

TUGAS AKHIR

**PERILAKU MEKANIK DAN KETAHANAN BETON BERBAHAN
PASIR SLAG NIKEL DAN *FLY ASH***

***MECHANICAL PROPERTIES AND DURABILITY OF CONCRETE
WITH SAND NICKEL SLAG AND FLY ASH***

**TEGUH PRIONO
D111 16 012**



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

LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR)

**PERILAKU MEKANIK DAN KETAHANAN BETON BERBAHAN PASIR SLAG
NIKEL DAN FLY ASH**

Disusun dan diajukan oleh:

TEGUH PRONO

D111 16 012

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 25 Mei 2021 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, ST, MT
NIP. 197206192000122001

Dr. M. Asad Abdurrahman, ST, M. Eng. PM
NIP. 197303061998021001

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng
Nip. 196805292002121002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Teguh Priono
NIM : D111 16 012
Program Studi : Teknik Sipil
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

Perilaku Mekanik dan Ketahanan Beton Berbahan Pasir Slag Nikel dan Fly Ash

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.

Makassar, 25 Mei 2021

Yang menyatakan,



(Teguh Priono)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kita panjatkan kehadirat Allah SWT, atas berkat rahmat dan petunjuk-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "**Perilaku Mekanik Dan Ketahanan Beton Berbahan Pasir Slag Nikel Dan Fly Ash**", sebagai salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Fakultas Teknik Departemen Teknik Sipil Universitas Hasanuddin. Tugas akhir ini disusun berdasarkan hasil penelitian di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa penyusunan Tugas Akhir ini tidak lepas dari bimbingan, petunjuk dan perhatian dari berbagai pihak sehingga dapat terselesaikan. Oleh karena itu, pada kesempatan kali ini, penulis mengucapkan 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.
3. **Ibu Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT.**, selaku dosen pembimbing I yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
4. **Bapak Ir. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc., Ph.D.**, selaku dosen pembimbing II, yang telah banyak meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan kepada penulis.
5. **Bapak Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, S.T., M.T.**, selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.
6. **Bapak Dr. Eng. Fakhrudin, ST., M.Eng.**, selaku dosen yang telah memberikan arahan, saran dan masukan kepada penulis.
7. Seluruh Dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
8. 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 dan terkasih, yaitu ayahanda **Amirullah** dan ibunda **Suhaemi** atas do'a, kasih sayangnya, pengorbanan dan segala dukungan selama ini, baik spritual maupun material.

2. Paman dan Tante yang tercinta dan terkasih, yaitu **Drs. Jasman Ali Nur** dan **Dra. Nur Asni** atas do'a dan segala dukungan selama ini, baik spritiual maupun material.
3. Saudara tercinta, Adinda, **Nur Fauziah, Nurul Amalia Kartika,** dan **Rehana** yang senantiasa memberikan dorongan dan menghibur penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
4. **Pak Syamsul Bahri dan Indrawansyah Fernanda Aras,** selaku partner dalam penelitian ini, yang senantiasa membantu, dan memberikan masukan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
5. Rekan-rekan **Pengurus HMS FT-UH Periode 2019** yang telah memberikan dorongan semangat selama periode kepengurusan.
6. **Awi, Yus, Mus, Rega, Fakhri, dan Dhede,** selaku sahabat yang selalu memberikan dorongan semangat, yang selalu ada dalam suka duka selama kuliah hingga saat ini.
7. **Sul, Indra, Uqbah, Mudhat, Imam, Uli, Erli, Anse dan Kak Meli,** selaku rekan-rekan di Laboratorium Riset Perkuatan yang selalu memberi dorongan dan masukan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
8. Rekan-rekan setim **Kanmoreu Champione** yang telah memberikan semangat dan juga prestasi yang luar biasa yang telah saya raih hingga saat ini.
9. **Saudara se-PATRON 2017,** yang senantiasa memberikan warna yang sangat begitu indah, dukungan yang tiada henti, semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
10. **Adik-adik Angkatan 2017 dan 2018,** yang telah membantu dalam penelitian ini hingga dapat menyelesaikan 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 Allah SWT melimpahkan rahmat dan karunia-Nya kepada kita dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

Gowa, 28 April 2021

Penulis

ABSTRAK

Isu *global warming* dan lingkungan menjadi tujuan utama untuk membatasi penggunaan semen maupun agregat alam dalam produksi mortar dan beton, penggunaan semen dan agregat alam secara berlebihan akan berdampak kepada lingkungan, sehinggannya diperlukan bahan yang ramah lingkungan sebagai komposisi pembentuk mortar dan beton, salah satunya yaitu penggunaan *fly ash* pengganti parsial semen dan pasir slag sebagai agregat halus.

Tujuan dari penelitian ini yaitu mengkaji penggunaan pasir slag dan fly ash sebagai material substitusi terhadap kekuatan mekanik beton dan mengevaluasi ketahanan beton terhadap penetrasi klorida dengan metode *sorptivity*. Fly ash berfungsi sebagai pengganti sebagian semen dan butiran slag nikel sebagai pengganti pasir alami.

Metode yang digunakan adalah studi eksperimental dengan variasi benda uji menggunakan pasir slag dan penambahan parsial *fly ash*. Pengujian yang dilakukan berupa pengujian mekanik beton yang terdiri dari pengujian kuat tekan, modulus elastisitas, kuat tarik belah, kuat lentur, dan pengujian sorptiviti beton.

