

**PENGARUH KARAKTERISTIK BENTUK TERAK NIKEL SEBAGAI
PENGANTI PASIR**
*THE EFFECT OF SHAPE CHARACTERISTICS OF NICKEL SLAG AS
SAND SUBSTITUTE*



MUFLIAH NIDDAYANI

D012231051

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024



**PENGARUH KARAKTERISTIK BENTUK TERAK NIKEL SEBAGAI
PENGANTI PASIR**

MUFLIAH NIDDAYANI

D012231051



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

**THE EFFECT OF NICKEL SLAG SHAPE CHARACTERISTICS AS
A SUBSTITUTE FOR SAND**

MUFLIAH NIDDAYANI

D012231051



CIVIL ENGINEERING MASTER STUDY PROGRAM

FACULTY ENGINEERING

HASANUDDIN UNIVERSITY

GOWA

2024

PENGAJUAN TESIS

**PENGARUH KARAKTERISTIK BENTUK TERAK NIKEL SEBAGAI
PENGANTI PASIR**

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister
Program Studi Teknik Sipil**

Disusun dan diajukan oleh

MUFLIAH NIDDAYANI

D012231051

Kepada

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

2024

TESIS**PENGARUH KARAKTERISTIK BENTUK TERAK NIKEL SEBAGAI
PENGANTI PASIR****MUFLIAH NIDDAYANI****D012231051**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 14 November 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



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

Pembimbing Pendamping



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

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin

Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT., IPM., AER
NIP. 19730926 200012 1002

Ketua Program Studi
S2 Teknik Sipil

Dr. Ir. M. Asad Abdurrahman, ST., M. Eng.PM.IPM
NIP.19730306 199802 1001

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul "**PENGARUH KARAKTERISTIK BENTUK TERAK NIKEL SEBAGAI PENGGANTI PASIR**" adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing (Dr.Eng. M. Akbar Caronge, S.T., M.Eng sebagai Pembimbing Utama dan Prof. Dr. M. Wihardi Tjaronge, S.T., M.Eng sebagai Pembimbing Pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka skripsi ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan pada seminar 5th International Conference on Civil and Enviromental Engineering (ICCEE) 2024 di Kuala Lumpur sebagai artikel dengan judul "*Effect of Nickel Slag Aggregate Shape on Flow, Compressive Strength, and Crack Patterns of Mortar*". Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 28 November 2024



Mufihah Nidayani
D012231051

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulisan tesis ini yang berjudul "**PENGARUH KARAKTERISTIK BENTUK TERAK NIKEL SEBAGAI PENGGANTI PASIR**" dapat diselesaikan sebagai salah satu syarat akademik untuk memperoleh gelar Magister Teknik Sipil di Universitas Hasanuddin. Penulisan tesis ini tidak terlepas dari berbagai tantangan yang dihadapi, namun berkat dukungan, bimbingan, dan bantuan dari banyak pihak, penulis dapat menyelesaikan tugas ini dengan baik. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc., selaku Rektor Universitas Hasanuddin.

Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT, IPM, ASEAN.Eng. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Prof. Dr. Ir. H. Muh. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan selaku pembimbing II yang senantiasa memberikan arahan dan masukan berharga dalam penyusunan tesis ini.

Dr. Eng. M. Akbar Caronge, ST., M.Eng selaku pembimbing I atas waktu, pengetahuan, dan bimbingan yang diberikan selama proses penyusunan tesis ini.

Dr. Eng. Bambang Bakri, ST., MT., Dr. Ir. Muh. Asad Abdurrahman, ST., M.Eng. PM, IPM, selaku penguji.

Seluruh dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Seluruh staf dan karyawan Departemen Teknik Sipil, staf dan karyawan Fakultas Teknik serta staff Laboratorium dan asisten Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Teman-teman Eco Material 2023-1 yang selalu menemani dalam penyelesaian penulisan Tesis ini.

Utamanya, penulis ingin mengungkapkan rasa terima kasih yang mendalam kepada orang tua tercinta, **Prof. Dr. Ir. H. Ilyas Renreng, MT.**, dan ibunda **Dra. Hj. Maipa Anwar Said, M.si.**, atas cinta, doa yang tiada henti dan segala dukungan selama ini, baik spritual maupun material. Terima kasih karena selalu percaya bahwasannya kemampuan penulis selalu di atas pemikiran penulis sendiri, karena berkat dorongannya pula maka penulis bisa sampai dititik sekarang ini. Penghargaan yang besar juga penulis sampaikan kepada seluruh keluarga dan sahabat atas motivasi dan dorongan yang begitu berharga, melampaui segala ukuran.

Gowa, 18 November 2024

Penulis,



Muflihah Nidayani

ABSTRAK

MUFLIAH NIDDAYANI. PENGARUH KARAKTERISTIK BENTUK TERAK NIKEL SEBAGAI PENGGANTI PASIR

(dibimbing oleh Dr.Eng.M. Akbar Caronge. S.T.,M.Eng, dan Prof. Dr.. Muh. Wihardi Tjaronge. S.T., M.Eng).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh karakteristik bentuk terak nikel, yaitu angular dan spherical, sebagai alternatif pengganti pasir dalam pembuatan mortar. Penggunaan pasir alami semakin terbatas akibat eksploitasi berlebihan, sehingga dibutuhkan material alternatif yang berkelanjutan, salah satunya adalah terak nikel yang merupakan limbah industri pertambangan. Penelitian dilakukan dengan variasi proporsi campuran antara terak nikel *angular* dan *spherical* pada mortar dengan beberapa kombinasi, yaitu 30%SS:70%AS, 40%SS:60%AS, 50%SS:50%AS, 60%SS:40%AS, 70%SS:30%AS, serta 100%SS, dan 100%AS. Pengujian yang dilakukan meliputi pengukuran kuat tekan mortar serta dampak lingkungan melalui indikator seperti Global Warming Potential (GWP), Acidification Potential (AP), dan Eutrophication Potential (EP). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan kombinasi terak nikel, terutama pada proporsi 30% SS dan 70% AS, menghasilkan kuat tekan optimum sebesar 42,99 N/mm² pada umur 28 hari, hal ini menunjukkan peningkatan signifikan dibandingkan dengan campuran mortar menggunakan pasir alami. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan terak nikel sebagai pengganti pasir tidak hanya meningkatkan kuat tekan pada mortar, tetapi juga dapat mengurangi dampak lingkungan yang dihasilkan dari emisi karbon dengan penurunan GWP hingga 20%, AP sebesar 15%, dan EP sebesar 18% dibandingkan dengan agregat pasir alami. Kedua bentuk terak nikel ketika dikombinasikan dapat memberikan keseimbangan antara peningkatan sifat mekanik dan pengurangan dampak negatif terhadap lingkungan. Temuan ini diharapkan dapat memberikan kontribusi penting bagi pengembangan material konstruksi yang lebih ramah lingkungan dan efisien dengan memanfaatkan limbah industri yang tersedia secara berkelanjutan.

Kata Kunci: terak nikel, pasir alam, mortar, kuat tekan, GWP, AP, EP

ABSTRACT

MUFLIAH NIDDAYANI. THE EFFECT OF NICKEL SLAG SHAPE CHARACTERISTICS AS A SUBSTITUTE FOR SAND

(guided by Dr.Eng.M. Akbar Caronge. S.T.,M.Eng, dan Prof. Dr.. Muh. Wihardi Tjaronge. S.T., M.Eng).

This study aims to examine the effects of the shape characteristics of nickel slag, specifically angular and spherical, as an alternative to sand in mortar production. The availability of natural sand has been increasingly constrained due to overexploitation, creating the need for sustainable alternative materials. One such alternative is nickel slag, a byproduct of the mining industry. The research was conducted by varying the proportions of angular and spherical nickel slag in the mortar mixtures, with combinations of 30% SS:70% AS, 40% SS:60% AS, 50% SS:50% AS, 60% SS:40% AS, 70% SS:30% AS, as well as 100% SS, and 100% AS. Testing involved measuring the compressive strength of the mortar and assessing environmental impacts through indicators such as Global Warming Potential (GWP), Acidification Potential (AP), and Eutrophication Potential (EP). The results revealed that a mixture with 30% SS and 70% AS achieved the highest compressive strength of 42.99 N/mm² at 28 days, a notable improvement compared to mortar made with natural sand. Furthermore, the findings indicated that replacing sand with nickel slag not only improves the compressive strength of the mortar but also reduces environmental impacts, lowering GWP by 20%, AP by 15%, and EP by 18% in comparison to natural sand aggregates. The combination of angular and spherical nickel slag offers a balance between enhanced mechanical properties and reduced environmental footprint. These findings are expected to make a valuable contribution toward the development of more environmentally friendly and efficient construction materials by utilizing industrial waste that is readily available in a sustainable manner.

