

TUGAS AKHIR

**KUAT TEKAN MORTAR BERBAHAN TERAK NIKEL
GRANULASI SEBAGAI PENGGANTI PASIR**

***COMPRESSIVE STRENGTH OF MORTAR CONTAINING
NICKEL SLAG GRANULATION AS REPLACEMENT OF
SAND***

**FEBRIKA RAHMANIA NURUL
D011 17 1007**



**PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
2021**

LEMBAR PENGESAHAN

LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR)

KUAT TEKAN MORTAR BERBAHAN TERAK NIKEL GRANULASI SEBAGAI PENGANTI PASIR

Disusun dan diajukan oleh:

FEBRIKA RAHMANIA NURUL

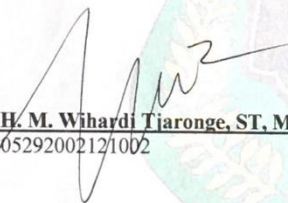
D011 17 1007


Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 27 April 2021 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,


Prof. Dr. H. M. Wihardi Tiaronge, ST, M.Eng
NIP. 196805292002121002


Dr. Eng. Muhammad Akbar Caronge, ST, M. Eng
NIP. 198604092019043001

Ketua Program Studi,




Prof. Dr. H. M. Wihardi Tiaronge, ST, M.Eng
NIP. 196805292002121002

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Febrika Rahmania Nurul
NIM : D011 17 1007
Program Studi : Teknik Sipil
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

Kuat Tekan Mortar Berbahan Terak Nikel Granulasi sebagai Pengganti Pasir

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

Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Skripsi/Tesis/Disertasi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 27 April 2021

Yang membuat pernyataan,



Febrika Rahmania Nurul
NIM: D011 17 1007

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 “**KUAT TEKAN MORTAR BERBAHAN TERAK NIKEL GRANULASI SEBAGAI PENGGANTI PASIR**” 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 Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, MT.**, 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 **Fatahullah** dan ibunda **Nurbaya** atas doa, kasih sayangnya, dan segala dukungan selama ini, baik spritiual maupun material, serta seluruh keluarga besar atas sumbangsih dan dorongan yang telah diberikan.

2. Adik tercinta **Muhammad Akram** yang selalu memberikan semangat dalam penyelesaiannya tugas akhir ini.
3. **Kak Agung ST., Hamdar, Masnia, Resni, Wana, Nidar, Yuka, Sesamata, Theo** dan **Dio** selaku rekan-rekan di **Laboratorium Riset Eco Material**, yang senantiasa memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
4. Saudara-saudari **PLASTIS** 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 mengharapakan 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, April 2021

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	iii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
ABSTRAK.....	xi
ABSTRACT	xii
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	4
C. Tujuan Penelitian	4
D. Manfaat Penelitian.....	4
E. Batasan Masalah	5
F. Sistematika Penulisan	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	7
A. Penelitian Terdahulu	7
B. Teori Mortar.....	11
B.1. Tipe Mortar	11
B.2. Sifat – sifat Mortar.....	16
C. Bahan – bahan Dasar Mortar	17
C.1. Semen Portland.....	17
C.2. Agregat Halus	31
C.3. Air	33
C.4. Bahan Tambah	33
D. Terak Nikel.....	35
D.1. Proses Terjadinya Terak Nikel	36

D.2. Slag Nikel Granulasi	38
E. Mortar Segar	39
E.1. Pengujian Meja Sebar	39
E.2. <i>Bleeding</i>	40
F. Kuat Tekan Mortar.....	41
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	42
A. Lokasi Penelitian	42
B. Bagan Alir Penelitian	43
C. Jenis Penelitian dan Sumber Data	45
D. Prosedur Penelitian	47
D.1. Pengujian Karakteristik Agregat	47
D.2. Rancangan Campuran (Mix Design)	47
D.3. Pembuatan Benda Uji	48
E. Perawatan (<i>Curing</i>) Benda Uji	50
F. Pengujian Kuat Tekan Mortar	50
G. Pengamatan Sebaran Agregat	51
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	52
A. Karakteristik Material	52
A.1. Bentuk Fisik Terak Nikel Granulasi	52
A.2. Sifat Fisik Terak Nikel Granulasi	52
A.3. Gradasi Slag Granulasi dan Pasir	54
B. Berat Jenis Mortar	58
C. Pengujian <i>Flow</i>	59
D. Kuat Tekan.....	66
E. Penyebaran Agregat	68
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	71
A. Kesimpulan	71
B. Saran	71
DAFTAR PUSTAKA.....	72

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Partikel slag baja bulat (Kim, Jin-Man, 2013)	8
Gambar 2. (a) Agregat FNS; (b) Pasir (Saha AK and Sarker PK, 2017).....	8
Gambar 3. Pengujian <i>flow</i> (a) 100% pasir; (b) 50% FNS; (c) 100% FNS	9
Gambar 4. Slag EAF bulat (Roy dkk, 2018)	10
Gambar 5. Proses pembuatan nikel dan terjadinya terak nikel (Sugiri, 2005)	37
Gambar 6. Slag Nikel Granulasi.....	38
Gambar 7. Meja Sebar (SNI 03-6825-2002)	40
Gambar 8. Diagram Alir Penelitian.....	45
Gambar 9. Slag Granulasi dan Pasir.....	52
Gambar 10. Analisa Saringan Variasi 100% Pasir.....	55
Gambar 11. Analisa Saringan Variasi 30% Terak Nikel Granulasi.....	55
Gambar 12. Analisa Saringan Variasi 50% Terak Nikel Granulasi.....	56
Gambar 13. Analisa Saringan Variasi 70% Terak Nikel Granulasi.....	56
Gambar 14. Analisa Saringan Variasi 100% Terak Nikel Granulasi.....	57
Gambar 15. Berat Jenis Mortar Segar.....	58
Gambar 16. Flow 100% Pasir	60
Gambar 17. Flow 30% Terak Nikel Granulasi.....	61
Gambar 18. Flow 50% Terak Nikel Granulasi.....	62

Gambar 19. Flow 70% Terak Nikel Granulasi.....	63
Gambar 20. Flow 100% Terak Nikel Granulasi.....	64
Gambar 21. Flow Mortar Terak Nikel Granulasi.....	65
Gambar 22. Hasil Analisa Kuat Tekan Benda Uji.....	67
Gambar 23. Penyebaran Agregat Variasi Benda Uji 100% Pasir.....	68
Gambar 24. Penyebaran Agregat Variasi Benda Uji 30% Terak Nikel Granulasi.....	69
Gambar 25. Penyebaran Agregat Variasi Benda Uji 50% Terak Nikel Granulasi.....	69
Gambar 26. Penyebaran Agregat Variasi Benda Uji 70% Terak Nikel Granulasi.....	69
Gambar 27. Penyebaran Agregat Variasi Benda Uji 100% Terak Nikel Granulasi.....	69

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Persyaratan Spesifikasi Proporsi Mortar	15
Tabel 2. Persyaratan Spesifikasi Sifat Mortar	16
Tabel 3. Syarat Kimia Utama	26
Tabel 4. Syarat kimia tambahan	28
Tabel 5. Syarat Fisika Utama	29
Tabel 6. Syarat Fisika Tambahan	30
Tabel 7. Gradasi Pasir (Tjokrodimuljo, 1992)	32
Tabel 8. Komposisi Kimia Terak Nikel	29
Tabel 9. Pemeriksaan Agregat Halus	35
Tabel 10. Rancangan Campuran Mortar	48
Tabel 11. Pemeriksaan Karakteristik Fisik Slag Granulasi	53
Tabel 12. Pemeriksaan Karakteristik Fisik Pasir.....	53
Tabel 13. Modulus Kehalusan Variasi Terak Nikel Granulasi	54
Tabel 14. Hasil Pengujian Kuat Tekan	66

ABSTRAK

Diperkirakan setiap tahunnya, produksi beton untuk proyek konstruksi di seluruh dunia membutuhkan sekitar 6,25 miliar ton agregat halus. Konsumsi yang terus meningkat dapat menyebabkan berkurangnya ketersediaan pasir. Terak nikel granulasi merupakan terak hasil limbah nikel yang diproses dengan menuangkan slag cair ke dalam area berpendingin udara dengan hembusan udara bertekanan tinggi untuk pendinginan. Akibatnya, slag nikel dengan cepat mendingin dan menghasilkan partikel halus berbentuk bulat. Dalam penelitian ini slag granulasi digunakan sebagai pengganti pasir dalam mortar.