Diperoleh hasil yang menunjukkan bahwa kekuatan mekanik beton yang tertinggi dari variasi OPC-GNS50 pada kedua fas (25% dan 45%). Hal ini membuktikan penggunaan parsial pasir slag dapat meningkatkan kekuatan mekanik dari beton itu sendiri, sedangkan penambahan variasi *fly ash* juga berkontribusi pada peningkatan kekuatan beton. Pengujian sorptiviti memberikan hasil yang relevan dengan kuat tekan, dimana beton OPC-GNS50 memiliki ketahanan yang baik terhadap penetrasi ion-ion agresif.

Kata Kunci: Slag Nikel, Fly Ash, Kekuatan Mekanik, dan Sorptiviti

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH.....	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK.....	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	x
BAB 1. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang Masalah	1
B. Rumusan Masalah.....	3
C. Maksud dan Tujuan Penelitian.....	3
D. Manfaat Masalah	4
E. Batasan Penelitian.....	4
F. Sistematika Penulisan	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
A. Pengertian Beton.....	7
B. Material Penyusun Beton.....	8
B.1. Semen Portland	8
B.2. Ageragat Kasar	10
B.3. Agregat Halus	11
B.4. Air	12
B.5. <i>Superplasticizer</i>	12
C. Material Subtitusi Beton.....	13
C.1. Terak Nikel.....	13
C.2. <i>Fly Ash</i>	15
D. Penelitian Terdahulu	19
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	23
A. Bagan Alir Penelitian	23
B. Waktu dan Lokasi Penelitian.....	24
C. Desain Benda Uji.....	24

D. Alat dan Bahan Penelitian	25
E. Prosedur Penelitian	26
E.1. Pengujian Karakteristik Agregat	26
E.2. Pembuatan Benda Uji	27
F. Pengujian	28
F.1. Kuat Tekan Beton.....	28
F.2. Modulus Elastisitas Beton.....	29
F.3. Kuat Tarik Beton.....	30
F.4. Kuat Lentur Beton.....	31
F.5. Sorptiviti Beton	32
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	34
A. Karakteristik Material dan Rancang Campuran Beton.....	34
A.1. Pengujian Karakteristik Agregat	34
A.2. Rancangan Campuran Beton (<i>Mix Design Concrete</i>).....	37
B. Hasil Pengujian Beton	38
B.1. <i>Slump</i>	38
B.2. Berat Volume Beton	39
B.3. Kuat Tekan Beton.....	40
B.4. Analisis Modulus Elastisitas	43
B.5. Kuat Tarik Belah Beton.....	47
B.6. Hubungan Kuat Tekan dengan Kuat Tarik Belah Beton	49
B.7. Kuat Lentur Beton	50
B.8. Hubungan Kuat Tekan dengan Kuat Lentur Beton	53
B.9. Sorptiviti	54
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	62
A. Kesimpulan.....	62
B. Saran.....	63
DAFTAR PUSTAKA	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Bagan Alir Penelitian	24
Gambar 2 (a) semen OPC; (b) fly ash kelas C; (c) slag nikel	26
Gambar 3 Perawatan Beton (<i>Curing</i>)	27
Gambar 4 Pengujian Kuat Tekan Beton	28
Gambar 5 Hubungan Tegangan – Regangan Beton (Nawy, 1998:46)	29
Gambar 6 Pengujian Kuat Tarik Beton	31
Gambar 7 Sketsa Pengujian Kuat Lentur	32
Gambar 8 Grafik Gabungan Pasir Alami dan Pasir Slag	35
Gambar 9 Grafik Penggabungan Chipping dan 100% Pasir Sungai	36
Gambar 10 Grafik Penggabungan Chipping, 50% Pasir Sungai, 50% Pasir Slag	37
Gambar 11 Grafik perbandingan Berat Volume Beton dengan FAS 45% dan FAS 25%.....	40
Gambar 12 Kuat Tekan Rata-rata Beton dengan FAS 45%	41
Gambar 13 Kuat Tekan Rata-rata Beton dengan FAS 25%	42
Gambar 14 Hubungan Tegangan dan Regangan beton OPC-Pasir dengan FAS 45%	43
Gambar 15 Hubungan Tegangan dan Regangan beton OPC-GNS50 dengan FAS 25%.....	44
Gambar 16 Modulus Elastisitas Beton FAS 45%.....	46
Gambar 17 Modulus Elastisitas Beton FAS 25%.....	47
Gambar 18 Diagram Perbandingan Variasi beton dengan FAS 45% dan 25%	49
Gambar 19 Pengujian Kuat Lentur Beton.....	50
Gambar 20 Nilai Kuat Lentur Beton.....	51
Gambar 21 Hubungan Beban dan Lendutan OPC-Pasir dengan FAS 45%	52
Gambar 22 Hubungan Beban dan Lendutan OPC-Pasir dengan FAS 25%	52
Gambar 23 Pengujian Sorptiviti.....	54
Gambar 24 <i>Initial Absorption</i>	55
Gambar 25 <i>Secondary Absorption</i>	55

Gambar 26 Hubungan akar waktu dan kumulatif penyerapan air persatuan luas FA15-GNS50 dengan FAS 25%.....	57
Gambar 27 Hubungan akar waktu dan kumulatif penyerapan air persatuan luas FA30-GNS50 dengan FAS 25%.....	57
Gambar 28 Hubungan akar waktu dan kumulatif penyerapan air persatuan luas OPC-GNS50 dengan FAS 25%	58
Gambar 29 Hubungan akar waktu dan kumulatif penyerapan air persatuan luas OPC-Pasir dengan FAS 25%	58
Gambar 30 Hubungan akar waktu dan kumulatif penyerapan air persatuan luas FA15-GNS50 dengan FAS 45%.....	59
Gambar 31 Hubungan akar waktu dan kumulatif penyerapan air persatuan luas FA30-GNS50 dengan FAS 45%.....	59
Gambar 32 Hubungan akar waktu dan kumulatif penyerapan air persatuan luas OPC-GNS50 dengan FAS 45%	60
Gambar 33 Hubungan akar waktu dan kumulatif penyerapan air persatuan luas OPC-Pasir dengan FAS 45%	60