Keywords: nickel slag, natural sand, mortar, compressive strength, GWP, AP, EP

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	xiv
BAB I LATAR BELAKANG	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	2
1.5 Batasan Masalah	2
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Mortar	4
2.1.1 Tipe Mortar	4
2.1.2 Sifat-Sifat Mortar	8
2.2 Bahan-Bahan Penyusun Mortar	9
2.2.1 Semen Portland (<i>Portland Cement</i>)	9
2.2.2 Agregat Halus	14
2.2.3 Air	15
2.2.4 Bahan Tambah	16
2.3 Terak Nikel	17
2.3.1 Proses Terjadinya Terak Nikel	17
2.3.2 Terak Nikel <i>Angular</i>	19
2.3.3 Terak Nikel <i>Spherical</i>	20
2.4 Sifat Mortar Segar	22
2.4.1 Pengujian Meja Sebar (<i>Flow Table</i>)	22
2.5 Kuat Tekan Mortar	22
2.6 Dampak Lingkungan	23
2.7 Penelitian Terdahulu	25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Metode Penelitian	29
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	31
3.3 Jenis Penelitian dan Sumber Data	31

3.4 Alat dan Bahan Penelitian.....	31
3.4.1 Alat Penelitian.....	31
3.4.2 Bahan Penelitian	31
3.5 Pengujian Karakteristik Agregat.....	32
3.6 Rancangan Campuran (<i>mix design</i>)	32
3.7 Pembuatan Benda Uji.....	33
3.8 Pemeriksaan <i>Slump Test</i> pada Mortar.....	34
3.9 Perawatan (<i>Curing</i>) Benda Uji.....	34
3.10 Pengujian Kuat Tekan Mortar.....	34
3.11 Indikator Dampak Kinerja Lingkungan	35
BAB IV Hasil dan Pembahasan.....	36
4.1 Karakteristik Material	36
4.1.1 Bentuk Fisik Terak Nikel	36
4.1.2 Sifat Fisik Terak Nikel	37
4.1.3 Gradasi Terak Nikel	37
4.2 Kinerja Semen Campuran	38
4.3 Flow	39
4.4 Berat Volume	40
4.4.1 Berat Volume Kering Permukaan	40
4.4.2 Berat Volume Kering Oven.....	41
4.4.3 Berat Volume Mortar Segar	41
4.5 Kuat Tekan.....	41
4.6 Dampak lingkungan	43
4.6.1 Pengaruh terak nikel pada GWP dan $P_{GWP/fc}$	44
4.6.2 Pengaruh terak nikel pada AP dan $P_{AP/fc}$	45
4.7 Pengaruh terak nikel pada EP dan P_{EP-fc}	46
4.8 Pola Retak.....	47
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	48
DAFTAR PUSTAKA	49
LAMPIRAN	51

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Persyaratan spesifikasi proporsi mortar	7
Tabel 2 Persyaratan spesifikasi sifat mortar	7
Tabel 3 Syarat kimia utama semen Portland	10
Tabel 4 Syarat kimia tambahan ^{a)}	12
Tabel 5 Syarat Fisika Utama	13
Tabel 6 Syarat Fisika Tambahan ^{a)}	14
Tabel 7 Gradasi Pasir	15
Tabel 8 Komposisi kimia terak nikel	17
Tabel 9 Pemeriksaan Agregat Halus	32
Tabel 10 Rancangan campuran mortar	33
Tabel 11 Hasil pemeriksaan karakteristik fisik angular slag dan spherical slag	37
Tabel 12 Modulus kehalusan terak nikel	37
Tabel 13. Perhitungan dampak lingkungan dari bahan semen	39

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Proses pembuatan nikel dan terjadinya terak nikel	19
Gambar 2 Terak Nikel <i>Angular</i>	19
Gambar 3 Bentuk terak nikel <i>angular</i> diamati dengan pemindahan laser	20
Gambar 4 Terak nikel <i>spherical</i>	21
Gambar 5 Meja sebar (SNI 03-6825-2002)	22
Gambar 6 Slag EAF	25
Gambar 7 (a) Agregat FNS; (b) Pasir	26
Gambar 8 Partikel slag baja bulat	27
Gambar 9 Diagram Alir	30
Gambar 10 Bahan Penelitian; (a) Terak nikel <i>angular</i> , (b) Terak nikel <i>spherical</i> , dan (c) pasir	32
Gambar 11 Pemeriksaan Uji <i>Slump</i>	34
Gambar 12 <i>Angular Slag</i> (a) <i>Spherical Slag</i> (b) Pasir (c)	36
Gambar 13 <i>Angular Slag</i> (a) <i>Spherical Slag</i> (b)	36
Gambar 14 Analisa saringan agregat halus	38
Gambar 15 Nilai <i>Flow</i> pada masing masing benda uji	39
Gambar 16 Hasil Pengujian Berat Volume Mortar	40
Gambar 17 Analisa Kuat Tekan Uji	42
Gambar 18 Normalisasi Kuat Tekan Mortar Slag terhadap f_c Control	43
Gambar 19 Hubungan antara GWP dan PGWP/ f_c dalam berbagai campuran	44
Gambar 20 Grafik Nilai GWP dari setiap campuran	45
Gambar 21 Hubungan antara AP dan P_{AP/f_c} dalam berbagai campuran	45
Gambar 22 Hubungan antara EP dan P_{EP-f_c} dalam berbagai campuran	47

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/singkatan	Arti dan keterangan
E	= dampak lingkungan
li	= standar dampak lingkungan untuk parameter ke-i
wi	= berat kategori ke-i (kg/m^3)
P_{i-fc}	= nilai total parameter dampak lingkungan parameter <i>i</i> yang diperoleh dari mix desain yang digunakan dibagi kuat tekan
Total _{mix}	= total dampak lingkungan parameter <i>i</i> yang diperoleh dari mix desain yang digunakan
f_c	= Kuat tekan (MPa)
P	= Beban maksimum (N)
A	= Luas penampang yang menerima beban (mm^2)
IS _{GWP-Cs}	= GWP _{mix} total nilai yang diperoleh dari <i>mix design</i> yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgCO_2)
GWP _{mix}	= GWP diperoleh dari <i>mix design</i> yang digunakan (kgCO_2)
IS _{POCP-Cs}	= POCP _{mix} total nilai yang diperoleh dari <i>mix design</i> yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgSb)
POCP _{mix}	= POCP diperoleh dari <i>mix design</i> yang digunakan (kgSb)
IS _{AP-Cs}	= AP _{mix} total nilai yang diperoleh dari <i>mix design</i> yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgSO_2)
AP _{mix}	= AP diperoleh dari <i>mix design</i> yang digunakan (kgSO_2)
IS _{EP-Cs}	= EP _{mix} total nilai yang diperoleh dari <i>mix design</i> yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgPO_4)
EP _{mix}	= EP diperoleh dari <i>mix design</i> yang digunakan (kgPO_4)
f_s	= Kuat tekan (MPa)

BAB I

LATAR BELAKANG

1.1 Latar Belakang

Di Indonesia, dari waktu ke waktu telah terlihat bahwa produksi bata beton yang menggunakan agregat pasir telah meningkat, yang mengakibatkan penurunan jumlah agregat pasir yang dapat diperoleh dari sumber alami. Selain itu, metode ekstraksi pasir dapat diperoleh dari lokasi selain lokasi penambangan; namun, hal ini akan menyebabkan peningkatan biaya pengolahan. Dalam konstruksi pasir sungai alami, biasanya digunakan agregat halus, karena agregat halus mencakup sekitar 70 persen dari volume mortar atau beton. Hal ini disebabkan oleh penggunaan agregat halus yang umum. Meningkatnya permintaan pasir halus mengakibatkan kelangkaannya. Erosi dasar sungai yang cepat telah mengakibatkan masalah lingkungan yang cukup besar, termasuk penipisan lapisan tanah yang penting untuk menahan air dan ketidakstabilan tepian sungai. Tantangan muncul dari erosi dasar sungai yang cepat. (Maharishi, 2020)

Roy, Sushanta dkk (2018) Sebuah upaya penelitian dilakukan untuk mengeksplorasi aplikasi potensial dari partikel halus terak pengoksidasi Electric Arc Furnace (EAF) berbentuk bola dalam beton. Untuk penelitian ini, metode terbaru yang digunakan adalah penggunaan agregat terak EAF. Proses ini melibatkan memasukkan terak cair ke dalam ruang berpendingin udara sementara udara bertekanan tinggi diinjeksikan ke dalam ruang untuk menghasilkan konsistensi terak EAF yang lebih halus. Hasilnya adalah terak EAF mengalami pendinginan yang cepat, yang mengarah pada penciptaan partikel-partikel yang halus dan berbentuk bola. Temuan penelitian menunjukkan bahwa penggabungan agregat terak Electric Arc Furnace (EAF) berbentuk bola pada beton meningkatkan kualitas mekanis material. Penggunaan agregat terak EAF berbentuk bola pada perkerasan beton lebih menguntungkan dan sesuai. Hal ini menyebabkan penurunan substansial dalam jumlah air dan semen yang diperlukan untuk pencampuran, sekaligus menjamin bahwa kualitas beton tetap tidak terganggu dalam semua kondisi. Berbagai macam bahan dapat digunakan, seperti pasir alami (2,55 g/cc), kerikil (2,60 g/cc), dan semen (3,15 g/cc).

Guna untuk menjaga ketersediaan pasir sebagai sumber daya alam yang tidak terbarukan, perlu dilakukan pengurangan penggunaan pasir dalam konstruksi beton atau mortar. Mengingat permasalahan ini, diperlukan penelitian dan pengembangan alternatif material pengganti pasir dalam pembuatan beton atau mortar, agar dapat menghasilkan material yang ramah lingkungan.

Limbah terak nikel sering digunakan dalam produksi paving block dan sebagai bahan tambahan dalam campuran beton. Jenis pengolahan ini dapat mengurangi kerusakan lingkungan yang disebabkan oleh limbah produksi B3. Terak terdiri dari mineral stabil seperti kalsium oksida dan silikon dioksida, keduanya menunjukkan karakteristik kepadatan tinggi dan menyerupai fase kalsium silikat. Hal ini menjadi dasar perbandingan terak dengan fase kalsium silikat. Memanfaatkan terak sebagai pengganti agregat alami dalam proyek

konstruksi merupakan alternatif yang layak. Industri terak menghasilkan banyak bahan alternatif yang dapat secara efektif menggantikan pasir. Contoh bahan dalam kategori ini meliputi Cooper Slag, Steel Slag, dan tailing.

Adapun judul yang diangkat oleh penulis adalah **“Pengaruh Karakteristik Terak Nikel Sebagai Material Pengganti Pasir Ramah Lingkungan”**

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang diatas maka, permasalahan yang ingin diselesaikan dirumuskan sebagai berikut:

1. Masalah perilaku kuat tekan mortar yang menggunakan daur ulang limbah terak nikel sebagai alternatif agregat halus
2. Masalah pengaruh daur ulang limbah terak nikel sebagai alternatif agregat halus terhadap kinerja lingkungan

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisa perilaku kuat tekan mortar yang menggunakan daur ulang limbah terak nikel sebagai alternatif agregat halus.
2. Menganalisa dampak pemanfaatan daur ulang limbah terak nikel sebagai alternatif agregat halus terhadap indikator sustainabilitas lingkungan.