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk menganalisis bagaimana karakteristik terak nikel granulasi sebagai pengganti pasir serta menganalisis bagaimana pengaruh substitusi pasir dengan terak nikel granulasi terhadap nilai kuat tekan mortar. Penelitian dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Gowa menggunakan benda uji kubus berukuran 50 mm x 50 mm x 50 mm dengan perawatan (*curing*) air. Sampel akan diuji pada umur curing 7 dan 28 hari untuk memperoleh nilai kuat tekan.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa agregat halus terak nikel granulasi mempunyai nilai modulus kehalusan sebesar 3,81 dan nilai berat jenis semu sebesar 3,06 kg/m³ melebihi spesifikasi pasir. Nilai penyerapan air sebesar 0,75%, berat jenis kering 2,96 kg/m³ dan berat jenis kering permukaan sebesar 2,99 kg/m³ masuk spesifikasi pasir. Penambahan substitusi pasir dengan terak nikel granulasi menyebabkan peningkatan nilai *flow*. Hal ini dipengaruhi oleh bentuk slag yang bulat (*spherical*) dan *water absorption* yg rendah dari slag granulasi. Dalam SNI 6882:2014 *flow* mortar adalah 110 ± 5 % dimana penambahan diameter *flow* pada substitusi terak nikel granulasi sebesar 30% memenuhi spesifikasi. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7 dan 28 hari dengan nilai optimum kuat tekan pada variasi substitusi terak nikel granulasi sebesar 30% dimana nilai kuat tekan pada umur 7 hari yaitu sebesar 22.86 MPa dan pada umur 28 hari sebesar 25.14 MPa.

ABSTRACT

6,25 billion tonnes of fine aggregate produced for concrete in the worldwide construction project every year. Consumption that continues to increase can lead to reduced availability of sand. Granulated nickel slag is a nickel waste product that is processed by pouring liquid slag into an air-cooled area with high pressure air blowing for cooling. As a result, the nickel slag rapidly cools and produces fine, spherical particles. In this study, slag granulation was used as a substitute for sand in mortar.

The purpose of this study is to analyze the characteristics of granulated nickel slag as a substitute for sand and to analyze the effect of sand substitution with granulated nickel slag on the compressive strength of mortar. The research was conducted at the Structural and Material Laboratory of the Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Hasanuddin University, Gowa using a cube specimen measuring 50 mm x 50 mm x 50 mm with curing water. Samples were tested at curing age of 7 and 28 days to obtain compressive strength.

These results indicate that nickel slag granulation of fine aggregate fineness modulus that was of 3.81 and apparent specific gravity was 3.06 kg / m³ exceeds the specifications of the sand. Water absorption of 0.75%, dry density of 2.96 kg / m³ and surface dry density of 2.99 kg / m³ on the sand specifications. The addition of sand substitution with granulated nickel slag caused an increase in the flow value. This is influenced by slag rounded shape(spherical) and water absorption lowmouth of the slag granulation. In SNI 6882: 2014 the flow of mortar is $110 \pm 5\%$ where the addition of diameter flow in the granulation nickel slag substitution by 30% meets the specifications. The compressive strength test was carried out at the age of 7 and 28 days with the optimum value of compressive strength at the variation of the granulation nickel slag substitution of 30% where the compressive strength value at the age of 7 days was 22.86 MPa and at the age of 28 days was 25.14 MPa.

BAB 1. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Mortar merupakan campuran antara pasir kwarsa, air suling dan semen portland dengan komposisi tertentu. Proses campuran *mix design* suatu mortar sangat menentukan daya tahan tekan pada mortar, dikarenakan mortar sering digunakan dalam pelaksanaan konstruksi seperti untuk pemasangan batu kali pada pekerjaan pondasi telapak, pemasangan material penyusun dinding seperti bata merah, batako, dan *hollow brick*, dan lain sebagainya.

Agregat halus sebagai salah satu bahan material beton selain agregat kasar, semen, dan air yang menempati sekitar 20% -30% volume beton. Diperkirakan setiap tahunnya, produksi beton untuk proyek konstruksi di seluruh dunia membutuhkan sekitar 6,25 miliar ton agregat halus. Angka ini mengimplikasikan bahwa sumber daya alam yang semakin menipis akan menyebabkan kerusakan lingkungan. Karena sumber daya alam semakin langka dalam waktu dekat, cara alternatif untuk melindungi lingkungan adalah dengan memanfaatkan bahan limbah dari industri dalam produksi beton / mortar (RS Edwin dkk, 2019)

Menurut Mustika, dkk., 2015, slag atau terak adalah limbah hasil industri dalam proses peleburan logam. Terak berupa residu atau limbah yang berwujud gumpalan menyerupai logam, memiliki kualitas rendah karena bercampur dengan bahan-bahan lain yang susah untuk dipisahkan..

Pabrik peleburan nikel menghasilkan sejumlah besar terak / slag cair sebagai produk sampingan karena bijih biasa mengandung nikel kadar sangat rendah. Slag nikel cair yang melewati proses pendinginan akan memadat. Sifat fisik butiran slag nikel menjadikannya kandidat potensial untuk digunakan sebagai agregat halus pada beton (Saha dan Sharker, 2018)

RS Edwin dkk, 2019 mengatakan di Indonesia, sekitar 4 juta ton terak nikel diproduksi setiap tahun dan hanya digunakan untuk penimbunan. Pemanfaatan terak yang berkelanjutan telah menjadi perhatian karena beberapa alasan. Pertama, terbatasnya daur ulang slag dengan memasukkannya kembali ke dalam suatu proses karena dapat memakan lebih banyak energi. Kedua, karena memiliki jumlah oksida logam ukuran yang besar di dalam slag, sulit untuk membuangnya dengan cara yang ramah lingkungan. Ketiga, membuang bahan-bahan tersebut ke dalam ladang membutuhkan biaya yang mahal dan mengurangi porositas dan permeabilitas tanah. Selain itu, dengan peningkatan pesat dalam produksi baja, sejumlah besar slag tetap tidak dapat dikelola mengakibatkan peningkatan dampak lingkungan yang merugikan.

Faktanya bahwa terak terdiri dari mineral stabil seperti CaO , SiO_2 mirip dengan fase dikalsium silikat dan memiliki ciri khas kepadatan tinggi. Oleh karena itu, terak memungkinkan digunakan untuk menggantikan agregat alami. Pada umumnya slag yang ditemui merupakan slag bersudut. Baru-baru ini, metode produksi baru telah dikembangkan dengan

perubahan dalam proses pendinginan di mana tidak diperlukan penghancuran untuk mendapatkan slag yang lebih halus. Dalam metode ini, slag cair dituangkan ke dalam area berpendingin udara dengan hembusan udara bertekanan tinggi untuk pendinginan. Akibatnya, slag dengan cepat mendingin dan membentuk bentuk partikel halus berbentuk bola. Jadi slag yang baru dikembangkan berbeda dari slag nikel berbentuk sudut konvensional (Roy dkk, 2018)

Penggunaan slag berbentuk bulat (*spherical*) dalam campuran memiliki beberapa keunggulan, diantaranya adalah:

- a. Jumlah air dan semen bisa dikurangi sehingga biaya konstruksi lebih hemat dan daya tahan yang lebih baik.
- b. Slag umumnya memiliki kepadatan yang tinggi sehingga dapat meningkatkan ketahanan abrasi.

Dalam penelitian ini, rancangan campuran mortar menggunakan variasi kandungan slag nikel granulasi sebesar 0%, 30%, 50%, 70% dan 100% dimana dilakukan pengujian kuat tekan pada umur sampel uji 7 dan 28 hari serta pengamatan sebaran agregat dalam mortar pada umur 28 hari.

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, maka dilakukan penelitian dengan judul **“KUAT TEKAN MORTAR BERBAHAN TERAK NIKEL GRANULASI SEBAGAI PENGGANTI PASIR”**.

B. Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana karakteristik terak nikel granulasi sebagai pengganti pasir?
2. Bagaimana pengaruh substitusi pasir dengan terak nikel granulasi terhadap nilai kuat tekan mortar?