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Penelitian Terdahulu	19
Tabel 2 Benda Uji	25
Tabel 3 Pemeriksaan agregat halus	27
Tabel 4 Pemeriksaan agregat kasar.....	27
Tabel 5 Hasil Pemeriksaan Karakteristik Agregat Halus (Pasir Sungai)	34
Tabel 6 Hasil Pemeriksaan Karakteristik Agregat Halus (Pasir Slag)	34
Tabel 7 Hasil Pemeriksaan Karakteristik Agregat Kasar (Batu Pecah)	36
Tabel 8 Komposisi Campuran Beton (kg/m ³) dengan FAS 45%	38
Tabel 9 Komposisi Campuran Beton (kg/m ³) dengan FAS 25%	38
Tabel 10 Hasil Pengukuran Nilai <i>Slump</i>	39
Tabel 11 Berat Isi Beton.....	39
Tabel 12 Kuat Tekan Beton dengan FAS 45%	41
Tabel 13 Kuat Tekan Beton dengan FAS 25%	42
Tabel 14 Rekapitulasi Nilai Tegangan dan Regangan Beton FAS 45% dan 25%	44
Tabel 15 Hasil Perhitungan Modulus Elastisitas Beton FAS 45%.....	45
Tabel 16 Hasil Perhitungan Modulus Elastisitas Beton FAS 25%.....	45
Tabel 17 Perbandingan Hasil Modulus Elastisitas dengan Rumus Teoritis untuk Beton FAS 45%	46
Tabel 18 Perbandingan Hasil Modulus Elastisitas dengan Rumus Teoritis Beton FAS 25%.....	46
Tabel 19 Kuat Tarik Belah Beton FAS 45%.....	48
Tabel 20 Kuat Tarik Belah Beton FAS 25%.....	48
Tabel 21 Persamaan Korelasi antar Kuat Tekan dan Kuat Tarik belah Beton ..	50
Tabel 22 Kuat Lentur (<i>Modulus of Rupture</i>) Beton	51
Tabel 23 Rekapitulasi Beban dan Lendutan Beton FAS 45% dan 25%	53
Tabel 24 Persamaan Korelasi antar Kuat Tekan dan Kuat Tarik belah Beton ..	53
Tabel 25 Hasil Pengujian Sorptiviti	54

BAB 1. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Masalah

Beton merupakan salah satu bahan bangunan yang paling luas penggunaannya. Bahan bangunan yang terbentuk dari campuran semen, agregat kasar, agregat halus dan air ini memiliki daya tarik yang cukup besar dalam penggunaannya. Bahan dasar pembuatan beton seperti agregat merupakan sumber daya yang mudah didapatkan dan banyak tersedia di alam dan pemeliharaannya yang mudah. Semakin pesatnya pertumbuhan pengetahuan di bidang konstruksi diperlukan suatu bahan bangunan sebagai bahan campuran beton yang memiliki keunggulan yang lebih baik dibandingkan bahan yang sudah ada selama ini. Selain itu bahan tersebut harus memiliki beberapa keuntungan seperti bentuk yang dapat menyesuaikan kebutuhan, biaya yang lebih ekonomis, kecepatan pelaksanaan konstruksi, serta ramah lingkungan.

Kebutuhan beton yang semakin tinggi, mendorong teknokrat beton untuk terus mengkaji peningkatan kinerja beton dengan memanfaatkan limbah industri seperti *fly ash*, *silica fume*, *blast-furnace slag* maupun limbah pertanian seperti abu sekam padi (*rice husk ash*) dalam produksi beton. Isu *global warming* dan lingkungan menjadi tujuan utama untuk membatasi penggunaan semen maupun agregat alam dalam produksi mortar dan beton. Menurut Malhotra, V.M., (2002), produksi satu ton semen membebaskan sekitar satu ton CO₂ ke atmosfer. Tahun 2016, produksi semen dunia menghasilkan sekitar 2,2 miliar ton CO₂, setara dengan kontribusi sekitar 8 % terhadap emisi gas karbon dioksida (CO₂) dunia, (Rodgers, L., 2018).

Indonesia hingga saat ini memiliki 17 juta ton slag nikel. Jumlah tersebut dihasilkan dari sejumlah smelter dalam negeri, antara lain PT Antam Tbk., PT MSP, IMIP Group, Vitue Dragon, dan PT Vale Indonesia. Namun hanya 10% saja yang telah dimanfaatkan untuk aplikasi konstruksi. Sedangkan hingga tahun 2022, ditargetkan akan ada 60 smelter dari Izin Usaha Pertambangan Operasi Produksi Khusus (Saefulhak Y, 2019). *The Daily Records Jakarta*, Indonesia juga saat ini berada di urutan ke lima terbesar dunia sebagai penghasil batu bara dengan perkiraan produksi 386 juta ton setiap tahun. PLTU diperkirakan sekitar 86% sebagai pengguna batu bara yang menghasilkan fly ash sebagai limbah hasil pembakaran.

Slag nikel adalah salah satu jenis sisa dari proses industri yaitu dari proses peleburan biji nikel setelah melalui proses pembakaran dan penyaringan. Dari Proses peleburan biji nikel tersebut menghasilkan limbah berupa slag yang jumlahnya sangat besar dan dapat berpotensi menimbulkan masalah lingkungan serta gangguan kesehatan pada masyarakat. Banyaknya limbah buangan yang berupa slag nikel kini harus ditangani atau dimanfaatkan dengan benar sehingga dapat bermanfaat bagi masyarakat.