1.4 Manfaat Penelitian

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari penelitian ini, diharapkan dapat meningkatkan pengetahuan tentang manfaat kompresi mortar yang kuat dengan menggunakan berbagai bentuk limbah terak nikel sebagai pengganti pasir, serta implikasi lingkungan dari penggunaan limbah terak nikel, untuk mendorong pemahaman yang lebih menyeluruh tentang keberlanjutan. Hal ini penting untuk mendapatkan pemahaman yang lebih menyeluruh tentang keberlanjutan serta akan dilakukan untuk mencapai pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai keberlanjutan.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penulisan tesis ini ditetapkan berdasarkan beberapa aspek sebagai berikut:

1. Jenis semen yang digunakan dalam penelitian ini adalah PCC, yang diproduksi sesuai dengan standar yang ditetapkan dalam SNI 2049-2015.
2. Terak nikel angular yang digunakan diambil dari PT. Vale Indonesia dan digali menggunakan excavator.
3. Terak nikel spherical yang digunakan merupakan produk yang didinginkan secara langsung dengan udara dari PT. Vale Indonesia.

4. Penelitian ini menerapkan berbagai kombinasi campuran dengan perbandingan 30%SS:70%AS, 40%SS:60%AS, 50%SS:50%AS, 60%SS:40%AS, 70%SS:30%AS, serta 100%AS dan 100%SS.
5. Benda uji yang digunakan berbentuk kubus dengan ukuran 50 mm x 50 mm x 50 mm.
6. Proses perawatan dilakukan dengan metode curing melalui perendaman dalam air tawar.
7. Pengujian dilaksanakan di laboratorium yang sesuai dengan standar resmi, dengan harapan menghasilkan data yang valid.

1.6 Sistematika Penulisan

Dalam penulisan teks, diskusi hasil uji laboratorium terhadap **PENGARUH KARAKTERISTIK BENTUK TERAK NIKEL SEBAGAI PENGGANTI PASIR**, penulis menyajikan gambaran umum serta menjelaskan secara singkat sistematika penulisan hasil studi yang diuraikan dalam struktur bab sebagai berikut:

Bab I Pendahuluan

Pada bab ini, penulis akan membahas latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan.

Bab II Tinjauan Pustaka

Bab ini mengulas daur ulang limbah terak nikel, semen portland, agregat halus, air, bahan tambah, serta mengkaji kuat tekan, sifat mortar segar, indikator sustanbilias lingkungan, dan penelitian sebelumnya.

Bab III Metodologi Penelitian

Penulis akan menjelaskan detail penelitian, termasuk lokasi dan waktu pelaksanaan, metode pengumpulan data, bahan yang digunakan, alat yang dipakai, serta pelaksanaan penelitian dan bagan organisasi dari penelitian.

Bab IV Hasil Penelitian dan Pembahasan

Dalam bab ini, penulis menyajikan hasil penelitian serta membahas temuan yang relevan dengan tujuan penelitian.

Bab V Kesimpulan dan Saran

Bab ini akan menyajikan kesimpulan dari penelitian dan memberikan beberapa saran untuk pengembangan lebih lanjut.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mortar

Menurut SNI 03-6825-2002, tiga unsur penyusun mortar adalah pasir kuarsa, air suling, dan semen portland. Bahan penyusun mortar adalah sebagai berikut. Mortar adalah komposisi yang memiliki formulasi tertentu, seperti yang ditunjukkan oleh istilah "mortar". Tjokrodimuljo (1996) menyatakan bahwa mortar yang berkualitas harus memiliki karakteristik sebagai berikut: tahan lama, hemat biaya, mudah dimanipulasi (termasuk pencampuran, pengangkutan, pemasangan, dan perataan), lekat pada pasangan batu, cepat kering atau mengeras, kedap udara, dan tidak adanya keretakan setelah pemasangan. Mortar berkualitas tinggi harus memiliki semua atribut ini. Menurut ASTM C270, tujuan utama dari pasangan bata mortar adalah untuk menyatukan beberapa unit pasangan bata menjadi satu kesatuan yang kohesif daripada menggunakan mortar untuk membuat unit itu sendiri. Oleh karena itu, dapat menggunakan mortar masonry sebagai bagian penting yang mewujudkan karakteristik kinerja fungsional yang sesuai. Hal ini akan difasilitasi sebagai konsekuensi dari hal ini.

2.1.1 Tipe Mortar

Mortar dapat diklasifikasikan menjadi empat kelompok utama berdasarkan komponennya: mortar lumpur, mortar kapur, mortar semen, dan mortar khusus. Mortar dapat dikategorikan ke dalam beberapa klasifikasi. Komponen-komponen mortar memungkinkan untuk membedakan setiap kategori dari yang lain. Analisis terperinci dari berbagai jenis mortar dan komponennya masing-masing disediakan di bawah ini, disertai dengan penjelasan mendalam tentang masing-masing komponen (Tjokrodimuljo, 1996 dalam Veliyati, 2010):

- a. Mortar lumpur adalah jenis mortar yang dibuat dengan menggabungkan pasir, kotoran alami, atau lumpur dalam sebuah wadah dan memasukkan air ke dalam campuran. Kombinasi tersebut harus dicampur dengan cermat sampai menghasilkan produk yang kohesif. Dengan jumlah pasir yang tepat, Anda akan mendapatkan kombinasi berkualitas tinggi. Karena penyusutan pengeringan yang cukup besar, mortar akan retak pada saat pengeringan, yang berpotensi mengurangi kekompakan campuran. Inilah alasan di balik kejadian ini. Mortar akan retak jika pasir yang digunakan tidak mencukupi. Mortar ini sebagian besar digunakan untuk membangun dinding interior atau tungku api.
- b. Mortar kapur terdiri dari tiga elemen: pasir, kapur, dan air. Kapur dan pasir pertama kali dicampur sampai kering, kemudian air digunakan seperlunya untuk menciptakan konsistensi yang agak homogen. Prosedur ini diulangi sampai kombinasi mencapai pengeringan sempurna. Kapur menyusut

selama proses pengerasan, sehingga membutuhkan penggunaan pasir yang dua sampai tiga kali lipat dari jumlah kapur yang ada di dalam material. Mortar ini biasanya digunakan dalam konstruksi dinding bata.

- c. Semen mortar diproduksi dengan memformulasikan campuran pasir, semen portland, dan air dalam proporsi yang tepat untuk membuat mortar. Rasio volume semen dan pasir adalah satu banding tiga, atau satu banding enam atau lebih besar. Pasir merupakan komponen kedua. Pasir merupakan proporsi semen yang jauh lebih sedikit. Mortar ini lebih tahan lama daripada mortar lumpur atau mortar kapur karena sering digunakan dalam konstruksi penahan beban seperti dinding dan pilar kolom. Hal ini disebabkan oleh aplikasinya yang khas pada konstruksi semacam itu. Kedap air mortar ini membuatnya sesuai untuk aplikasi baik di bawah tanah maupun di luar ruangan. Campuran semen dan pasir kering disiapkan dengan cara yang rata dan kedap air. Ini adalah langkah terpenting. Selanjutnya, air dalam jumlah minimal dimasukkan, dan campuran diaduk lagi sampai konsistensi yang dibutuhkan tercapai.
- d. Mortar khusus adalah formulasi yang dibuat dengan menggabungkan banyak konstituen, termasuk asbes, serat, serat rami (sering disebut sebagai serat rami), serat kayu, serbuk gergaji, dan bahan tambahan. Mortar ini digunakan untuk kedap suara dan insulasi termal, di antara kegunaan lainnya. Penggunaan mortar tahan api adalah praktik umum dalam konstruksi tungku api dan aplikasi lainnya. Dengan membandingkan jumlah bubuk bata api dan semen aluminium, seseorang dapat menentukan jumlah semen aluminium yang tepat untuk dimasukkan ke dalam campuran.

Berdasarkan ASTM C270, Standard Specification for Mortar for Unit Masonry, mortar untuk adukan pasangan terdiri dari 5 tipe, yaitu:

- a. Mortar tipe M
Mortar tipe M, yang memiliki kekuatan tekan minimum 17,2 MPa, diizinkan untuk digunakan pada pasangan bata bertulang dan tidak bertulang yang mampu menahan tekanan tekan yang besar. Jenis mortar ini juga diizinkan untuk digunakan pada pasangan bata yang tidak diperkuat.
- b. Mortar tipe S
Mortar tipe S direkomendasikan untuk konstruksi yang terletak pada atau di bawah permukaan tanah, serta untuk struktur yang bersentuhan langsung dengan tanah. Pondasi, dinding penahan tanah, trotoar, selokan, dan lubang got merupakan contoh konstruksi yang tidak termasuk dalam kategori ini. Mortar tipe S sangat ideal untuk struktur yang terpapar beban tekan standar namun memiliki ikatan fleksibel yang kuat untuk menahan gaya lateral yang signifikan yang disebabkan oleh angin, aktivitas seismik, dan tekanan tanah. Mortar tipe S memiliki daya tahan yang luar biasa, sehingga menjadi pilihan ideal untuk bangunan tersebut.

- c. Mortar tipe N
Mortar tipe N sebagian besar digunakan dalam konstruksi pasangan bata di atas tanah. Mortar ini direkomendasikan untuk dinding penahan beban yang terletak di dalam maupun di luar untuk memastikan konstruksi yang benar. Mortar dengan kekuatan sedang ini merupakan pilihan optimal untuk aplikasi konstruksi pasangan bata karena keseimbangan kekuatan tekan dan lenturnya yang unggul, serta kemudahan pengerjaan dan keefektifan biaya. Selain itu, mortar ini merupakan pilihan yang paling ekonomis. Kekuatan tekan minimum 5,2 MPa diperlukan agar material ini dapat diterima.
- d. Mortar tipe O
Mortar tipe O dicirikan oleh kekuatan tekannya yang buruk dan kandungan kapur yang signifikan. Untuk dinding yang tidak dapat menopang beban struktural dan tetap tidak membeku dalam situasi jenuh atau lembab, penggunaan jenis mortar khusus ini disarankan. Hal ini berlaku untuk dinding yang terletak di dalam maupun di luar konstruksi. Jenis mortar ini umumnya dipilih untuk proyek konstruksi di sektor bangunan lokal karena kesederhanaan dan keefektifan biayanya. Kekuatan tekan minimum 2,4 MPa diperlukan agar material ini dapat diterima.
- e. Mortar tipe K
Mortar tipe K ini secara eksklusif disarankan untuk aplikasi pada struktur yang lebih tua yang sebagian besar menggunakan mortar kapur, sesuai dengan kriteria standar ASTM C270. Mortar ini tidak umum digunakan dalam pendirian struktur baru. Mortar tipe K ini jarang digunakan karena kekuatan tekan dan lenturnya yang sangat rendah. Hal ini merupakan alasan tambahan untuk penggunaannya yang terbatas. Kekuatan tekan minimum 5,2 MPa diperlukan agar material ini dapat diterima.