C. Tujuan Penelitian

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

1. Untuk menganalisis karakteristik terak nikel granulasi sebagai pengganti pasir
2. Untuk menganalisis bagaimana pengaruh substitusi pasir dengan terak nikel granulasi terhadap nilai kuat tekan mortar.

D. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah mendapatkan karakteristik mortar terhadap variasi substitusi terak nikel granulasi sebagai pengganti pasir dan pengaruh substitusi pasir dengan terak nikel granulasi terhadap kuat tekan mortar

E. Batasan Masalah

Untuk mencapai maksud dan tujuan dari penulisan ini serta menguraikan pokok bahasan diatas ditetapkan batasan-batasan dalam penelitian ini adalah :

1. Semen yang digunakan dalam penelitian adalah semen tipe PCC.
2. Menggunakan terak nikel granulasi pendinginan langsung dengan udara yang berasal dari PT. Vale Indonesia.
3. Penelitian menggunakan variasi substitusi pasir terak nikel granulasi sebagai pengganti pasir sebesar 0%, 30%, 50%, 70%, dan 100%.
4. Penelitian menggunakan cetakan benda uji berbentuk kubus 50 mm x 50 mm x 50 mm.
5. Perawatan dengan *curing* rendam air tawar.
6. Pengujian dilakukan di Laboratorium yang sesuai dengan standar resmi dan akan didapatkan hasil pengujian-pengujian yang diharapkan.

F. Sistematika Penulisan

Agar lebih terarah penulisan tugas akhir , sistematika penulisan yang akan dilakukan sesuai tahapan-tahapan yang dipersyaratkan dapat diurutkan yaitu :

BAB 1 PENDAHULUAN

Dalam bab ini, Pokok-Pokok bahasan dalam BAB ini adalah latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi teori-teori penting yang memiliki keterkaitan dengan topik permasalahan dan dijadikan sebagai landasan atau acuan penelitian.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini, dijelaskan metode yang digunakan dalam penelitian ini, langkah-langkah yang digunakan dalam penelitian ini yang dituangkan dalam bentuk bagan alir penelitian, lokasi dan waktu penelitian, data penelitian berupa jenis dan sumber data serta analisis yang digunakan dalam mengolah data yang didapatkan dari lapangan maupun dari laboratorium.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini, disusun hasil-hasil pengujian diantaranya adalah bentuk fisik agregat, hasil pemeriksaan karakteristik agregat, sifat fisik agregat, modulus kehalusan benda uji, berat jenis mortar segar, *flow* mortar, hasil analisa kuat tekan benda uji kubus berukuran 50 mm x 50 mm x 50 mm dan penyebaran agregat di dalam mortar.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

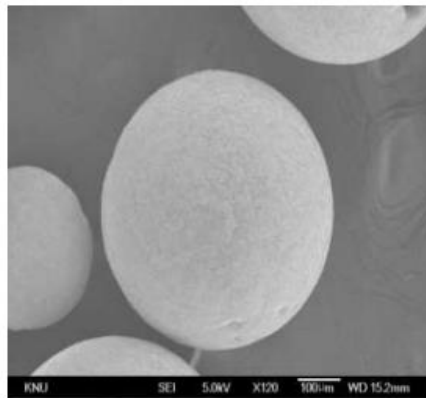
Merupakan bab yang menyimpulkan hasil dari analisis penelitian dan memberikan saran-saran dan rekomendasi penelitian.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian Terdahulu

Kim, Jin-Man (2013) melakukan penelitian mengenai beton polimer yang menggunakan agregat halus slag baja berbentuk bulat seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**. Penelitian ini menyebutkan bahwa terak baja bulat memiliki kepadatan $3,56 \text{ g / cm}^3$ atau rata-rata 35% lebih tinggi daripada agregat yang digunakan dalam penelitian, sehingga menggambarkan nilai massa satuan volume yang sangat tinggi. Penelitian ini dilakukan dengan mensubstitusi slag baja berbentuk bulat ke dalam beton polimer yang dibagi menjadi 2 seri. Hasil dari penelitian ini didapati bahwa pada pengujian *slump*, beton polimer yang menggunakan slag baja berbentuk bulat mempunyai nilai *slump* lebih tinggi dibandingkan dengan beton polimer yang tidak menggunakan slag baja berbentuk bulat. Nilai massa jenis juga meningkat dimana pada penelitian ini menunjukkan benda uji dengan agregat halus silika mempunyai nilai berat jenis sebesar $2,25 \text{ g/cm}^3$, sedangkan pada benda uji yang menggunakan slag baja bulat nilai berat jenis adalah $2,45 \text{ g/cm}^3$. Penggunaan slag baja bulat juga menunjukkan tidak terjadi segregasi agregat pada spesimen dengan menggunakan agregat halus slag baja berbentuk bulat. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 3, 7 dan 28 hari menunjukkan penggunaan slag baja berbentuk bulat dapat meningkatkan kuat tekan beton polimer. Selain itu, seperti yang dikonfirmasi melalui uji Vebe, penggunaan slag baja bulat meningkatkan kemampuan *workability* beton polimer. Jadi, dimungkinkan

untuk mengurangi jumlah resin yang digunakan dengan mengamankan tingkat fluiditas yang sama dengan menggunakan slag baja bulat, dimana melalui percobaan hal tersebut dapat memungkinkan bertambahnya nilai kuat tekan.



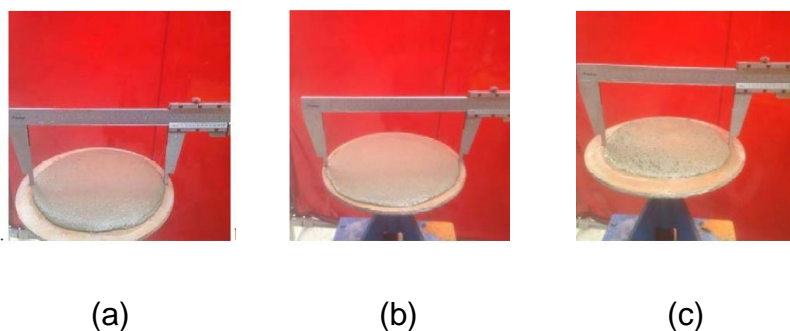
Gambar 1. Partikel slag baja bulat (Kim, Jin-Man, 2013)

Saha AK and Sarker PK (2016) melakukan penelitian dengan menggunakan feronikel slag (FNS) sebagai agregat halus untuk menggantikan 50% dan 100% pasir alam (**Gambar 2**) pada beton. Pemeriksaan gradasi agregat halus dilakukan dimana hasil menunjukkan agregat FNS terdiri atas partikel yang lebih besar jika dibandingkan dengan pasir.



Gambar 2. (a) Agregat FNS; (b) Pasir (Saha AK and Sarker PK, 2017)

Pengujian *flow* dilakukan untuk pasir, FNS dan kombinasinya menggunakan kerucut *flow* pasir untuk menentukan *workability* dari mortar segar. **Gambar 3** memperlihatkan nilai pengukuran *flow* dari variasi campuran. Hasilnya pada pergantian 50% pasir diperoleh nilai *flow* terbesar. Hal tersebut karena partikel FNS lebih kasar dari pasir, sehingga lebih sedikit air yang dibutuhkan untuk membasahi FNS. *Flow* menurun pada kandungan FNS lebih dari 50% karena meningkatnya bentuk partikel angular di dalam campuran. *Workability* mortar sebagian besar tergantung pada gradasi agregat halus dalam campuran. Uji kuat tekan dilakukan pada umur 3, 7, 28, dan 56 hari dengan kuat tekan optimum pada variasi 50% dan mengalami penurunan pada penambahan FNS lebih dari 50%.