Sebagai limbah buangan hasil pengolahan biji nikel, selama ini slag nikel hanya digunakan sebagai bahan timbunan oleh masyarakat yang dianggap sudah tidak memiliki manfaat lagi. Tetapi jika dilihat secara visual, bentuk fisik dari slag nikel menyerupai agregat baik yang halus menyerupai pasir dan kasar yang menyerupai kerikil, dimana dapat digunakan untuk bahan agregat dalam campuran beton.

Berdasarkan latar belakang tersebut di atas, maka penting dilakukan penelitian yang bersifat eksperimental yaitu **“PERILAKU MEKANIK DAN KETAHANAN BETON BERBAHAN PASIR SLAG NIKEL DAN FLY ASH”**.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka dapat dibuat rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perilaku mekanik beton (kuat tekan dan modulus elastisitas, kuat tarik belah dan kuat lentur) yang mengandung *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen dan butiran slag nikel sebagai pengganti pasir alami.
2. Bagaimana ketahanan beton yang mengandung *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen dan butiran slag nikel sebagai pengganti pasir alami dibandingkan dengan beton konvensional *dengan metode sorptivity*.

C. Maksud dan Tujuan Penelitian

1. Menganalisa perilaku mekanik beton (kuat tekan dan modulus elastisitas, kuat tarik belah dan kuat lentur) yang mengandung *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen dan butiran slag nikel sebagai pengganti pasir alami.
2. Mengevaluasi ketahanan beton yang mengandung *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen dan butiran slag nikel sebagai pengganti

pasir alami dibandingkan dengan beton konvensional terhadap penetrasi ion agresif *dengan metode sorptivity*.

D. Manfaat Masalah

Melalui penelitian ini diharapkan memberi sejumlah manfaat sebagai berikut:

1. Fly ash dan slag nikel merupakan limbah *by product* yang terus mengalami peningkatan kuantitas untuk memenuhi kebutuhan industri. Di saat yang sama, penggunaan semen dan eksplorasi pasir sungai sebagai bahan utama konstruksi berdampak pada kerusakan lingkungan. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberi solusi dalam upaya pencegahan kerusakan lingkungan dan khususnya industri beton menjadi acuan dalam perencanaan beton ramah lingkungan berbasis *fly ash* dan slag nikel.
2. Menjadi bahan referensi bagi peneliti selanjutnya dalam mengembangkan beton ramah lingkungan (*Green Concrete*) berbasis limbah *by product*.

E. Batasan Penelitian

Agar penelitian ini lebih terarah dan fokus pada tujuan penelitian yang ingin dicapai maka perlu dibuat batasan masalah sebagai berikut:

1. Butiran slag nikel yang digunakan merupakan limbah padat terak nikel (*Nickel Slag*) yang berasal dari industri peleburan biji nikel PT.Vale, Soroako, Sulawesi Selatan, Indonesia, sebagai pengganti sebagian pasir

- alami. Terak nikel merupakan peleburan *Electric Arc Furnace* (EAF) dengan pendinginan slag kategori *air cooled slag*.
2. Fly Ash kelas C sebagai pengganti sebagian semen berasal dari PLTU Punagaya, Jeneponto, Sulawesi Selatan, Indonesia.
 3. Menggunakan semen jenis OPC (Ordinary Portland Cement).
 4. Menggunakan air PDAM, pasir alami yang berasal dari sungai Lasape Pinrang dan batu pecah dari sungai Bili-Bili Gowa.
 5. Evaluasi kekuatan mekanik beton mengandung fly ash kelas C sebagai pengganti semen dan butiran slag nikel sebagai pengganti sebagian pasir alami berdasarkan faktor air semen 0.25 dan 0.45 pada umur 3, 7, dan 28 hari.

F. Sistematika Penulisan

Agar lebih terarah tulisan ini, sistematika penulisan tesis yang akan dilakukan sesuai tahapan-tahapan yang dipersyaratkan sehingga produk yang dihasilkan lebih sistematis sehingga susunan tesis ini dapat diurutkan yaitu :

BAB I PENDAHULUAN

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

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini, memberikan gambaran tentang teori beton, material utama penyusun beton, dan material substitusi beton dari penelitian ini.

BAB III METODE 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 IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini, disusun hasil-hasil pengujian diantaranya adalah hasil pemeriksaan karakteristik agregat, pengujian beton mulai dari pengujian *Slump*, berat volume beton, kuat tekan beton, modulus elastisitas beton, kuat tarik belah, kuat lentur beton, dan pengujian sorptiviti.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

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

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Pengertian Beton

Berdasarkan SNI 2847:2019, Beton adalah campuran semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (*admixture*).

Beton adalah material komposit yang rumit. Beton dapat dibuat dengan mudah bahkan oleh mereka yang tidak punya pemahaman sama sekali tentang teknologi beton, tetapi pemahaman yang salah dari kesederhanaan ini sering menghasilkan persoalan pada produk, antara lain reputasi jelek dari beton sebagai materi bangunan (Nugraha & Antoni, 2007:1).

Dari pemakaiannya yang begitu luas maka dapat diduga sejak dini bahwa struktur beton mempunyai banyak keunggulan dibanding materi struktur yang lain.

Keunggulan beton menurut Nugraha dan Antoni (2007:4):

- a. Ketersediaan (*availability*) material dasar.
- b. Kemudahan untuk digunakan (*versatility*).
- c. Kemampuan beradaptasi (*adaptability*).
- d. Kebutuhan pemeliharaan yang minimal.