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	...	...	...	...	...	...	$\frac{1}{4}$	Tidak kurang dari $2\frac{1}{4}$ dan tidak lebih dari 3 kali jumlah darivolume terpisah material sementisius
	S	1	...	...	...	...	...	...	$> \frac{1}{4}$ sampai $\frac{1}{2}$	
	N	1	...	...	...	...	...	...	$> \frac{1}{2}$ sampai $1\frac{1}{4}$	
	O	1	...	...	...	...	...	...	$> 1\frac{1}{4}$ sampai $2\frac{1}{2}$	
Semen Mortar	M	1	...	...	1	...	...	...
	M	...	1	...	...	...	...	...
	S	$\frac{1}{2}$	...	...	1	...	...	...
	S	...	...	1	...	...	...	...
	N	...	...	...	1	...	...	...
	O	...	...	...	1	...	...	...
Semen Pasangan	M	1	...	...	...	...	...	1		
	M	...	...	...	...	1	...	...
	S	$\frac{1}{2}$	...	...	...	...	...	1		
	S	...	...	...	...	...	1	...		
	N	...	...	...	...	...	...	1		
	O	...	...	...	...	...	...	1		

Tabel 2 Persyaratan spesifikasi sifat mortar

Tabel 2. 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 volumevolume 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	

2.1.2 Sifat-Sifat Mortar

Mortar mudah beradaptasi dan dapat digunakan untuk berbagai aplikasi karena memiliki banyak sifat yang menguntungkan. Tjokrodinuljo (1999:126) menyatakan bahwa mortar yang efektif harus memiliki beberapa karakteristik, beberapa di antaranya adalah sebagai berikut. Karakteristik ini meliputi:

- a. Biaya yang efisien
- b. Memiliki daya tahan yang tinggi
- c. Praktis dalam penggunaannya (mudah untuk dicampur, diangkut, dipasang, dan diratakan)
- d. Menempel dengan baik pada batu bata, batu, dan bahan serupa, serta cepat mengering.
- e. Tahan terhadap kebocoran air.
- f. Tidak muncul retakan setelah pemasangan selesai.

Karena mortar memiliki kualitas yang unggul, ia dapat diterapkan dalam berbagai kegunaan. Mortar berfungsi sebagai pengikat batu bata dan juga membantu mendistribusikan beban secara merata.

Campuran mortar terbagi menjadi dua jenis komponen, masing-masing dengan fungsi tertentu sebagai berikut:

- a. Adukan untuk pasangan, biasanya digunakan untuk merekatkan bata atau bahan sejenis dalam membangun tembok.

- b. Adukan plesteran, yang digunakan untuk menutupi atau meratakan permukaan tembok.

2.2 Bahan-Bahan Penyusun Mortar

Proses pembuatan mortar melibatkan beberapa komponen sebagai berikut:

2.2.1 Semen Portland (*Portland Cement*)

Semen merupakan pengikat hidraulik, bahan anorganik yang, ketika dicampur dengan air, mengalami reaksi dan proses hidrasi untuk menciptakan pasta yang mengikat dan mengeras. Semen diproduksi melalui penggabungan air dengan bahan tambahan. Jenis pengikat hidraulik disebut sebagai semen. Standar BS EN 197-1 menetapkan bahwa setelah mengeras, semen akan tetap kuat dan stabil bahkan ketika terendam air. Hal ini tetap berlaku meskipun terkena air.

Sektor konstruksi sangat bergantung pada semen Portland untuk aplikasi beton. Semen portland adalah bahan yang umum digunakan. Penggilingan terak semen portland menghasilkan semen hidrolis, seperti yang didefinisikan oleh SNI 15-2049-2004. Kata ini berfungsi sebagai dasar untuk produksi semen portland. Selain itu, produksi semen portland memerlukan penyertaan konstituen tambahan, yang dapat terdiri dari satu atau lebih jenis kristal senyawa kalsium sulfat. Kalsium silikat, komponen penting dari semen Portland, kemudian dihancurkan dan digunakan dalam proses ekstraksi hidrolis. Jika komponen lain dimasukkan ke dalam campuran, ada kemungkinan hal ini akan terjadi.

Penggilingan merupakan tahap awal dalam produksi semen Portland. Prosedur ini memerlukan pengurangan komponen kristal menjadi bubuk. Kalsium silikat dan aluminium silikat adalah dua konstituen utama yang digunakan dalam produksi semen Portland. Integrasi air ke dalam mineral-mineral ini menghasilkan pasta yang, ketika dikeringkan, akan menunjukkan kekuatan yang sebanding dengan batuan yang signifikan. Pasta ini dihasilkan ketika mineral digabungkan dengan air untuk membentuk campuran. Satu kantong semen memiliki berat 94 pon per kaki kubik, dengan berat jenis berkisar antara 3,12 hingga 3,16. Berat volume satu kantong semen berkisar antara 3,12 hingga 3,16. Berat jenis semen kira-kira berada di tengah-tengah kisaran ini. Penghitungan selanjutnya menggambarkan konstituen utama yang digunakan dalam proses produksi semen selama manufaktur:

- a. Kapur (CaO) – dari batu kapur,
- b. Silika (SiO_2) – dari lempung,
- c. Alumina (Al_2O_3) – dari lempung (Selain memiliki sejumlah kecil magnesium, atau MgO , kadang-kadang juga mengandung sejumlah kecil alkali. Masing-masing elemen ini ada di lingkungan dalam jumlah kecil, yang disebut sebagai tingkat jejak. Oksida besi kadang kala dimasukkan ke dalam senyawa untuk mengontrol komposisinya (Edward G. Nawy, 1995).

Kriteria mutu semen Portland, sebagaimana ditentukan oleh SNI 15-2049-2004, mencakup persyaratan kimiawi semen Portland. Hal ini merupakan poin tambahan yang menarik. Agar semen Portland dapat diterima, semen tersebut harus memenuhi kriteria yang diuraikan dalam **Tabel 3** sebagai berikut:

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 Jika C ₃ A □ 8,0	3,0	3,0	3,5	2,3	2,3
	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) Meskipun senyawa prospektif tertentu menunjukkan batasan kimiawi yang ditetapkan berdasarkan perhitungan, ini tidak menyiratkan bahwa oksida molekul kandidat ada dalam keadaan murni. Hal ini, pada kenyataannya, tidak benar. Perhitungan yang digunakan untuk menentukan persyaratan pembatas menghasilkan temuan ini.

C = CaO, S = SiO₂, A = Al₂O₃, F = Fe₂O₃, contoh C₃A = 3CaO.Al₂O₃

Aluminium oksida (Al₂O₃) terdiri dari titanium dioksida (TiO₂) dan fosfor pentoksida (P₂O₅). Fosfor pentoksida juga merupakan komponen bahan kimia.

Setelah melakukan analisis kimia basah, jumlah Fe₂O₃ (R₂O₃ – Fe₂O₃) yang diperoleh dikurangkan dengan total presipitasi yang dihasilkan oleh penambahan NH₄OH. Hal ini dilakukan untuk menentukan jumlah endapan yang dihasilkan. Prosedur ini sangat penting untuk memastikan jumlah

Fe_2O_3 yang terkumpul. Dalam perhitungan senyawa potensial, seperti C_3A , nilai yang sering digunakan untuk Al_2O_3 adalah angka ini.

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:

Komponen C_3A tidak ada dalam semen dengan komposisi ini karena tidak disertakan dalam formulasi. Hal ini terjadi sebagai akibat dari eliminasi. Perhitungan C_2S tetap menggunakan rumus ini, yang dapat diartikulasikan sebagai berikut: Perhitungan untuk semua senyawa yang mungkin didasarkan pada pemeriksaan oksidanya, yang dinilai seakurat mungkin sekitar 0,1%. Perhitungan oksidanya didasarkan pada asumsi bahwa oksidanya sekitar 0,1% seakurat mungkin. Setelah dilakukan penilaian secara menyeluruh, telah ditetapkan bahwa semua hasil komputasi berada dalam satu persen dari akurasi maksimum yang dapat dicapai saat ini. Kesimpulan ini diperoleh setelah melalui pertimbangan yang ekstensif.

- b) Apabila kriterianya adalah panas hidrasi, seperti yang ditentukan dalam tabel kebutuhan fisik tambahan (Tabel 2.5), maka kriteria kimiawi ini tidak berlaku dengan konteks.
- c) Jika pemuaian dibutuhkan oleh sulfat, seperti yang ditunjukkan dalam tabel kebutuhan fisik tambahan (**Tabel 4**), maka kebutuhan kimiawi ini tidak relevan dengan skenario. Situasi tersebut tidak memenuhi kriteria kimiawi dalam hal ini.
- 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) Persyaratan kimia tambahan ini hanya relevan dalam situasi di mana kebutuhannya jelas.
- b) Informasi yang sama dengan yang disajikan untuk ^{b)} dalam persyaratan kimiawi esensial.
- c) Aturan ini berlaku secara eksklusif untuk situasi di mana semen digunakan pada beton yang mengandung agregat yang cenderung bereaksi dengan alkali.

Tabel 5 menunjukkan bahwa standar fisik semen Portland harus dipenuhi agar dapat diterima.