Gambar 3. Pengujian *flow* (a) 100% pasir; (b) 50% FNS; (c) 100% FNS

(Saha AK and Sarker PK, 2016)

Roy, Sushanta dkk (2018) melakukan penelitian mengenai investigasi penerapan agregat halus slag EAF (*Electric Arc Furnace oxidizing*) berbentuk bola dalam beton. Penelitian tersebut menggunakan agregat slag EAF metode terbaru dimana untuk mendapatkan slag EAF

yang lebih halus slag cair dituangkan ke dalam area berpendingin udara dengan hembusan udara bertekanan tinggi untuk pendinginan. Akibatnya, terak EAF dengan cepat mendingin dan membentuk bentuk partikel halus berbentuk bulat seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Slag EAF bulat (Roy dkk, 2018)

Penelitian tersebut menunjukkan bahwa kepadatan terak EAF berbentuk bulat adalah 3,60 g / cc dimana lebih tinggi dibandingkan dengan pasir alam (2,55 g / cc), kerikil (2,60 g / cc) dan bahkan semen (3,15 g / cc). Slag EAF (*Electric Arc Furnace*) bulat memiliki efek positif pada sifat mekanik beton dimana penggunaan agregat terak EAF berbentuk bulat menguntungkan dan cocok untuk perkerasan beton karena mengurangi kebutuhan air campuran dan semen secara signifikan tanpa mengganggu sifat mekanik. Selain itu, beton terak EAF berbentuk bola mewujudkan peningkatan daya tahan seperti penyusutan yang lebih rendah, penyerapan air dan permeabilitas udara.

B. Teori Mortar

Menurut SNI 03-6825-2002 mortar didefinisikan sebagai campuran antara pasir kwarsa, air suling dan semen portland dengan komposisi tertentu. Tjokrodimuljo (1996), mengatakan bahwa mortar yang baik harus mempunyai sifat seperti tahan lama (awet), murah, mudah dikerjakan (diaduk, diangkut, dipasang dan diratakan) melekat baik dengan pasangan batu, cepat kering atau keras, tahan terhadap rembesan air, tidak timbul retak-retak setelah dipasang. Menurut ASTM C270 tujuan utama dari mortar dalam pasangan adalah untuk mengikat unit-unit pasangan menjadi satu kesatuan agar bekerja sebagai elemen integral yang memiliki karakteristik kinerja fungsional yang diinginkan.

B.1. Tipe Mortar

Mortar ditinjau dari bahan pembentuknya dapat dibedakan menjadi empat tipe, yaitu: mortar lumpur (*mud mortar*), mortar kapur, mortar semen dan mortar khusus. Selanjutnya tipe-tipe mortar tersebut diuraikan sebagai berikut (Tjokrodimuljo,1996 dalam Veliyati, 2010):

- a. Mortar lumpur adalah mortar dibuat dari campuran pasir, tanah liat/lumpur dan air. Pasir, tanah liat dan air tersebut dicampur sampai rata dan mempunyai konsistensi yang cukup baik. Jumlah pasir harus diberikan secara tepat untuk memperoleh adukan yang baik. Terlalu sedikit pasir menghasilkan mortar yang retak – retak setelah mengeras

sebagai akibat besarnya susutan pengeringan dan juga dapat menyebabkan adukan kurang dapat melekat. Mortar ini biasa dipakai sebagai bahan tembok atau bahan tungku api.

- b. Mortar kapur, dibuat dari campuran pasir, kapur dan air. Kapur dan pasir mula – mula dicampur dalam keadaan kering, kemudian ditambahkan air. Air ditambahkan secukupnya agar diperoleh adukan yang cukup baik (mempunyai konsistensi baik). Selama proses pengerasan kapur mengalami susutan, sehingga jumlah pasir dipakai dua kali atau tiga kali volume kapur. Mortar ini biasanya digunakan untuk pembuatan tembok bata.
- c. Mortar semen, dibuat dari campuran pasir, semen portland, dan air dalam perbandingan campuran yang tepat. Perbandingan antara volume semen dan volume pasir antar 1:3 hingga 1:6 atau lebih besar. Mortar ini kekuatannya lebih besar daripada mortar lumpur dan mortar kapur, karena mortar ini biasanya dipakai untuk tembok, pilar kolom atau bagian lain yang menahan beban. Karena mortar ini kedap air, maka dapat dipakai pula untuk bagian luar dan bagian yang berada di bawah tanah. Semen dan pasir mula – mula dicampur secara kering sampai merata di atas tempat yang rata dan kedap air. Kemudian sebagian air yang diperlukan ditambahkan dan diaduk kembali, begitu seterusnya sampai air yang diperlukan tercampur sempurna.
- d. Mortar khusus, yang mana dibuat dengan menambahkan *asbestos*, *fibers*, *jute fibers* (serat rami), butir – buti kayu, serbuk gergaji kayu dan

sebagainya. Mortar ini digunakan untuk bahan isolasi panas atau peredam suara. Mortar tahan api, diperoleh dengan menambahkan bubuk bata api dengan aluminuos semen, dengan membandingkan volume satu aluminuos semen dan bubuk bata api. Mortar ini biasa dipakai untuk tungku api dan sebagainya.

Berdasarkan ASTM C270, *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

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.

Spesifikasi masing - masing tipe sesuai ASTM C270 diperlihatkan dalam **Tabel 1** dan **Tabel 2** berikut ini :

Tabel 1. Persyaratan spesifikasi proporsi mortar

Mortar	Tipe	Campuran dalam volume (bahan bersifat semen)							Rasio agregat (Pengukuran pada kondisi lembab atau gembur)	
		Semen Portland/ semen campur	Semen Mortar			Semen Pasangan				Kapur Padam atau kapur Pasta
			M	S	N	M	S	N		
Semen Kapur	M	1	...	...	...	...	...	...	¼	
	S	1	...	...	...	...	...	...	> ¼ sampai ½	
	N	1	...	...	...	...	...	...	> ½ sampai 1¼	
	O	1	...	...	...	...	...	...	> 1 ¼ sampai 2 ½	Tidak kurang dari 2¼ dan tidak lebih dari 3 kali jumlah darivolume terpisah material sementisius
Semen Mortar	M	1	...	...	1	...	...	...
	M	...	1	...	...	...	...	...
	S	½	...	...	1	...	...	...
	S	...	...	1	...	...	...	...
	N	...	...	...	1	...	...	...
	O	...	...	...	1	...	...	...
Semen Pasangan	M	1	...	...	...	...	...	1		
	M	...	...	...	...	1	...	...
	S	½	...	...	...	...	...	1		
	S	...	...	...	...	...	1	...		
	N	...	...	...	...	...	...	1		
	O	...	...	...	...	...	...	1		

Tabel 2. Persyaratan spesifikasi sifat mortar

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 ^C	
	O	2,4 (350)	75	14 ^C	
Semen Mortar	M	17,2 (2 500)	75	12	
	S	12,4 (1 800)	75	12	
	N	5,2 (750)	75	14 ^C	
	O	2,4 (350)	75	14 ^C	
Semen Pasangan	M	17,2 (2 500)	75	18	
	S	12,4 (1 800)	75	18	
	N	5,2 (750)	75	20 ^D	
	O	2,4 (350)	75	20 ^D	

B.2. Sifat - sifat Mortar

Mortar dapat digunakan pada pekerjaan-pekerjaan tertentu karena memiliki beberapa sifat yang menguntungkan. Antara lain menurut Tjokrodimuljo (1999:126) mortar yang baik harus mempunyai sifat sebagai berikut:

- a. Murah
- b. Tahan lama (awet)
- c. Mudah dikerjakan (diaduk, diangkut, dipasang, diratakan)
- d. Melekat dengan baik dengan bata, batu dan sebagainya.
- e. Cepat kering/keras

- f. Tahan terhadap rembesan air.
- g. Tidak timbul retak – retak setelah dipasang.

Dikarenakan sifat-sifat tersebut maka mortar memiliki cakupan yang luas untuk diaplikasikan pada berbagai macam pekerjaan seperti sebagai bahan pengikat antara bata satu dengan bata yang lain juga untuk menyalurkan beban.

Adukan mortar berdasarkan tujuannya dibagi menjadi dua bagian, yaitu:

- a. Adukan untuk pasangan, yang biasa digunakan untuk merekat bata atau sejenisnya membentuk konstruksi tembok.
- b. Adukan plesteran, yang dipakai untuk menutup permukaan tembok atau untuk meratakan tembok.

C. Bahan-bahan Penyusun Mortar

Adapun bahan-bahan yang digunakan untuk membuat mortar adalah sebagai berikut:

C.1 Semen Portland (*Portland Cement*)

Semen merupakan bahan pengikat hidrolis, yaitu bahan anorganik yang ditumbuk halus dan ketika bercampur dengan air, dengan menggunakan reaksi dan proses hidrasi membentuk pasta yang mengikat dan mengeras, setelah mengeras, tetap mempertahankan kekuatan dan stabilitasnya meskipun di dalam air (Standar BS EN 197-1).