Kelemahan beton menurut Nugraha dan Antoni (2007:4):

- a. Berat sendiri beton yang besar, sekitar 2400 kg/m³.
- b. Kekuatan tariknya rendah, meskipun kekuatan tekannya besar.
- c. Beton cenderung untuk retak, karena semennya hidraulis. Baja tulangan bisa berararat, meskipun tidak terekspose separah struktur baja.

- d. Kualitasnya sangat tergantung cara pelaksanaan di lapangan. Beton yang baik maupun yang buruk dapat terbentuk dari rumus dan campuran yang sama.
- e. Struktr beton sulit dipindahkan. Pemakaian kembali atau daur ulang sulit dan tidak ekonomis. Dalam hal inistruktur baja lenih unggul, misalnya tinggal melepas sambungannya saja.

B. Material Penyusun Beton

B.1. Semen Portland

Semen Portland ialah semen hidrolisis yang dihasilkan dengan cara menghasilkan klinker terutama dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidrolisis (dapat mengeras jika bereaksi dengan air) dengan gips sebagai bahan tambahan.

Semen merupakan bahan pengikat yang paling terkenal dan paling banyak digunakan dalam proses konstruksi beton. Semen yang umum dipakai adalah semen tipe I dan ketergantungan kepada pemakaian semen jenis ini masih sangat besar. Semen portland jika dilihat dari sisi fungsi masih memiliki kekurangan dan keterbatasan yang pada akhirnya akan mempengaruhi mutu mortar.

Pada dasarnya semen Portland terdiri dari 4 unsur yang paling penting, yaitu:

1. Trikalsium Silikat (C_3S) atau $3CaO.SiO_2$

Sifatnya hampir sama dengan sifat semen yaitu jika ditambahkan air akan menjadi kaku dan dalam beberapa jam saja pasta akan mengeras. C_3S

menunjang kekuatan awal semen dan menimbulkan panas hidrasi kurang lebih 58 kalori/gram setelah 3 hari.

2. Dikalsium Silikat (C_2S) atau $2CaO.SiO_2$

Pada saat penambahan air setelah reaksi yang menyebabkan pasta mengeras dan menimbulkan panas 12 kalori/gram setelah 3 hari. Pasta akan mengeras, perkembangan kekuatannya stabil dan lambat pada beberapa minggu kemudian mencapai kekuatan tekan akhir hampir sama dengan C_3S .

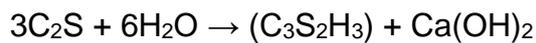
3. Trikalsium Aluminat (C_3A) atau $3CaO.Al_2O_3$

Unsur ini apabila bereaksi dengan air akan menimbulkan panas hidrasi tinggi yaitu 212 kalori/gram setelah 3 hari. Perkembangan kekuatan terjadi satu sampai dua hari tetapi sangat rendah.

4. Tetrakalsium Aluminoforit (C_4AF) atau $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$

Unsur ini saat bereaksi dengan air berlangsung sangat cepat dan pasta terbentuk dalam beberapa menit, menimbulkan panas hidrasi 68 kalori/gram. Warna abu-abu pada semen disebabkan oleh unsur ini. Silikat dan aluminat yang terkandung dalam semen portland jika bereaksi dengan air akan menjadi perekat yang memadat lalu membentuk massa yang keras. Reaksi membentuk media perekat ini disebut dengan hidrasi. Reaksi kimia semen bersifat exothermic dengan panas yang dihasilkan mencapai 110 kalori/gram. Akibatnya dari reaksi eksotermis terjadi perbedaan temperatur yang sangat tajam sehingga mengakibatkan retak-retak kecil (*microcrack*) pada mortar.

Proses reaksi kimia semen dengan air sehingga membentuk masa padat ini juga masih belum bisa diketahui secara rinci karena sifatnya yang sangat kompleks. Rumus kimia yang dipergunakan juga masih bersifat perkiraan untuk reaksi kimia dari unsur C_2S dan C_3S dapat ditulis sebagai berikut:



Perubahan komposisi kimia semen yang dilakukan dengan cara mengubah presentase empat komponen utama semen dapat menghasilkan beberapa jenis semen dengan tujuan pemakainnya sesuai dengan tujuan penggunaannya.

B.2. Ageragat Kasar

Agregat kasar adalah kerikil sebagai hasil dari disintegrasi alami batuan atau berupa batu pecah yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 5 mm sampai 40 mm. (SNI 03-3976-1995). Adapun jenis agregat kasar menurut Nawy (1998:14) adalah:

- Batu pecah alami: Bahan ini didapat cadas atau batu pecah alami yang digali. Batu pecah ini dapat berasal dari gunung api, jenis sedimen, atau jenis metamorf. Meskipun dapat menghasilkan kekuatan yang tinggi terhadap beton, batu pecah kurang memberikan kemudahan pengerjaan dan pengecoran di dibandingkan dengan agregat kasar lainnya.
- Kerikil alami: Kerikil didapat dari proses alami, yaitu dari pengikisan tepi maupun dasar sungai oleh air sungai yang mengalir. Kerikil memberikan

kekuatan yang lebih rendah dari pada batu pecah, tetapi memberikan kemudahan pengerjaan yang lebih tinggi.

- Agregat kasar buatan: Terutama berupa slag atau shale yang biasa digunakan untuk beton berbobot ringan. Biasanya merupakan hasil dari proses lain seperti dari blast-furnance dan lain-lain.
- Agregat untuk pelindung nuklir dan berbobot berat: Dengan adanya tuntutan yang spesifik pada zaman atom sekarang ini, juga untuk pelindung dari radiasi nuklir sebagai akibat dari semakin banyaknya pembangkit atom dan stasiun tenaga nuklir, maka perlu ada beton yang dapat melindungi dari sinar x, sinar gamma, dan neutron. Pada beton demikian syarat ekonomis maupun syarat kemudahan pengerjaan tidak begitu menentukan. Agregat kasar yang diklasifikasikan di sini misalnya baja pecah, barit, magnetit dan limonit.