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:	160	160	160	160	160
	Turbidiet er,	280	280	280	280	280
	min Blaine, min					
2	Kekekalan :					
	Pemuiaan 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	240	-	80
	Umur 7 hari, kg/cm ² , minimum	200	70 ^{a)}	-	7	150
	Umur 28 hari, kg/cm ² , minimum	280	175	-	0	210
			120 ^{a)}	-	170	
			-	-		
4	Waktu pengikatan (metode alternatif) dengan alat: Gillmore					
	Awal, menit, minimal	60	60	60	60	60
	Akhir, menit maksimum Vicat	600	600	600	600	600
	- Awal, menit, minimal	45	45	45	45	45
	- Akhir, menit, maksimum	375	375	375	375	375

CATATAN

- a) Jika kebutuhan panas hidrasi, seperti yang diuraikan dalam tabel persyaratan fisik tambahan, atau persyaratan C₃S + C₃A, seperti yang ditentukan dalam tabel persyaratan kimia tambahan diperlukan, maka persyaratan kuat tekan ini dapat diterapkan. Kriteria untuk persyaratan ini dirinci dalam **Tabel 6**, yang disajikan di bawah ini.

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	-	70	-	60	-
	Umur 28 hari, kal/gram, maks	-	b)	-	70	-
			-			
3	Kuat tekan:					
	Umur 28 hari, kg/cm ² , minimum	-	280	-	-	-
4	Pemuaiian karena sulfat 14 hari, %, maksimum	-	220 ^{b)}	-	-	0,040
5	Kandungan udara mortar, % volume, maksimum	12	12	12	12	12

Berdasarkan SNI 15-2049-2004, terdapat berbagai jenis semen Portland dan cara penggunaannya yang spesifik, yaitu:

- a. Semen jenis I, tidak seperti jenis semen lainnya, dirancang untuk penggunaan umum dan tidak perlu memenuhi spesifikasi khusus. Hal ini penting untuk dipertimbangkan karena penerapannya yang luas.
- b. Semen jenis II adalah semen portland yang harus menjalani proses awal hidrasi ringan atau ketahanan sulfat sebelum diaplikasikan. Ini adalah prasyarat untuk aksesibilitasnya
- c. Semen jenis III adalah semen portland yang dalam penggunaannya penting untuk mencapai tingkat kekuatan yang tinggi segera sebelum proses pengikatan dimulai.
- d. Semen jenis IV adalah semen portland dengan jenis semen yang dicirikan oleh panas hidrasi yang rendah.
- e. Semen jenis V adalah semen portland yang memerlukan ketahanan yang signifikan terhadap sulfat (SNI 15-2049-2004).

2.2.2 Agregat Halus

Berdasarkan SK SNI T-15-1991-03, agregat didefinisikan sebagai bahan butiran yang digunakan bersama dengan cairan pengikat untuk membuat mortar atau beton semen hidrolik atau campurannya. Konsep ini didasarkan pada pemanfaatan agregat dalam formulasi mortar. Contoh agregat termasuk pasir, kerikil, batu pecah, dan terak tungku besi. Agar agregat halus diklasifikasikan sebagai agregat

berkualitas tinggi, agregat tersebut harus bebas dari zat organik, lempung, atau partikel yang lebih kecil dari ayakan no. 100. *American Society for Testing and Materials* (ASTM) telah menetapkan standar untuk analisis ayakan, yang menetapkan bahwa variasi ukuran dalam satu kombinasi harus menunjukkan gradasi yang sesuai.

Pasir dapat dibedakan menjadi tiga jenis, sesuai dengan klasifikasi (Tjokrodimulyo 1992)

- a. Pasir tambang dapat diperoleh melalui dua metode: baik dengan cara menggali dari bawah atau dengan mengekstraknya langsung dari permukaan tanah. Kedua strategi tersebut merupakan alternatif yang layak. Peluang ada dalam kedua metodologi tersebut. Bentuk pasir yang spesifik ini dicirikan oleh fitur-fiturnya yang bersudut, tajam, dan berpori, serta tidak mengandung komponen garam.
- b. Pasir dasar sungai diperoleh langsung dari dasar sungai, dan karena adanya gesekan dalam erosi dasar sungai, pasir ini sering kali berbutir halus dan berbentuk bulat. Adanya kondisi ini mengurangi daya rekat antar butiran. Pasir sangat disarankan untuk plesteran dinding, dan penggunaannya sangat dianjurkan.
- c. Pasir yang berasal dari lautan yang dikumpulkan dari pantai; butirannya sangat kecil dan berbentuk bulat karena gesekan yang terjadi selama proses. Hal ini dapat dicapai dengan memanfaatkan konsentrasi garam yang tinggi, yang memiliki kemampuan untuk mengekstraksi uap air dari udara di sekitarnya. Penggunaan pasir yang berasal dari laut bukanlah sumber daya yang paling efisien untuk keperluan konstruksi.

Tabel 7 menunjukkan bahwa ada empat kategori yang dapat digunakan untuk mengklasifikasikan gradasi pasir, yaitu: pasir halus, pasir agak halus, pasir yang relatif kasar, dan pasir kasar.

Tabel 7 Gradasi Pasir

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

2.2.3 Air

Air merupakan komponen mortar yang paling penting dan paling murah di antara komponen-komponen lainnya. Air memfasilitasi pencampuran agregat

dengan bahan pengikat dan meningkatkan kemampuan kerja beton dengan berfungsi sebagai agen hidrasi semen dan pelumas di antara partikel-partikel agregat (Veliyati, 2010). Hal ini memungkinkan air untuk membantu kedua proses tersebut. Dalam campuran mortar, air yang diperbolehkan adalah air yang bila digunakan akan menghasilkan mortar dengan kekuatan di atas 90 persen dari kekuatan mortar yang dibuat dengan air suling (ACI 318-83). Ini adalah definisi potensial dari air. SNI 03-2847-2002 menetapkan bahwa air yang diperuntukkan untuk digunakan dalam pencampuran mortar tidak dapat diminum dan tidak boleh digunakan ke dalam formulasi mortar. Usulan ini tidak konsisten dengan pernyataan sebelumnya. Sangatlah penting untuk memastikan proporsi komposisi mortar berdasarkan formulasi mortar yang menggunakan air dari sumber yang sama, dengan kisaran pH 4,5 hingga 7, dan tanpa kotoran. Selain itu, air tidak boleh digunakan dalam campuran mortar selama prosedur berlangsung.

Sangat penting untuk menggunakan air bersih dan layak minum untuk pencampuran mortar. Air ini harus bebas dari minyak, asam, alkali, senyawa organik, dan bahan kimia berbahaya lainnya, serta elemen atau komponen lain yang berpotensi merusak mortar atau logam di dalam dinding, seperti yang diatur dalam SNI 03-6882-2002.

2.2.4 Bahan Tambah

Tjokrodimuljo (1992) mendefinisikan bahan tambahan sebagai bahan yang ditambahkan ke dalam campuran beton sebelum, sesaat setelah, atau selama proses pencampuran. Zat aditif dapat dimasukkan pada setiap tahap proses pencampuran. Beton terdiri dari tiga unsur utama: air, semen, dan agregat. Elemen-elemen ini bukanlah konstituen utama beton. Penggabungan bahan aditif ini bertujuan untuk mengubah satu atau beberapa fitur dari beton, yang mungkin terjadi baik pada saat beton masih baru maupun setelah mengeras. Bahan tambahan diberikan dalam jumlah minimal dan di bawah pengawasan yang ketat untuk mencegah jumlah yang berlebihan yang dapat mengganggu kualitas beton. Hal ini dilakukan untuk menjamin bahwa bahan aditif tidak diberikan secara berlebihan. Tingkat hidrasi beton, kemampuan kerja, dan impermeabilitas adalah kualitas yang dapat berfluktuasi karena proses konstruksi beton. Kualitas lain yang dapat berubah termasuk kemampuan kerja beton.

Menurut SNI 03-6882-2002, penambahan bahan tambahan apapun pada mortar dilarang. Hal ini mencakup, tetapi tidak terbatas pada, zat pewarna, zat pembentuk, gelembung udara, pemercepat atau penghambat reaksi, anti air, dan zat aditif tambahan. Satu pengecualian untuk aturan ini terjadi ketika persyaratan dinyatakan secara eksplisit. Kalsium klorida dapat digunakan sebagai akselerator pengerasan dengan konsentrasi maksimum 2% relatif terhadap berat semen Portland atau 1% relatif terhadap berat mortar, atau persentase gabungan dari keduanya yang ada dalam mortar yang dievaluasi. Ini adalah jumlah maksimum yang dapat digunakan. Prasyarat untuk kelayakan adalah bahwa dokumentasi kontrak harus menggambarkan komponen kalsium klorida dengan benar. Jika kalsium klorida

diizinkan untuk digunakan, maka harus dikelola dengan sangat hati-hati, karena senyawa ini dapat merusak logam dan bahan penutup dinding tertentu.

Menurut ASTM C 494, bahan kimia aditif dibagi menjadi beberapa kategori sebagai berikut:

- a. Jenis A – Pengurang Air (*Water reducer*)
- b. Jenis B – Memperlambat pengikatan (*Retarder*)
- c. Jenis C – Mempercepat pengikatan (*Accelerator*)
- d. Jenis D – Kombinasi A dan B (*Water Reducer & Retarder*)
- e. Jenis E – Kombinasi A dan C (*Water Reducer & Accelerator*)
- f. Jenis F – Superplasticizer (*Water Reducer & High Range*)
- g. Jenis G – *Water Reducer & High Range & Retarder*

Selain itu, terdapat juga aditif yang berfungsi untuk:

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

2.3 Terak Nikel

Peleburan logam menghasilkan terak, produk sampingan yang dihasilkan selama proses tersebut. Istilah “terak” menunjukkan produk limbah atau bahan berlebih yang bermanifestasi sebagai gumpalan yang menyerupai logam. Kualitasnya sangat rendah karena bercampur dengan komponen lain yang sulit dibedakan. Mustika (2015) menyatakan bahwa terak terbentuk dari penggabungan mineral silika, kalium, dan soda selama peleburan logam atau dari peleburan mineral-mineral tersebut dari wadah peleburan karena suhu yang tinggi.

Terak nikel terdiri dari banyak bahan kimia, termasuk SO_3 , MgO , CaO , Cr_2O_3 , FeO , SiO_2 dan Al_2O_3 . Komposisi kimia terak nikel ditentukan dengan menggunakan *Energy Dispersion Spectroscopy* (EDS), seperti yang dilaporkan oleh Sujiono dkk. (2015). Temuan dari investigasi ini ditampilkan pada **Tabel 8**.