Semen Portland adalah bahan konstruksi yang paling banyak digunakan dalam pekerjaan beton. Menurut SNI 15-2049-2004, semen portland didefinisikan sebagai semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland terutama yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain.

Semen Portland dibuat dari serbuk halus mineral kristalin yang komposisi utamanya adalah kalsium dan aluminium silikat. Penambahan air pada mineral ini menghasilkan suatu pasta yang jika mengering akan mempunyai kekuatan seperti batu. Berat jenisnya berkisar antara 3,12 dan 3,16, dan berat volume satu sak semen adalah 94 lb/ft³. Bahan baku pembentuk semen adalah:

1. Kapur (CaO) – dari batu kapur,
2. Silika (SiO₂) – dari lempung,
3. Alumina (Al₂O₃) – dari lempung (dengan sedikit presentasi magnesia, MgO, dan terkadang sedikit alkali). Oksida besi terkadang ditambahkan untuk mengontrol komposisinya (Edward G. Nawy, 1995).

C.1.1. Standar Semen di Eropa

- **Semen Portland Berdasarkan BS EN 197-1:2011**

Selain semen Portland yang sepenuhnya diproduksi dengan menggunakan klinker semen Portland,

maka dewasa ini telah banyak diproduksi semen campuran (komposit) yang menggabungkan klinker semen Portland dan mineral anorganik sebagai unsur-unsur pembentuk utama. Beberapa produksi semen Portland di Eropa termasuk Inggris menggunakan standar BS En 197-1:2011. Semen yang diproduksi dengan standar Eropa diizinkan untuk menggunakan material tambahan baik yang merupakan hasil olahan sampingan maupun bahan alami seperti super terak tanur tinggi dan material pozolan lainnya sehingga dapat menurunkan penggunaan klinker semen yang secara langsung memberikan kontribusi terhadap pengurangan karbon emisi yang dihasilkan dari produksi klinker dan mengurangi penggunaan sumber daya alam (M. Wihardi Tjaronge,2012).

Sesuai dengan standar ini semen disebut semen CEM (*CEM cement*), secara pasti ketika dicampur secara tepat dengan agregat dengan air, mampu menghasilkan beton atau mortar yang mempertahankan kemampuan kerja dalam waktu yang cukup dan setelah periode tertentu mencapai tingkat kekuatan spesifik dan juga memiliki stabilitas volume jangka panjang.

Pengerasan hidrolis pada semen CEM adalah terutama disebabkan oleh hidrasi silikat kalsium tetapi

senyawa kimia lainnya juga berpartisipasi dalam proses pengerasan, misalnya aluminat. Jumlah proporsi kalsium oksida reaktif (CaO) dan silicon dioksida reaktif (SiO₂) dalam semen CEM harus paling sedikit 50% dari massa ketika proporsi yang ditentukan sesuai dengan EN 196-2. Semen CEM terdiri dari material-material yang berbeda dan secara statistic homogen dalam komposisi yang dihasilkan dari produksi dan proses penanganan material yang terjamin kualitasnya (M. Wihardi Tjaronge,2012)

- **Unsur Utama (berdasarkan BS EN 197-1:2011)**

- 1) Klinker Semen Portland**

Klinker semen Portland dibuat dengan pembakaran bahan baku (bahan mentah, pasta, adonan) suatu campuran dengan spesifikasi yang mengandung unsur, biasanya dinyatakan sebagai oksida, CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ dan sejumlah kecil dari bahan lainnya. Klinker Portland adalah bahan hidrolis yang terdiri dari paling sedikit dua pertiga silika kalsium ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ dan $2 \text{CaO} \text{SiO}_2$) oleh massa, sisanya terdiri dari aluminium dan besi yang mengandung fase klinker dan senyawa lainnya. Rasio massa (CaO)/(SiO₂) harus tidak kurang dari 2,0. Isi dari magnesium oksida (MgO) tidak melebihi 5,0% dari jumlah massa. Klinker semen Portland yang tergabung dalam

semen Portland (CEM I) tahan sulfat dan semen pozzolanik tahan sulfat (CEM IV) wajib memenuhi persyaratan tambahan untuk kandungan trikalsium aluminat (C_3A). Kandungan trikalsium aluminat pada klinker dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$C_3A = 2,65 A - 1,69 F$$

dimana, A adalah persentase dari aluminium oksida (Al_2O_3) dengan massa klinker yang ditentukan sesuai dengan EN 196-2. F adalah persentase besi (III) oksida (Fe_2O_3). Semen Portland tahan sulfat dan semen pozzolanik tahan sulfat dibuat dengan klinker semen Portland dimana kandungan C_3A tidak melebihi :

- a. Untuk CEM I: 0%, 3% dan 5%
- b. Untuk CEM IV / A dan CEM IV / B: 9%.

2) Terak Tanur Tinggi (*Blast furnace slag, S*)

Granulated blast furnace (slag/terak tanur tinggi) terbuat dari pendinginan cepat dari lelehan terak dengan komposisi yang sesuai, yang diperoleh dari peleburan biji besi (ore) dalam tanur tinggi, dan minimal mengandung dua pertiga bagiannya oleh glassy slag dan memiliki sifat hidrolis yang sesuai ketika diaktifkan.

Terak tanur tinggi, minimal dua per tiga bagiannya terdiri dari kalsium oksida (CaO), magnesium oksida (MgO) dan silikon dioksida (SiO₂). Sisanya aluminium oksida (Al₂O₃) bersama dengan sejumlah kecil senyawa lain. Rasio massa (CaO + MgO) / (SiO₂) melebihi 1,0 (M. Wihardi Tjaronge,2012).

3) Material Pozzolan

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 dengan suhu kamar normal dengan kalsium hidroksida terlarut (Ca (OH)₂) untuk membentuk kekuatan dengan mengembangkan senyawa kalsium silikat dan kalsium aluminat.

Pozzolan terumatam terdiri dari silikon dioksida reaktif (SiO₂) dan aluminat oksida (Al₂O₃). Sisanya adalah besi oksida (Fe₂O₃) dan oksida lainnya. Proporsi kalsium oksida yang reaksi untuk pengerasan dapat diabaikan. Jumlah silikon dioksida yang reaktif harus tidak kurang dari 25,0% dari massa (M. Wihardi Tjaronge,2012).

- **Abu Terbang (*Fly Ash*)**

Fly Ash atau abu terbang merupakan residu pembakaran batu bara yang diperoleh dengan mengendapkan secara elektrostatis atau mekanis debu partikel hasil pembakaran batu bara dengan 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*, Lol atau hilang pijar) dengan waktu pembakaran 1 jam harus dalam dari batasan sebagai berikut :

- 0% sampai 5,0% massa
- 2,0% sampai 7,0% massa
- 4,0% sampai 9,0% massa

4) Lempung Bakar (*Burn Shale, T*)

Lempung bakar, lebih khusus, lempung minyak bakar (*burn oil shale*), diproduksi dalam tungku khusus pada suhu sekitar 800°C. karena komposisi bahan alami dan proses produksi maka lempung bakar mengandung fase klinker, terutama dikalsium aluminat silikat dan monokalsium

aluminat, selain itu mengandung dalam jumlah besar oksida yang sangat reaktif sebagai pozzolan yaitu silikon dioksida dan sejumlah kecil kalsium oksida bebas dan kalsium sulfat (M. Wihardi Tjaronge, 2012).

5) Kapur (L, LL)

Batu kapur (*lime stone*, LL dan L) harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

- a) Kandungan kalsium karbonat (CaCO_3) yang dihitung dari jumlah oksida kalsium harus paling sedikit 75% dari massa.
- b) Isi tanah liat, yang ditentukan oleh uji methylene, tidak akan melebihi 1,20 g/100 g. Untuk tes ini batu kapur harus digiling hingga memiliki tingkat kehalusan sekitar $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$.
- c) Total karbon organik (TOC), harus sesuai dengan salah satu kriteria berikut:
 - 1) LL: tidak melebihi 0,20% massa;
 - 2) L: tidak melebihi 0,50% massa.