B.3. Agregat Halus

Menurut SNI 03 - 3976 - 1995, Agregat halus adalah pasir alam sebagai hasil desintegrasi secara alami dari batu atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butiran terbesar 5,0 mm. Nugraha & Antoni (2007:60) mengatakan kualitas agregat halus haruslah:

- Sound secara fisik, yaitu tahan terhadap pengaruh beku-cair.
- Berbentuk baik, bentuk kubikal atau bulat lebih baik daripada yang sangat bulat atau pipih. Pemakaian pasir hasil penggilingan umumnya menambah kekuatan tekan dan lentur.

- Tergradasi dengan baik, akan mempunyai persentase ruang kosong yang minimal dan luas permukaan minimal. Masalah pada beton sering diakibatkan agregat halus yang terkontaminasi dan kurva gradasi yang mempunyai “puncak”. Puncak ataupun lembah merupakan indikasi pasir yang mengalami pendarahan (bleeding sand).

Nugraha & Antoni (2007:60) mengatakan kegunaan agregat halus:

- Mengisi ruang antar butir agregat kasar.
- Memberikan kelecakan, berfungsi sebagai ball bearing. Kelecakan berarti menambah mobilitas sehingga mengurangi gesekan antar butir agregat kasar.

B.4. Air

Air dibutuhkan semen dalam proses kimia untuk bisa berubah menjadi pasta. Berdasarkan komposisi mineral semen, jumlah air yang dibutuhkan untuk hidrasi secara teoritis berkisar 35 – 37 % dari berat semen. Dalam ASTM tidak ada ketentuan syarat air. Pada umumnya air minum dan air bersih dapat dipakai untuk campuran beton maupun mortar.

B.5. Superplasticizer

Salah satu bahan kimia yang mempengaruhi kemampuan beton untuk mengalir adalah *superplasticizer*. *Superplasticizer* yang ada dipasaran terbagi ke dalam empat basis kelompok yaitu, *polycarboxylate ether*, *modified lignosulfonates*, *sulfonatedmelamin formadehyded condensate* dan *sulfonated naphhtalein formaldehyde condensate*. Tiap jenis *superplasticizer* memberikan

reaksi yang berbeda, tergantung konfigurasi kimia dan berat molekulnya. Dosis *superplasticizer*, jenis semen, komposisi mix desain beton menentukan kemampuan *superplasticizer* untuk melakukan reaksi (Papayianni et al, 2005). Permukaan partikel-partikel semen memiliki fungsi yang menjadikannya menggumpal ketika bercampur dengan air. Penggumpalan ini mengakibatkan sejumlah air terperangkap dan menyebabkan volume air tidak cukup untuk melakukan hidrasi dengan semen sehingga mengurangi konsistensi pada semen. Penambahan jumlah air dapat meningkatkan konsistensi namun akan menurunkan kekuatan karena jumlah pori-pori bertambah banyak. *High Range Water Reducer* atau *superplasticizer* digunakan untuk mengatasi masalah tersebut sehingga dengan perbandingan air dengan semen yang sama dapat diperoleh *workability* beton yang lebih baik.

C. Material Substitusi Beton

C.1. Terak Nikel

Terak atau slag adalah produk sampingan menyerupai batu kaca yang tersisa setelah logam yang diinginkan telah dipisah (dilebur) dari bijih bahan baku logam. Terak nikel merupakan salah satu jenis limbah peleburan biji nikel setelah melalui proses pembakaran. Slag mempunyai butiran partikel berpori pada permukaannya dengan gradasi yang baik dan variasi ukuran partikel yang berbeda-beda.

Komposisi kimia terak nikel terdiri dari Silika (Si) 38.85 %, Ferri Oksida (FeO) 29.75 % dan Alumina (Al) 4.38%. Bukan hanya berfungsi sebagai agregat saja, dengan tingginya kandungan silika pada terak nikel diharapkan

proses hidrasi antara semen dan agregat akan membentuk interface yang lebih sempurna, sehingga kehancuran beton tidak terjadi pada interface. Kehancuran pada interface diperlukan energy yang besar, dengan kata lain beton memiliki kekuatan yang cukup tinggi.

Slag nikel merupakan salah satu limbah B3 menurut Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun. PP ini menggolongkan slag nikel sebagai limbah B3 kategori bahaya 2 dengan kode limbah B403. Hal ini berarti slag nikel merupakan limbah yang memiliki efek tunda (*delayed effect*), dan berdampak tidak langsung terhadap manusia dan lingkungan.

Tingkatan ketertindian logam berat dari seperti Arsenik (As), Kadmium (Cd), Kromium (Cr), Tembaga (Cu), Nikel (Ni) dan Seng (Zn) masih di bawah tingkatan yang dipersyaratkan oleh Badan Lingkungan negara Inggris. Mereka menyimpulkan bahwa slag nikel dapat dipertimbangkan sebagai bahan yang ramah lingkungan ketika digunakan sebagai pengganti agregat dalam produksi beton. Sejumlah negara maju seperti Korea dan Jepang, telah memanfaatkan secara optimal slag nikel pada industri konstruksi. Bahkan Jepang menurut Okazaki dkk, (2002) telah memanfaatkan hampir seluruh slag nikel dari industri pengolahan nikel. Mustika, dkk, (2016) membagi Slag nikel menjadi 3 jenis menurut yaitu slag nikel kategori high yang diperoleh dari proses pemurnian di converter yang berbentuk pasir halus serta berwarna coklat, dan kategori medium dan low yang berasal dari tungku pembakaran (furnace). Tanijaya, dkk, (2007), secara umum komposisi slag nikel terdiri dari silikon (40%), besi (30%) dan aluminium oksida (2.5%). Persyaratan yang paling penting dari slag ketika

digunakan sebagai pengganti agregat halus adalah harus memiliki kepadatan yang cukup ($> 1400 \text{ kg/m}^3$) atau berat jenis ($> 2,5$). Properti standar ini diperlukan untuk memenuhi persyaratan berat dalam meter kubik beton.