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

2.3.1 Proses Terjadinya Terak Nikel

Ekstraksi nikel dari bijih laterit menggunakan salah satu metode metalurgi berikut ini: (a) *hidrometalurgi*, (b) *vapormetalurgi*, dan (c) *pirometalurgi* (Permadi, 1988). Teknik tambahan meliputi pirometalurgi. Terak nikel adalah produk sampingan yang berasal dari operasi penambangan dan pengolahan nikel. Hal ini diilustrasikan pada **Gambar 1** (Sugiri, 2005), ini adalah hasil yang dihasilkan dari pengolahan nikel:

- a. Proses penambangan

Kegiatan ini meliputi eksplorasi lokasi penambangan dan ekstraksi bijih laterit mentah dari lokasi tersebut. Setelah material diproses melalui

ayakan dengan ukuran tertentu, material tersebut kemudian dipindahkan ke tempat penimbunan bijih laterit basah.

b. Proses pengeringan dan pengayakan

Pada tahap ini kedua proses ini bertujuan untuk mengurangi kandungan air dalam bijih laterit dan menghasilkan material yang homogen dalam ukuran, sehingga memudahkan proses pengolahan selanjutnya. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan proses pengolahan bijih laterit.

c. Proses reduksi dan sulfidasi

Penyelesaian tahap reduksi, yang merupakan prasyarat untuk proses peleburan di dalam tanur listrik, mengharuskan penggunaan tanur putar reduksi. Tahap reduksi merupakan prasyarat untuk proses peleburan.

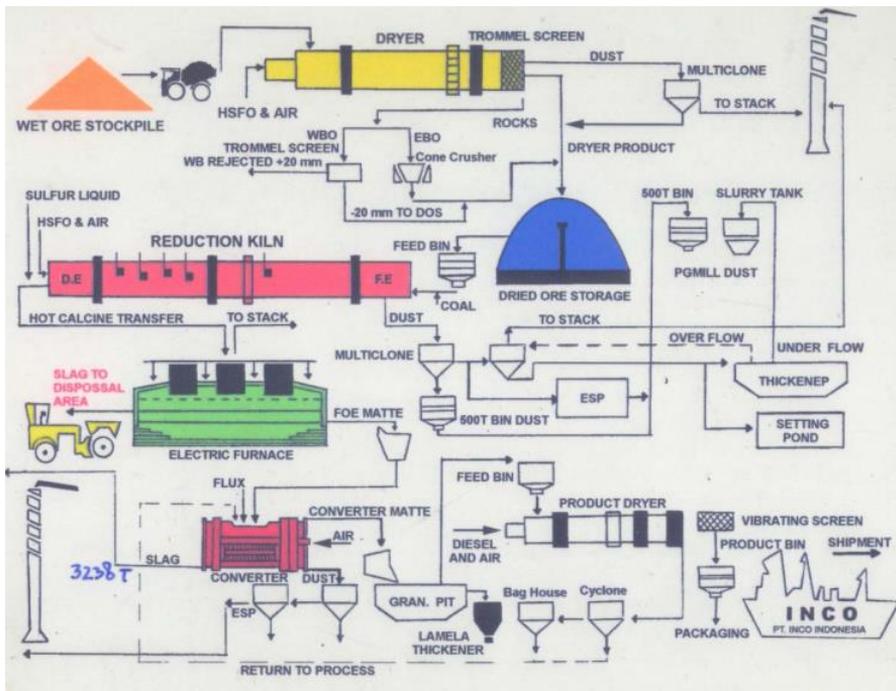
d. Proses peleburan

Tahap ini terjadi setelah selesainya proses reduksi. Langkah selanjutnya adalah menempatkan kalsin ke dalam tungku listrik dan memanaskannya hingga mencair sepenuhnya. Tahap ini berujung pada penciptaan terak nikel, yang kemudian dikumpulkan dan dibuang ke area yang telah dialokasikan untuk penyimpanan residu terak setelah proses reduksi selesai.

e. Proses pemurnian di konverter

Tahap pemurnian menghasilkan terak, yang dapat dikategorikan ke dalam dua jenis utama, yaitu:

- a. Terak dengan konsentrasi nikel di bawah 2% diklasifikasikan sebagai terak nikel rendah, yang tidak perlu diolah lebih lanjut atau dibuang. Kedua pilihan tersebut dapat dilakukan.
- b. Terak yang mengandung konsentrasi nikel di atas 2% diklasifikasikan sebagai terak nikel tinggi. Kadar nikel yang tinggi pada terak ini mengharuskan adanya daur ulang selama proses pemurnian konverter.



Gambar 1 Proses pembuatan nikel dan terjadinya terak nikel

2.3.2 Terak Nikel *Angular*

Slag nikel angular merupakan salah satu jenis limbah dari proses industri yang dihasilkan setelah peleburan bijih nikel melalui tahap pembakaran dan penyaringan. Awalnya, slag ini berbentuk padatan yang didinginkan selama 3 hingga 6 bulan. Setelah itu, slag tersebut dikumpulkan dan dimasukkan ke dalam mesin jaw crusher untuk mencapai ukuran tertentu.

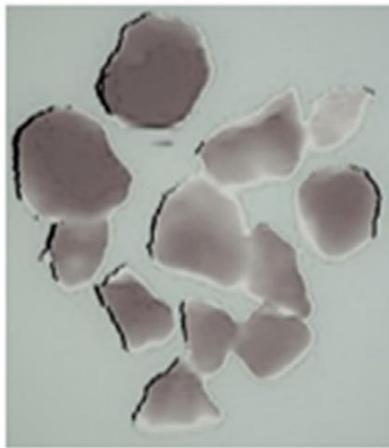


Gambar 2 Terak Nikel *Angular*

Penggunaan terak nikel *Angular* dalam campuran memberikan sejumlah keuntungan, antara lain sebagai berikut:

- a. Terak nikel memiliki kemampuan untuk meningkatkan ketahanan abrasi karena kepadatan yang sangat baik yang dimilikinya.
- b. Dalam proses konstruksi, dimungkinkan untuk mengurangi jumlah air dan semen yang digunakan, yang akan mengarah pada pengurangan biaya konstruksi secara keseluruhan serta peningkatan daya tahan struktur.

Adapun juga kekurangan dari penggunaan terak nikel *Angular* dimana dikaitkan dengan batasan-batasan tertentu yang harus dipertimbangkan. Bentuknya yang tidak beraturan dapat menurunkan nilai *slump*, sehingga mempengaruhi efisiensi pemrosesan.



(a) Angular

Gambar 3 Bentuk terak nikel *angular* diamati dengan pemindahan laser

2.3.3 Terak Nikel *Spherical*

Jenis terak yang paling banyak ditemukan di banyak konteks aplikasi adalah yang berbentuk sudut. Variasi terak ini dianggap sebagai yang paling umum. Sistem produksi yang baru-baru ini dibangun telah ditingkatkan untuk memasukkan penyesuaian pada metode pendinginan. Modifikasi ini baru-baru ini diintegrasikan ke dalam sistem yang ada saat ini. Pelaksanaan strategi ini terjadi di era modern. Dengan diterapkannya penyesuaian ini, penghancuran material untuk mencapai konsistensi terak yang lebih halus tidak lagi diperlukan. Terak cair pertama-tama ditempatkan di area berpendingin udara, diikuti dengan injeksi udara bertekanan tinggi untuk menyelesaikan proses pendinginan. Metode ini digunakan untuk mencapai hasil yang diinginkan. Terak mengalami pendinginan yang cepat, menghasilkan transformasi menjadi partikel-partikel halus berbentuk bola. Roy dkk. (2018) menyatakan bahwa terak yang baru dihasilkan berbeda dari terak sudut konvensional yang sebelumnya digunakan.

Jenis terak yang dikenal sebagai terak nikel spherical dibedakan berdasarkan karakteristik partikel bulat, sebagaimana diilustrasikan dalam **Gambar 4**. Proses dimulai dengan memasukkan terak cair ke dalam tungku, di mana pendinginan berlangsung untuk menghasilkan terak nikel dalam bentuk butiran. Prosedur ini bertujuan untuk memperoleh produk yang sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Penerapan hembusan udara bertekanan tinggi berfungsi untuk memfasilitasi proses tersebut.



Gambar 4 Terak nikel *spherical*

Penggabungan terak nikel bulat ke dalam campuran menghasilkan beberapa keuntungan, termasuk yang berikut ini:

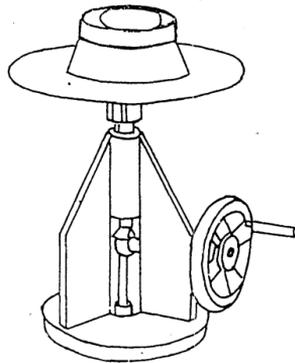
- a. Pengurangan volume air dan semen yang digunakan dalam konstruksi secara signifikan dapat dicapai, sehingga menghasilkan penghematan biaya dan meningkatkan daya tahan proyek.
- b. Terak nikel dibedakan dari bahan lain karena kepadatannya yang tinggi, yang mengarah pada peningkatan ketahanan abrasi dibandingkan dengan bahan alternatif.

Beberapa keterbatasan yang terkait dengan penggunaan terak bulat dalam kombinasi harus dipertimbangkan. Konsentrasi terak nikel granular yang sangat tinggi dapat menyebabkan segregasi dan pendarahan, yang keduanya dapat mempengaruhi karakteristik mekanik material komposit. Kedua prosedur tersebut memiliki kapasitas untuk mempengaruhi kekuatan dan daya tahan material. Masalah pendarahan dapat diatasi dengan meningkatkan viskositas pasta semen melalui penggabungan bahan tambahan seperti asap silika. Hal ini akan memberikan solusi untuk masalah tersebut. Perubahan karakteristik mekanis beton dengan agregat terak bulat belum diselidiki secara menyeluruh. Meskipun ada potensi untuk perbaikan, masalah *bleeding* tetap ada.