6) Silica Fume (D)

Silica fume berasal dari pengurangan kuarsa kemurnian tinggi dengan batu bara dalam tungku busur listrik pada

saat memproduksi silikon dan campuran ferosilikon. *Silica fume* terdiri dari partikel-partikel berbentuk bola yang sangat halus dan mengandung silika oksida amorf setidaknya 85% dari massa. Isi dari unsur silikon (Si) ditentukan, tidak boleh lebih besar dari 0,4% dari massa

C.1.2. Standar Semen di Indonesia

- **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 linker semen (M. Wihardi Tjaronge,2012).

Syarat mutu semen Portland (menurut SNI 15-2049-2004) yakni

Persyaratan kimia semen Portland harus memenuhi persyaratan sebagai berikut **Tabel 3**

Tabel 3. Syarat kimia utama semen portland

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
5	SO ₃ , maksimum	3,0	3,0	3,5	2,3	2,3
	Jika C ₃ A ≤ 8,0 Jika C ₃ A > 8,0	3,5	d)	4,5	d)	d)
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)}
11	C ₄ AF + 2 C ₃ A atau ^{a)} C ₄ AF + C ₂ F , maksimum	-	-	-	-	25 ^{c)}

CATATAN

- a) Persyaratan pembatasan secara kimia berdasarkan perhitungan untuk senyawa potensial tertentu tidak harus diartikan bahwa oksida dari senyawa potensial tersebut dalam keadaan murni.

C = CaO, S = SiO₂, A = Al₂O₃, F = Fe₂O₃, contoh C₃A = 3CaO.Al₂O₃
Titanium dioksida (TiO₂) dan Fosfor pentaoksida (P₂O₅) termasuk dalam Al₂O₃.

Nilai yang biasa digunakan untuk Al₂O₃ dalam menghitung senyawa potensial (misal: C₃A) untuk tujuan spesifikasi adalah jumlah

endapan yang diperoleh dengan penambahan NH_4OH dikurangi jumlah Fe_2O_3 ($\text{R}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$) yang diperoleh dalam analisis kimia basah.

Apabila: $\frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3} \geq 0,64$, maka persentase C_3S , C_2S , C_3A dan C_4AF

dihitung sebagai berikut:

$$\text{C}_3\text{S} = 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = (4,071 \times \% \text{CaO}) - (7,600 \times \% \text{SiO}_2) - (6,718 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) - (1,430 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3) - (2,852 \times \% \text{SO}_3)$$

$$\text{C}_2\text{S} = 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = (2,867 \times \% \text{SiO}_2) - (0,7544 \times \% \text{C}_3\text{S})$$

$$\text{C}_3\text{A} = 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = (2,650 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) - (1,692 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$\text{C}_4\text{AF} = 4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = (3,043 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

Apabila: $\frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3} < 0,64$, terbentuk larutan padat ($\text{C}_4\text{AF} + \text{C}_2\text{F}$) =

$$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$$

maka ($\text{C}_4\text{AF} + \text{C}_2\text{F}$) dan C_3S dihitung sebagai berikut:

Semen dengan komposisi ini didalamnya tidak terdapat C_3A . C_2S tetap dihitung dengan menggunakan rumus di atas: Perhitungan untuk semua senyawa potensial adalah berdasarkan hasil penentuan oksidanya yang dihitung sampai sedekat mungkin 0,1%. Semua hasil perhitungan dilaporkan sampai sedekat mungkin dengan 1,0%.

- b) Apabila yang disyaratkan adalah kalor hidrasi seperti yang tercantum pada tabel syarat fisika tambahan (Tabel 2.5), maka syarat kimia ini tidak berlaku.

- c) Apabila yang disyaratkan adalah pemuaihan karena sulfat yang tercantum pada tabel syarat fisika tambahan (**Tabel 4**), maka syarat kimia ini tidak berlaku.
- d) Tidak dapat dipergunakan

Tabel 4. Syarat kimia tambahan ^{a)}

No	Uraian	Jenis semen portland (%)				
		I	II	III	IV	V
1	C ₃ A , maksimum	-	-	8	-	-
2	C ₃ A , minimum	-	-	5	-	-
3	(C ₃ S + 2 C ₃ A) , maksimum	-	58 ^{b)}	-	-	-
4	Alkali, sebagai (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O), maksimum	0,60 ^{c)}	0,60 ^{c)}	0,60 ^{c)}	0,60 ^{c)}	0,60 ^{c)}

CATATAN

- a) Syarat kimia tambahan ini berlaku hanya secara khusus disyaratkan.
- b) Sama dengan keterangan untuk ^{b)} pada syarat kimia utama.
- c) Hanya berlaku bila semen digunakan dalam beton yang agregatnya bersifat reaktif terhadap alkali.

Persyaratan fisika semen Portland harus memenuhi persyaratan pada **Tabel 5** berikut

Tabel 5. Syarat Fisika Utama

No	Uraian	Jenis semen portland				
		I	II	III	IV	V
1	Kehalusan: Uji permeabilitas udara, m ² /kg Dengan alat : Turbidimeter, min Blaine, min	160 280	160 280	160 280	160 280	160 280
2	Kekekalan : Pemuaian dengan autoclave, maks %	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
3	Kuat tekan: Umur 1 hari, kg/cm ² , minimum Umur 3 hari, kg/cm ² , minimum Umur 7 hari, kg/cm ² , minimum Umur 28 hari, kg/cm ² , minimum	- 125 200 280	- 100 70 a) 175 120 a) -	120 240 - -	- - 7 0 170	- 80 150 210
4	Waktu pengikatan (metode alternatif) dengan alat: Gillmore Awal, menit, minimal Akhir, menit maksimum Vicat - Awal, menit, minimal - Akhir, menit, maksimum	60 600 45 375	60 600 45 375	60 600 45 375	60 600 45 375	60 600 45 375

CATATAN

- a) Syarat kuat tekan ini berlaku jika syarat kalor hidrasi seperti tercantum pada tabel syarat fisika tambahan atau jika syarat C₃S + C₃A seperti tercantum pada syarat kimia tambahan disyaratkan pada **Tabel 6** berikut.

Tabel 6. Syarat Fisika Tambahan^{a)}

No	Uraian	Jenis semen portland				
		I	II	III	IV	V
1	Pengikatan semu penetrasi akhir, % minimum	50	50	50	50	50
2	Kalor hidrasi Umur 7 hari, kal/gram, maks Umur 28 hari, kal/gram, maks	-	70 b) -	-	60 70	- -
3	Kuat tekan: Umur 28 hari, kg/cm ² , minimum	-	280	-	-	-
4	Pemuaian karena sulfat 14 hari, %, maksimum	-	220 b)	-	-	0,04 0
5	Kandungan udara mortar, % volume, maksimum	12	12	12	12	12

CATATAN

- a) Persyaratan fisika tambahan ini berlaku hanya jika secara khusus diminta.
- b) Bila syarat kalor hidrasi ini disyaratkan, maka syarat C₃S + C₃A seperti tercantum pada tabel kimia tambahan tidak diperlukan.
- c) Syarat kuat tekan ini berlaku bila syarat kalor hidrasi seperti yang tercantum pada tabel syarat fisika tambahan atau bila syarat C₃S + C₃A seperti yang tercantum pada tabel syarat kimia tambahan disyaratkan.

Adapun jenis dan penggunaan semen portland (menurut SNI 15-2049-2004) yakni:

- Jenis I yaitu semen yang penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang diisyarakan pada jenis-jenis lain
- Jenis II yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau hidrasi sedang.
- Jenis III yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi.
- Jenis IV yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah
- Jenis V yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat (SNI 15-2049-2004).

C.2. Agregat Halus

Berdasarkan SK SNI T-15-1991-03, agregat didefinisikan sebagai material granular misalnya pasir, kerikil, batu pecah, dan kerak tungku besi yang dipakai bersama-sama dengan suatu media pengikat untuk membentuk mortar atau beton semen hidrolis atau adukan. Agregat halus yang baik harus bebas bahan organik, lempung, partikel yang lebih kecil dari saringan no.100. Variasi ukuran dalam satu campuran harus mempunyai gradasi yang baik, sesuai dengan standar analisis saringan dari ASTM (*American Society of Testing and Materials*).