C.2. Fly Ash

Menurut SNI 03-6414-2002 mendefinisikan pengertian abu terbang (*fly ash*) batubara adalah limbah hasil pembakaran batubara pada tungku pembangkit listrik tenaga uap yang berbentuk halus, bundar dan bersifat pozolanik.

Abu terbang (*fly ash*) merupakan material yang memiliki ukuran butiran yang halus, berwarna keabu-abuan dan diperoleh dari hasil pembakaran batubara. Pada intinya abu terbang (*fly ash*) mengandung unsur kimia antara lain silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), fero oksida (Fe_2O_3) dan kalsium oksida (CaO), juga mengandung unsur tambahan lain yaitu magnesium oksida (MgO), titanium oksida (TiO_2), alkalin (Na_2O dan K_2O), sulfur trioksida (SO_3), pospor oksida (P_2O_5) dan Karbon (Anonim, 2008).

Sebenarnya abu terbang (*fly ash*) tidak memiliki kemampuan mengikat seperti halnya semen, namun dengan kehadiran air dan ukurannya yang halus, oksida silika yang dikandung didalam abu batubara akan bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida yang terbentuk dari proses hidrasi semen dan akan menghasilkan zat yang memiliki kemampuan yang mengikat (Djiwanto, 2001).

Menurut PP 18 tahun 1999 juncto PP 85 tahun 1999 abu terbang (*fly ash*)

digolongkan sebagai limbah B-3 (bahan berbahaya dan beracun) dengan kode limbah D 223 dengan bahan pencemar utama adalah logam berat, yang dapat menimbulkan pencemaran lingkungan (BAPEDAL, 1999).

Menurut ACI Committee 226, dijelaskan bahwa abu terbang (*fly ash*) mempunyai butiran yang cukup halus, yaitu lolos ayakan No. 325 (45 mili mikron) 5 – 27 % dengan *specific gravity* antara 2,15 – 2,6 dan berwarna abu-abu kehitaman. Abu terbang (*fly ash*) batubara mengandung silika dan alumina sekitar 80 % dengan sebagian silika berbentuk amorf. Sifat-sifat fisik abu terbang (*fly ash*) batubara antara lain densitasnya $2,23 \text{ gr/cm}^3$, kadar air sekitar 4 % dan komposisi mineral yang dominan adalah α -kuarsa dan *mullite*. Selain itu, abu terbang (*fly ash*) batubara mengandung $\text{SiO}_2 = 58,75 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 25,82 \%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 5,30 \%$, $\text{CaO} = 4,66 \%$, alkali = 1,36 %, $\text{MgO} = 3,30 \%$ dan bahan lainnya = 0,81 % (Misbachul Munir, 2008). Beberapa logam berat yang terkandung dalam abu terbang (*fly ash*) batubara seperti tembaga (Cu), timbal (Pb), seng (Zn), kadmium (Cd), chrom (Cr).

Sifat kimia dari abu terbang (*fly ash*) batubara dipengaruhi oleh jenis batubara yang dibakar dan teknik penyimpanan serta penanganannya. Pembakaran batubara lignit dan *subbituminous* menghasilkan abu terbang dengan kalsium dan magnesium oksida lebih banyak dari pada jenis *bituminous*. Namun, memiliki kandungan silika, alumina, dan karbon yang lebih sedikit dari pada bituminous.

Kandungan karbon dalam abu terbang (*fly ash*) diukur dengan menggunakan *Loss Of Ignition Method* (LOI), yaitu suatu keadaan hilangnya potensi nyala dari abu terbang (*fly ash*) batubara. Abu terbang (*fly ash*)

batubara terdiri dari butiran halus yang umumnya berbentuk bola padat atau berongga. Ukuran partikel abu terbang (*fly ash*) hasil pembakaran batubara bituminous lebih kecil dari 0,075 mm. Kerapatan abu terbang (*fly ash*) berkisar antara 2100 sampai 3000 kg/m³ dan luas area spesifiknya (diukur berdasarkan metode permeabilitas udara Blaine) antara 170 sampai 1000 m²/kg, sedangkan ukuran partikel rata-rata abu terbang (*fly ash*) batubara jenis subbituminous 0,01 mm – 0,015 mm, luas permukaannya 1-2 m²/g, massa jenis (*specific gravity*) 2,2–2,4 dan bentuk partikel *mostly spherical*, yaitu sebagian besar berbentuk seperti bola, sehingga menghasilkan kelecakan (*workability*) yang lebih baik (Nugroho,P dan Antoni, 2007).

Penggolongan abu terbang (*fly ash*) pada umumnya dilakukan dengan memperhatikan kadar senyawa kimiawi ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$), kadar CaO (*high calcium dan low calcium*), dan kadar karbon (*high carbon dan low carbon*). Menurut ASTM C618 abu terbang (*fly ash*) dibagi menjadi dua kelas yaitu :

a. Abu Terbang (*Fly Ash*) Kelas F

Abu terbang (*fly ash*) kelas F merupakan abu terbang (*fly ash*) yang diproduksi dari pembakaran batubara *anthracite* atau *bituminous*, mempunyai sifat *pozzolanic* dan untuk mendapatkan sifat *cementitious* harus diberi penambahan quick lime, hydrated lime, atau semen.

