm = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana :

$f'm$ = Kuat tekan mortar (N/mm^2)

P = Beban maksimum (N)

A = Luas penampang yang menerima beban (mm^2)

2.6.1 Perilaku Tegangan-Regangan Mortar

Tegangan merupakan perbandingan antara gaya yang bekerja pada beton atau mortar terhadap luas penampangnya. Regangan adalah perbandingan antara pertambahan panjang (ΔL) terhadap panjang mula-mula (L) regangan dinotasikan dengan ε dan tidak mempunyai satuan. Regangan yang terjadi pada beton dinyatakan dalam persamaan 2.2.

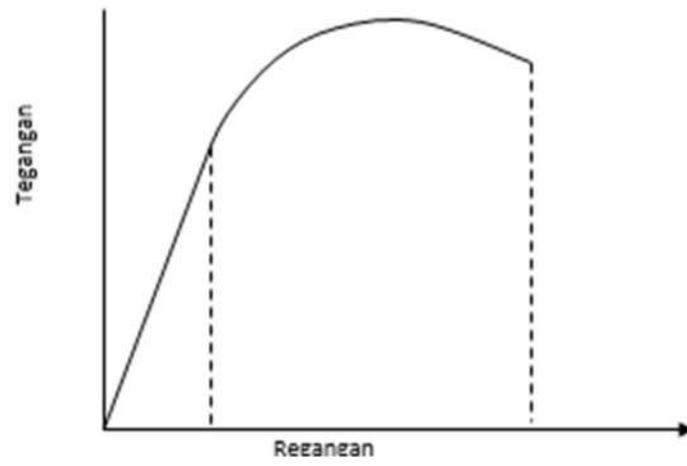
$$\varepsilon = \Delta L/L \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana :

ΔL = perubahan panjang

L = panjang awal

Jika hubungan tegangan dan regangan dibuat dalam bentuk grafik dimana setiap nilai tegangan dan regangan yang terjadi dipetakan kedalamnya dalam bentuk titik-titik, maka titik-titik tersebut terletak dalam suatu garis seperti pada Gambar 6 .



Gambar 6 Hubungan tegangan dan regangan