Pasir dapat digolongkan menjadi 3 macam (Tjokrodimulyo 1992):

- a. Pasir galian, dapat diperoleh langsung dari permukaan tanah atau dengan cara menggali terlebih dahulu. Pasir ini biasanya tajam, bersudut berpori, dan bebas dari kandungan garam.
- b. Pasir sungai diperoleh langsung dari dasar sungai, yang pada umumnya berbutir halus bulat-bulat akibat proses gesekan, sehingga daya lekat antar butir-butir berkurang. Pasir ini paling baik dipakai untuk memplester tembok.
- c. Pasir laut diambil dari pantai, butir-butirnya halus dan bulat akibat gesekan. Banyak mengandung garam yang dapat menyerap kandungan air dari udara. Pasir laut tidak baik digunakan sebagai bahan bangunan.

Gradasi pasir dapat dikelompokkan menjadi 4 yaitu pasir halus, agak halus, agak kasar dan kasar seperti terlihat pada **Tabel 7**.

Tabel 7. Gradasi pasir (Tjokrodimulyo, 1992)

Lubang (mm)	Persen berat butir yang lewat ayakan			
	kasar	agak kasar	agak halus	halus
10	100	100	100	100
4,8	90-100	90-100	90-100	95-100
2,4	60-95	75-100	85-100	95-100
1,2	30-70	55-90	75-100	90-100
0,6	15-34	35-59	60-79	80-100
0,3	5-20	8-30	12-40	15-50
0,15	0-10	0-10	0-10	0-15

C.3. Air

Air merupakan bahan dasar penyusun mortar yang paling penting dan paling murah. Air berfungsi sebagai bahan pengikat (bahan penghidrasi semen) dan bahan pelumas antara butir - butir agregat supaya mempermudah proses pencampuran agregat dengan binder serta mempermudah pelaksanaan pengecoran beton (*workability*) (Veliyati 2010). Secara umum air yang dapat digunakan dalam campuran adukan mortar adalah air yang apabila dipakai akan menghasilkan mortar dengan kekuatan lebih dari 90% dari mortar yang memakai air suling (ACI 318-83). Menurut SNI 03-2847-2002, air yang dapat digunakan sebagai pencampur mortar tidak dapat diminum dan tidak boleh digunakan pada adukan mortar kecuali pemilihan proporsi campuran mortar harus didasarkan pada campuran mortar yang menggunakan air dari sumber yang sama, mempunyai pH antara 4,5 – 7 dan tidak mengandung lumpur.

Menurut (SNI 03-6882-2002) air untuk mencampur mortar disyaratkan menggunakan air bersih dan layak minum, bebas dari minyak, asam, alkali, zat organik, atau material beracun lainnya, zat/ bahan lain yang merusak mortar maupun logam-logam yang terdapat di dinding.

D.4. Bahan Tambah

Bahan tambah menurut Tjokrodimuljo (1992) adalah bahan selain unsur pokok beton (air, semen, dan agregat) yang ditambahkan pada adukan beton, sebelum, segera, atau selama pengadukan beton. Tujuan

dari pemberian bahan tambah ini adalah untuk mengubah satu atau lebih sifat-sifat beton sewaktu masih dalam keadaan segar atau setelah mengeras. Bahan tambah diberikan dalam jumlah yang relatif sedikit serta dalam pengawasan yang ketat agar tidak berlebihan yang justru akan memperburuk sifat beton. Perubahan sifat-sifat beton yang terjadi berupa kecepatan hidrasi (waktu ikatan), kemudahan pengerjaan, dan kedekatan terhadap air.

Menurut SNI 03-6882-2002 bahan-bahan tambahan seperti bahan pewarna, bahan pembentuk, gelembung udara, pemercepat atau pemerlambat reaksi, penolak air, dan bahan tambahan lainnya tidak boleh ditambahkan ke dalam mortar kecuali ditentukan persyaratannya. Bila dalam dokumen kontrak senyawa kalsium klorida dicantumkan secara jelas, maka dapat digunakan sebagai bahan pemercepat pengerasan dengan jumlah maksimum 2 % dihitung terhadap berat kadar semem portland atau 1% terhadap berat semen pasangan atau persentase dari keduanya dalam mortar yang bersangkutan. Jika diperbolehkan menggunakan kalsium klorida, maka penggunaannya harus dilakukan secara berhati-hati, karena senyawa tersebut dapat merusak logam dan beberapa bahan lapis penutup dinding.

Menurut ASTM C 494, bahan kimia pembantu itu terbagi menjadi :

- a. Jenis A – Mengurangi Air (*Water reducer*)
- b. Jenis B – Memperlambat pengikatan (*Retarder*)
- c. Jenis C – Mempercepat pengikatan (*Accelerator*)

- d. Jenis D – A+B (*Water Reducer & Retarder*)
- e. Jenis E – A+C (*Water Reducer & Accelerator*)
- f. Jenis F – Superplasticizer (*Water Reducer & High Range*)
- g. Jenis G – *Water Reducer & High Range & Retarder*

Selain itu ada juga :

- a. Menambahkan buih udara (*Air Entrainment*)
- b. Membuat kedap air (*Waterproofing*)

D. Terak Nikel

Slag (terak) adalah limbah hasil industri dalam proses peleburan logam. Terak berupa residu atau limbah yang berwujud gumpalan menyerupai logam, memiliki kualitas rendah karena bercampur dengan bahan-bahan lain yang susah untuk dipisahkan. Terak terjadi akibat penggumpalan mineral silika, potas dan soda dalam proses peleburan logam atau melelehnya mineral-mineral tersebut dari bahan wadah pelebur akibat proses panas yang tinggi (Mustika, 2015)

Material slag nikel terdiri dari senyawa SO_3 MgO CaO Cr_2O_3 FeO SiO_2 Al_2O_3 . Komposisi kimia terak nikel dengan *Energy Dispersion Spectroscopy* (EDS) ditunjukkan pada **Tabel 8** (Sujiono, dkk., 2015)

Tabel 8. Komposisi kimia terak nikel

Oxide	SO_3	MgO	CaO	Cr_2O_3	FeO	SiO_2	Al_2O_3
Terak Nikel	0.29	23.60	0.86	2.27	29.75	38.85	4.38

D.1. Proses Terjadinya Slag Nikel

Proses pengolahan nikel dari biji laterit menggunakan salah satu dari metode proses metalurgi : (a). *Hydroetalurgy*, (b). *Vapormetallurgy* dan (c). *Pyrometallurgy* (Permadi, 1988). Terak nikel merupakan *by product* dari hasil pengolahan tambang nikel yang didapatkan dari hasil proses pengolahan nikel sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 5** (Sugri,2005) sebagai berikut:

a. Proses penambangan

Proses ini mencakup proses eksplorasi dan pengumpulan bahan baku biji laterit dari lokasi penambangan. Kemudian material dikirimkan ke tempat persediaan biji laterit basah setelah sebelumnya disaring dengan saringan ukuran tertentu.

b. Proses pengeringan dan pengayakan

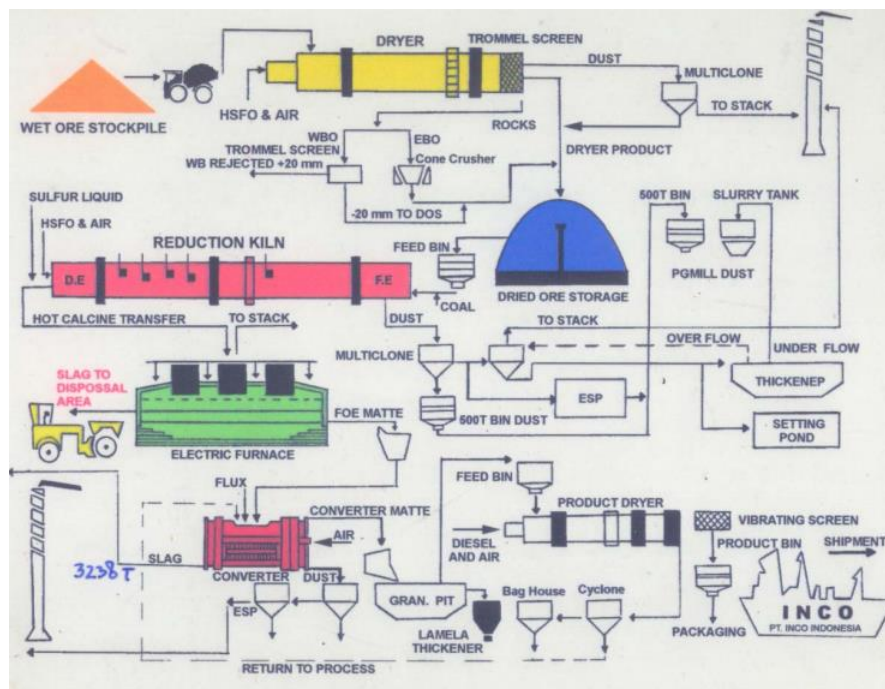
Pada tahap ini kedua proses ini bertujuan untuk mengurangi kadar air dalam biji laterit dan menyediakan bahan yang mempunyai ukuran tertentu dan seragam sehingga memudahkan dalam proses selanjutnya.

c. Proses reduksi dan sulfidasi

Tahap reduksi dilakukan dalam tanur putar reduksi (*reduction rotary kiln*) yang merupakan prasyarat untuk proses peleburan didalam tungku listrik.

d. Proses peleburan

Tahap peleburan merupakan proses lanjutan dari biji nikel yang sudah direduksi di dalam tanur reduksi. Selanjutnya calcine dimasukkan dalam tungku listrik dan dipanaskan sampai melebur. Pada tahap ini slag nikel dihasilkan yang kemudian ditampung dan dibuang ke tempat penampungan slag.