Abu terbang (*fly ash*) kelas F ini kadar kapurnya rendah ($\text{CaO} < 10\%$). Abu terbang (*fly ash*) yang mengandung CaO lebih kecil dari 10% yang dihasilkan dari pembakaran anthracite atau bituminous.

Kadar ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) $> 70\%$.

Kadar CaO < 10% (ASTM 20%, CSA 8%)

Kadar karbon (C) berkisar antara 5% -10%

Abu terbang (*fly ash*) kelas F disebut juga *low-calcium fly ash*, yang tidak mempunyai sifat *cementitious* dan hanya bersifat *pozolanic*.

b. Abu Terbang (*Fly Ash*) Kelas C

Abu terbang (*fly ash*) kelas C disebut juga *high-calcium fly ash*. Ini dikarenakan mempunyai sifat *pozolanic* juga mempunyai sifat *self-cementing* (kemampuan untuk mengeras dan menambah strength apabila bereaksi dengan air dengan waktu sekitar 45 menit) dan sifat ini timbul tanpa penambahan kapur (Sri Prabandiyani Retno Wardani, 2008).

Kadar ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) > 50%.

Kadar CaO > 10%

Kadar karbon (C) sekitar 2%

Abu terbang (*fly ash*) yang mengandung CaO di atas 10% yang dihasilkan dari pembakaran *lignite* atau *sub-bitumen* batubara (batubara muda/*sub-bituminous*) (Wardani, 2008).

Perbedaan utama dari kedua abu tersebut adalah banyaknya *calcium*, silika, aluminium dan kadar besi di *ash* tersebut. Walaupun kelas F dan kelas C sangat ketat ditandai untuk digunakan abu terbang (*fly ash*) yang memenuhi spesifikasi ASTM C618, namun istilah ini lebih umum digunakan berdasarkan asal produksi batubara atau kadar CaO. Yang penting diketahui, bahwa tidak semua abu terbang (*fly ash*) dapat memenuhi persyaratan ASTM C618, kecuali pada aplikasi untuk beton, persyaratan tersebut harus dipenuhi (Wardani, 2008).

D. Penelitian Terdahulu

Penelitian-penelitian terdahulu mengenai pasir slag sebagai pengganti sebagian agregat halus dan fly ash sebagai pengganti sebagian semen. Seperti yang dilakukan oleh:

Tabel 1 Penelitian Terdahulu

Nama	Judul	Metode Uji	Hasil
Wayan Mustika, I M. Alit K. Salain, I K. Sudarsana (2016)	Penggunaan Terak Nikel Sebagai Agregat Dalam Campuran Beton	Mengetahui nilai slump dan sifat mekanik beton yang menggunakan material terak nikel dengan membandingkan dengan penggunaan material alami berupa kerikil dan pasir	Hasil penelitian menunjukkan bahwa jika dibandingkan dengan penggunaan agregat alami, terak nikel yang digunakan hanya sebagai agregat kasar, sebagai agregat halus saja dan gabungan agregat kasar dan agregat halus mengakibatkan nilai slump berturut-turut turun, meningkat, dan meningkat. Sebagai agregat kasar, terak nikel meningkatkan nilai

Nama	Judul	Metode Uji	Hasil
			<p>kuat tekan, modulus elastisitas dan kuat tarik belah meningkat. Sebagai agregat halus, terak nikel mengakibatkan nilai kuat tekan, modulus elastisitas dan kuat tarik belah turun. Sebagai gabungan agregat kasar dan halus, terak nikel meningkatkan nilai kuat tekan, modulus elastisitas dan kuat tarik.</p>
<p>Yonna Rosianda, Alex kurniawandy, Zulfikar Djauhari (2016)</p>	<p>Sifat Mekanis Beton Dengan Menggunakan Steel Slag Sebagai Bahan Subtitusi Agregat Halus Dan Fly Ash Sebagai Bahan Subtitusi Semen</p>	<p>Mengidentifikasi Perilaku mekanik beton</p>	<p>Hasil menunjukkan bahwa penggunaan 20% Steel Slag dan 20% fly ash meningkatkan permeabilitas dan porositas beton, untuk pengujian kuat tekan memberikan hasil yang meningkat pada umur 28 dan 56 hari</p>

Nama	Judul	Metode Uji	Hasil
Ashish Kumer Saha, Prabir Kumar Sarker (2017)	Perilaku kekuatan mekanik dan karakter peluluhan beton mengandung FNS pengganti pasir dan Fly Ash pengganti sebagian semen	Uji mekanik Beton	Penelitian menunjukkan bahwa 50% penggunaan pasir slag sebagai pengganti sebagian pasir alami menghasilkan gradasi yang baik untuk penginkan kuat tekan yang maksimal. Penggunaan fly ash sebesar 30% persen memberikan hasil yang tidak terlalu signifikan tanpa penggunaan fly ash.
Jianwei Sun, Jingjing Feng, Zhonghui Chen (2019)	Efek ferronickel slag (FNS) sebagai agregat halus pada perilaku beton	Uji perilaku mekanik beton	Hasil menunjukkan peningkatan perilaku mekanik ketika menggunakan blast furnace slag (BS), dan turun dengan penggunaan electric furnace slag (ES). Hasil juga menunjukkan

Nama	Judul	Metode Uji	Hasil
			kombinasi yang paling optimal yaitu 75% BS dan 25% ES.