2.4 Sifat Mortar Segar

2.4.1 Pengujian Meja Sebar (*Flow Table*)

Pengukuran workabilitas pada mortar dilakukan dengan metode pemeriksaan meja sebar (*flow table*), sesuai dengan ASTM C124-39, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 5**. Uji ini mengukur konsistensi mortar dengan menilai tingkat penyebaran campuran setelah menerima 15 kali sentakan dalam waktu 15 detik. Nilai fluiditas didefinisikan sebagai selisih antara diameter penyebaran mortar segar (D dalam cm) dan diameter awalnya, yaitu 10 cm.



Gambar 5 Meja sebar (SNI 03-6825-2002)

Flow mortar adalah jenis mortar yang memiliki kemampuan untuk mengalir dan memadat dengan sendirinya. Dengan menambahkan rasio slag granulasi ke dalam mortar, nilai mortar dapat meningkat tanpa perlu mengubah atau menambah komposisi rasio air dan semen.

2.5 Kuat Tekan Mortar

Menurut SNI 03-6825-2002, kekuatan tekan mortar semen portland didefinisikan sebagai gaya maksimum per satuan luas yang diterapkan pada benda uji mortar berbentuk kubus dengan ukuran dan umur tertentu. Gaya maksimum ini merupakan gaya yang terjadi saat benda uji kubus mengalami keruntuhan.

Kekuatan tekan mortar dapat ditentukan dengan membagi beban tekan maksimum yang diberikan pada spesimen uji dengan luas penampang luar mortar. Sehingga akan memberikan kekuatan tekan mortar.

Berdasarkan standar pengujian ASTM C 1329 – 04, kekuatan tekan minimum mortar pada umur 28 hari harus mencapai 20 MPa. Beberapa faktor yang sangat mempengaruhi kekuatan tekan mortar antara lain adalah rasio air terhadap semen, jumlah semen yang digunakan, umur mortar, dan sifat agregat yang digunakan.

a. Faktor air semen

Rasio air-semen (f) dapat diketahui dengan menentukan rasio berat air terhadap berat semen dalam campuran mortar atau beton. Rasio ini dikenal sebagai rasio air-semen. Telah diketahui secara luas bahwa kualitas

kekuatan mortar atau beton menurun seiring dengan meningkatnya nilai fas. Ini adalah situasi yang terjadi; namun, ada banyak pengecualian untuk aturan ini. Penurunan nilai f.a.s tidak secara inheren menandakan peningkatan kekuatan mortar atau beton. Nilai f.a.s tidak mengukur tegangan. Nilai f.a.s yang rendah akan mengakibatkan kesulitan dalam pekerjaan, terutama dalam mencapai pematatan, yang pada akhirnya akan mengurangi kualitas mortar atau beton pada akhir prosedur. Tri Mulyono (2004) menyatakan bahwa nilai f.a.s yang diberikan umumnya mendekati 0,4, sedangkan nilai potensial maksimum adalah 0,65 dalam banyak kasus. Rasio air-semen yang digunakan dalam formulasi mortar adalah 0,485, seperti yang ditentukan oleh standar ASTM C 109M.

b. Jumlah semen

Ketika persentase semen dalam mortar sama, tidak secara otomatis mortar dengan kandungan semen yang lebih besar akan menunjukkan kekuatan yang lebih tinggi. Variabilitas dalam kandungan semen mortar dapat menjadi penyebabnya. Hal ini dikarenakan mortar dengan kandungan semen yang lebih rendah memiliki volume pori yang lebih tinggi dibandingkan dengan mortar dengan kandungan air yang lebih tinggi. Pasta dengan kadar air yang tinggi bertanggung jawab atas peningkatan kadar pori pada mortar. Keberadaan pori-pori ini mengakibatkan berkurangnya kekuatan mortar dibandingkan dengan kekuatan potensialnya. Jumlah semen yang optimal untuk digunakan dalam mortar adalah angka tertentu. Hal ini memberikan kekuatan tekan yang signifikan pada mortar.

c. Umur mortar

Setelah durasi 28 hari, mortar akan mencapai kekuatan yang diperlukan. Pematangan mortar akan menyebabkan peningkatan kekuatannya, yang pada akhirnya mencapai potensi maksimumnya.

d. Sifat agregat

Sifat-sifat agregat, termasuk bentuk, tekstur permukaan, kepadatan, dan ukuran partikel maksimum, semuanya mempengaruhi kekuatannya. Konfigurasi agregat akan mempengaruhi perilaku saling mengunci agregat.

2.6 Dampak Lingkungan

Produksi mortar memerlukan berbagai sumber daya alam, seperti pasir, air, dan semen. Proses pembuatan mortar dapat menyebabkan pelepasan gas rumah kaca serta polutan, yang berdampak buruk bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Pada tahap awal produksi, kegiatan penggalian bahan mentah dapat mengganggu keseimbangan ekosistem setempat dan mengurangi daya lekat antar material, yang berpotensi menurunkan kekuatan tanah. Selain itu, penggunaan sumber daya alam yang berlebihan dalam pembuatan mortar dapat mengancam keberlanjutan lingkungan.

Selama proses pencampuran, pengangkutan, dan pengecoran, emisi gas polutan seperti karbon monoksida, nitrogen oksida, dan gas lain yang dihasilkan dari

pembakaran bahan bakar dapat mengakibatkan polusi udara, yang merugikan kesehatan masyarakat dan lingkungan sekitar. Penggunaan air dalam produksi mortar juga memunculkan isu lingkungan, termasuk penurunan kualitas air dan kerusakan habitat akuatik. Sebagian besar air digunakan untuk mencampurkan bahan mentah menjadi mortar, dan setelah proses tersebut, air limbah harus dibuang ke badan air dengan mempertimbangkan risiko pencemaran dan sisa bahan kimia.

Namun, terdapat inisiatif untuk mengurangi dampak lingkungan melalui praktik produksi mortar yang berkelanjutan, seperti memanfaatkan limbah terak nikel sebagai alternatif.

Parameter keberlanjutan yang digunakan untuk menganalisis dampak lingkungan meliputi Global Warming Potential (GWP), Acidification Potential (AP), dan Eutrophication Potential (EP). GWP mengukur potensi produksi gas rumah kaca, yang berasal dari emisi karbon dioksida dan metana. Gas-gas ini dapat menyebabkan peningkatan suhu global, yang berdampak negatif pada keseimbangan ekosistem, kesehatan manusia, dan kesejahteraan material. Perubahan iklim merupakan akibat dari fluktuasi suhu global yang disebabkan oleh efek rumah kaca.

AP berkaitan dengan deposisi polutan asam pada tanah, air, organisme, ekosistem, serta bahan-bahan seperti sulfur dan nitrogen. Gas asam, seperti sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NO_x), yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar, dapat bereaksi dengan air di tanah atau atmosfer dan membentuk hujan asam. Asam ini dapat menghasilkan ion hidrogen (H^+), yang bersifat sangat reaktif dan dapat merusak ekosistem serta mengikis bahan.

Parameter Eutrophication Potential (EP) mengindikasikan dampak dari tingginya konsentrasi makronutrien, seperti fosfor dan nitrogen, di lingkungan. Kadar yang tinggi ini dapat menyebabkan pertumbuhan biomassa yang berlebihan di ekosistem akuatik dan darat. Contohnya, polusi udara dan limbah air berkontribusi terhadap fenomena tersebut. Meskipun nitrat dan fosfat memiliki peranan penting bagi kehidupan, peningkatan konsentrasi mereka dalam air dapat mengakibatkan eutrofikasi—suatu kondisi di mana kelebihan nutrisi mendorong pertumbuhan alga yang berlebihan, yang pada gilirannya menurunkan kadar oksigen dalam air dan merusak ekosistem. Walach et al. (2019) menggunakan persamaan berikut untuk memperkirakan nilai dari parameter dampak lingkungan ini:

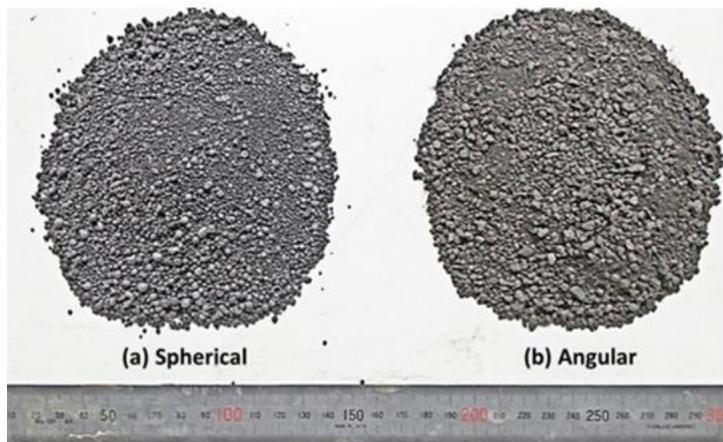
$$E = \sum_{i=1}^n I_i \cdot w_i \quad (1)$$

Penting untuk mengevaluasi kelayakan penggunaan limbah terak nikel dengan mempertimbangkan lebih dari satu parameter tunggal, seperti sekadar jumlah limbah terak nikel atau kekuatan tekan. Penilaian kelayakan sebaiknya melibatkan analisis dua faktor secara bersamaan. Beberapa penelitian telah mempertimbangkan simultan antara kekuatan tekan dan emisi CO_2 yang dihasilkan oleh proses tersebut (Vembu dan Ammasi, 2023). Penelitian ini menyajikan beberapa faktor simultan yang mencakup kuat tekan serta parameter lingkungan, seperti Global Warming Potential (GWP), Acidification Potential (AP), dan Eutrophication Potential (EP), sesuai dengan persamaan berikut:

$$P_{i-fc} = \frac{f'c}{\text{total } i_{\text{mix}}} \quad (2)$$

2.7 Penelitian Terdahulu

Penelitian yang dilakukan oleh Roy, Sushanta, dan rekannya (2018) menginvestigasi pemanfaatan terak agregat halus hasil oksidasi Electric Arc Furnace dalam bentuk bola di dalam beton. Penelitian ini menggunakan agregat terak EAF dengan teknologi terbaru yang sudah mapan. Terak cair dimasukkan ke dalam zona berpendingin udara, diikuti dengan injeksi udara bertekanan tinggi untuk memfasilitasi pendinginan. Hal ini dilakukan untuk menghasilkan terak EAF dengan konsistensi yang lebih halus. Hasilnya, terak EAF mendingin dengan cepat, menghasilkan bentuk bulat yang ditandai dengan adanya partikel-partikel kecil, seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 6**.