Gambar 5. Proses pembuatan nikel dan terjadinya terak nikel

(Sugiri, 2005)

e. Proses pemurnian di konverter

Pada tahap pemurnian, dihasilkan pula slag yang terdiri dari dua jenis:

- (i) Slag dengan kadar nikel $< 2\%$ disebut *low nikel slag* yang tidak diproses lagi atau dibuang
- (ii) Slag dengan kadar nikel $> 2\%$ disebut *high nikel slag* akan di daur ulang lagi dalam proses pemurnian converter.

D.2. Terak Nikel Granulasi

Pada umumnya slag yang ditemui merupakan slag nikel bersudut. Baru-baru ini, metode produksi baru telah dikembangkan dengan perubahan dalam proses pendinginan di mana tidak diperlukan penghancuran untuk mendapatkan slag yang lebih halus. Dalam metode ini, slag cair dituangkan ke dalam area berpendingin udara dengan hembusan udara bertekanan tinggi untuk pendinginan. Akibatnya, slag dengan cepat mendingin dan membentuk bentuk partikel halus berbentuk bola seperti yang terlihat pada. Jadi slag yang baru dikembangkan berbeda dari slag berbentuk sudut konvensional (Roy dkk, 2018).

Slag nikel granulasi merupakan slag dengan bentuk partikel bulat seperti terlihat pada **Gambar 6**. Slag nikel granulasi terbentuk dari hasil pendinginan menggunakan hembusan udara bertekanan tinggi ketika slag cair dituangkan ke dalam tungku.



Gambar 6. Slag nikel granulasi (Penulis, 2021)

Penggunaan slag berbentuk bulat dalam campuran memiliki beberapa keunggulan, diantaranya:

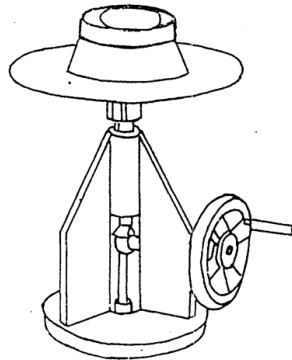
- a. Jumlah air dan semen bisa dikurangi sehingga biaya konstruksi lebih hemat dan daya tahan yang lebih baik.
- b. Terak nikel memiliki kepadatan yang tinggi sehingga dapat meningkatkan ketahanan abrasi.

Namun, penggunaan slag berbentuk bulat dalam campuran juga memiliki kekurangan, contohnya ketika rasio penggunaan terak nikel granulasi yang sangat tinggi, akan berpotensi terjadinya segregasi dan *bleeding* sehingga dapat mengakibatkan penurunan sifat mekanik. Meskipun masalah *bleeding* dapat diperbaiki dengan cara meningkatkan viskositas pasta semen dengan menggunakan campuran seperti asap silika, perubahan sifat mekanik beton agregat terak berbentuk bola belum dievaluasi secara tepat.

E. Sifat Mortar Segar

E.1. Pengujian Meja Sebar (*Flow Table*)

Pengukuran workabilitas pada mortar dilakukan dengan pemeriksaan meja sebar atau *flow table* seperti yang terlihat pada **Gambar 7** sesuai dengan ASTM C124-39. Hasil test ini menunjukkan konsistensi mortar dengan mengukur tingkat penyebaran campuran ketika menerima sentakan pada *table* selama 15 kali dalam 15 detik. Nilai fluiditas didefinisikan sebagai peningkatan diameter penyebaran mortar segar (D dalam cm) dikurangi diameter sebelumnya (10 cm).



Gambar 7. Meja sebar (SNI 03-6825-2002)

Flow mortar adalah mortar yang memiliki kemampuan untuk mengalir dan memadat sendiri. Penambahan rasio slag granulasi dalam mortar akan menaikkan nilai mortar dengan tanpa menambahkan atau tidak merubah komposisi rasio air semennya.

E.2. *Bleeding*

Kecenderungan air untuk naik kepermukaan mortar yang baru dipadatkan dinamakan *bleeding*, yang membawa semen dan butir-butir halus pasir, yang pada saat mortar mengeras nantinya akan membentuk selaput (*laitance*) (Mulyono, 2004).

Slag nikel granulasi yang digunakan pada penelitian ini mempunyai bentuk agregat yang bulat sehingga mempunyai permeabilitas lebih tinggi dibandingkan agregat bersudut. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kandungan terak nikel pada suatu campuran mortar dapat meningkatkan terjadinya *bleeding*.

F. Kuat Tekan Mortar

Menurut SNI 03-6825-2002 kekuatan tekan mortar semen portland adalah gaya maksimum per satuan luas yang bekerja pada benda uji mortar semen portland berbentuk kubus dengan ukuran tertentu serta berumur tertentu. Gaya maksimum adalah gaya yang bekerja saat benda uji kubus pecah.

Kuat tekan mortar dihitung dengan membagi beban tekan maksimum yang diterima benda uji selama pengujian dengan luar penampang melintang.

Berdasarkan standar pengujian ASTM C 1329 – 04 kuat tekan minimum mortar umur 28 hari sebesar 20 MPa. Faktor-faktor yang sangat mempengaruhi kuat tekan mortar diantaranya adalah faktor air semen, jumlah semen, umur mortar, dan sifat agregat.

a. Faktor air semen

(fas) Faktor air semen adalah angka perbandingan antara berat air dan berat semen dalam campuran mortar atau beton. Secara umum diketahui bahwa semakin tinggi nilai f.a.s, semakin rendah mutu kekuatan mortar / beton. Namun demikian, nilai f.a.s yang semakin rendah tidak selalu berarti bahwa kekuatan mortar / beton semakin tinggi. Nilai f.a.s yang rendah akan menyebabkan kesulitan dalam pengerjaan, yaitu kesulitan dalam pelaksanaan pemadatan yang pada akhirnya akan menyebabkan mutu mortar / beton menurun. Umumnya nilai f.a.s minimum yang diberikan sekitar 0,4 dan maksimum 0,65 (Tri

Mulyono, 2004) Faktor air semen yang digunakan pada campuran mortar menurut standar ASTM C 109M adalah 0,485. 2.

b. Jumlah semen

Pada mortar dengan f.a.s sama, mortar dengan kandungan semen lebih banyak belum tentu mempunyai kekuatan lebih tinggi. Hal ini disebabkan karena jumlah air yang banyak, demikian pula pastinya, menyebabkan kandungan pori lebih banyak daripada mortar dengan kandungan semen yang lebih sedikit. Kandungan pori inilah yang mengurangi kekuatan mortar. Jumlah semen dalam mortar mempunyai nilai optimum tertentu yang memberikan kuat tekan tinggi.

c. Umur mortar

Kekuatan mortar akan meningkat seiring dengan bertambahnya umur dimana pada umur 28 hari mortar akan memperoleh kekuatan yang diinginkan.

d. Sifat agregat

Sifat agregat yang berpengaruh terhadap kekuatan ialah bentuk, kekasaran permukaan, kekerasan dan ukuran maksimum butir agregat. Bentuk dari agregat akan berpengaruh terhadap interlocking antar agregat