Gambar 6 Slag EAF

Temuan penelitian menunjukkan bahwa kepadatan terak EAF berbentuk bola adalah 3,60 g/cc, melampaui kepadatan pasir alam (2,55 g/cc), kerikil (2,60 g/cc), dan semen (3,15 g/cc). Kepadatan terak EAF yang berbentuk bola diukur, yang menjelaskan situasi ini.

Sifat mekanik beton ditingkatkan dengan menggunakan terak dari tungku busur listrik berbentuk slag EAF (Electric Arc Furnace). Penggunaan agregat terak EAF berbentuk bola pada perkerasan beton merupakan metode yang sangat membantu dan sesuai. Hal ini secara signifikan mengurangi kebutuhan untuk menggabungkan air dan semen, dengan tetap mempertahankan sifat mekanis material secara utuh. Beton terak EAF berbentuk bola menunjukkan peningkatan daya tahan, yang dibuktikan dengan berkurangnya penyusutan, penyerapan air, dan permeabilitas udara.

Peneliti Saha AK dan Sarker PK (2016) melakukan penelitian dengan menggunakan terak feronikel (FNS) sebagai agregat halus untuk menggantikan lima puluh persen dan seratus persen pasir alami pada beton (**Gambar 7**). Temuan dari

penelitian ini diilustrasikan melalui grafik. Gradasi agregat halus dianalisis secara ekstensif dan menunjukkan bahwa agregat FNS terdiri dari partikel yang lebih besar dibandingkan dengan pasir.

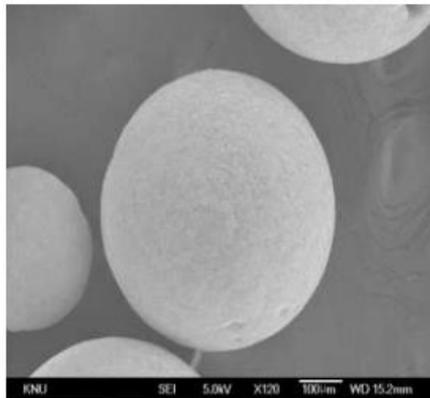


Gambar 7 (a) Agregat FNS; (b) Pasir

Untuk menilai kemampuan kerja mortar segar, pengujian *flow* dilakukan pada pasir, FNS, dan kombinasinya dengan kerucut aliran pasir. Hal ini dilakukan untuk menilai kemampuan kerja mortar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai *flow* maksimum dicapai dengan mengganti pasir dengan rasio lima puluh persen. Partikel-partikel FNS lebih kasar dibandingkan dengan pasir, sehingga membutuhkan lebih sedikit air untuk menjenuhkan FNS. Hal ini disebabkan oleh pembagian partikel pasir yang lebih halus. Penurunan aliran terjadi karena bertambahnya sudut bentuk partikel dalam campuran, yang teramati ketika kandungan FNS melebihi lima puluh persen. Terdapat korelasi yang signifikan antara gradasi agregat halus dalam campuran dan kemampuan kerja mortar. Hubungan ini sangat penting. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 3, 7, 28, dan 56 hari. Kuat tekan maksimum dicapai pada variasi lima puluh persen, sedangkan kuat tekan berkurang dengan penambahan lebih dari lima puluh persen FNS. Pengujian dilakukan pada umur 3, 7, dan 56 hari.

Hasil dari proyek penelitian tentang beton polimer, yang dilakukan oleh Jin-Man Kim (2013) dan menggunakan agregat halus terak baja bulat, diilustrasikan pada **Gambar 8**. Penelitian ini menunjukkan bahwa densitas terak baja bulat adalah 3,56 gram per sentimeter kubik. Kepadatan ini hampir 35 persen lebih besar dari agregat yang digunakan dalam penelitian tersebut. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa slag memiliki nilai massa volume satuan yang sangat tinggi. Untuk melakukan percobaan ini, beton polimer pada awalnya disegmentasi menjadi dua seri, diikuti dengan penggabungan terak baja melingkar ke dalam beton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa uji slump menunjukkan bahwa beton polimer dengan slag baja bundar menunjukkan nilai slump yang lebih besar daripada beton polimer yang tidak memiliki slag baja bundar. Hal ini dapat dipastikan dari hasil penelitian ini. Kepadatan meningkat, terlihat dari benda uji dengan agregat halus silika yang menunjukkan kepadatan 2,25 g/cm³, sedangkan benda uji yang mengandung terak baja bulat menunjukkan kepadatan 2,45 g/cm³. Selain itu, penggunaan terak baja

bulat menunjukkan tidak adanya pemisahan agregat pada benda uji agregat halus yang terdiri dari terak baja bulat. Hal ini ditunjukkan dengan penggunaan terak baja bulat. Pengujian kuat tekan dilakukan pada beton polimer pada umur tiga, tujuh, dan dua puluh delapan hari. Temuan pengujian menunjukkan bahwa penyertaan slag baja bulat meningkatkan kekuatan tekan material. Selain itu, uji Vebe menunjukkan bahwa penggabungan terak baja bulat ke dalam beton polimer meningkatkan kemampuan kerja material. Hal ini ditunjukkan dengan peningkatan kemampuan kerja material. Oleh karena itu, dapat dilakukan pengurangan jumlah resin yang digunakan dengan tetap mempertahankan tingkat fluiditas yang sama dengan terak baja bulat. Meningkatkan kekuatan tekan dapat dicapai melalui eksperimen.



Gambar 8 Partikel slag baja bulat

Penelitian ini menyimpulkan bahwa ukuran butir yang berkurang menyebabkan berkurangnya porositas pada mortar, yang menghasilkan peningkatan kepadatan. Kepadatan mortar yang lebih tinggi menghasilkan daya serap yang lebih rendah. Temuan ini mengindikasikan bahwa terak dapat berfungsi sebagai pengganti semen, karena diklasifikasikan sebagai bahan pozzolan menurut ASTM-C 168.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dampak lingkungan dari penggantian pasir dalam campuran mortar dengan terak nikel sebagai bahan alternatif. Penelitian ini terutama difokuskan pada banyak variabel lingkungan utama. Metrik yang digunakan meliputi Potensi Pemanasan Global (GWP), Potensi Pengasaman (AP), dan Potensi Eutrofikasi (EP).

Penelitian yang dilakukan oleh Kennedy C. Onyelowe dan rekannya (2022) mengidentifikasi semen sebagai kontribusi utama terhadap potensi pemanasan global (GWP) campuran mortar. Emisi CO₂ dari produksi semen Portland cukup besar, mewakili lebih dari 90 persen dari total potensi pemanasan global komposit. Agregat halus dan kasar terdiri dari sejumlah kecil, mulai dari dua hingga enam persen dari keseluruhan emisi. Dalam upaya mengurangi emisi karbon dioksida dari campuran mortar, bahan pengganti yang lebih ramah lingkungan, seperti terak nikel

dalam bentuk bersudut (AS) dan berbentuk bola (SS), dapat digunakan sebagai alternatif sebagian dari semen atau agregat konvensional. Penggunaan kedua jenis terak nikel ini memungkinkan pengurangan Acidification Potential (AP) dan Eutrophication Potential (EP). Partikel terak yang berbentuk lebih bulat, seperti SS, memberikan keunggulan dalam hal dispersi material yang lebih merata, yang dapat menurunkan porositas dan meningkatkan kinerja mekanis. Sementara itu, kombinasi AS dan SS dalam campuran memberikan kontribusi yang optimal dalam mengurangi potensi dampak lingkungan sekaligus meningkatkan stabilitas dan kekuatan mortar. Penelitian ini menunjukkan bahwa baik terak bersudut maupun terak berbentuk bola dapat berperan penting sebagai bahan pengganti, yang menghasilkan beton yang lebih ramah lingkungan tanpa mengorbankan kekuatan tekan yang dibutuhkan.

Rasmus Eisted, Anna W. Larsen, dan Thomas H. Christensen (2009) melakukan investigasi terhadap emisi gas rumah kaca (GRK) yang dihasilkan dari proses pengumpulan, pemindahan, dan pengangkutan limbah. Studi ini mengevaluasi dampak pengelolaan sampah terhadap potensi pemanasan global (GWP), khususnya terkait penggunaan energi dan bahan bakar fosil dalam pengangkutan limbah sampah.

Penelitian ini berfokus pada pengumpulan, pemindahan, dan pengangkutan sampah, karena ketiga hal tersebut merupakan elemen penting dalam sistem pengelolaan sampah. Sejumlah besar energi, yang sebagian besar bersumber dari bahan bakar fosil, diperlukan untuk proses-proses ini, yang mengarah ke emisi gas rumah kaca yang cukup besar. Sumber utama dari emisi ini adalah penggunaan bahan bakar bensin oleh kendaraan pengangkut sampah dan fasilitas yang bertugas memindahkan limbah sampah.

Moda transportasi, jenis kendaraan, kapasitas kendaraan, dan jarak tempuh sangat berpengaruh terhadap emisi yang dihasilkan dari penanganan sampah. Volume emisi karbon dioksida yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk efisiensi bahan bakar dan jenisnya. Temuan penelitian menunjukkan bahwa potensi kontribusi pengangkutan sampah terhadap pemanasan global bervariasi dari 9,4 hingga 368 kg CO₂ ekuivalen per ton sampah, tergantung pada metode pengumpulan dan pengangkutan yang digunakan. Meningkatkan efisiensi transportasi jarak jauh, seperti kereta api atau perjalanan laut, adalah strategi yang dapat digunakan untuk mengurangi emisi.

Penelitian ini bertujuan untuk menekankan perlunya memahami dampak lingkungan dari sistem pengelolaan sampah, khususnya emisi gas rumah kaca dari kegiatan transportasi. Penelitian ini juga memberikan rekomendasi untuk mengurangi emisi melalui efisiensi jaringan pengangkutan limbah sampah.