

1. Submission acknowledgement (22-12-2020)
2. Editor decision (18-11-2021)

[RS] **Submission Acknowledgement**

Rekayasa Sipil <rekayasasipil@ub.ac.id>

Sel 22/12/2020 13.23

Kepada: Nuroji <nuroji@lecturer.undip.ac.id>

rekayasasipil@ub.ac.id

Nuroji Nuroji:

Thank you for submitting the manuscript, "BETON DENGAN SUBSTITUSI SEMEN BERBASIS TERAK NIKEL" to Rekayasa Sipil. With the online journal management system that we are using, you will be able to track its progress through the editorial process by logging in to the journal web site:

Manuscript URL:

<https://rekayasasipil.ub.ac.id/index.php/rs/author/submission/809>

Username: nuroji

If you have any questions, please contact me. Thank you for considering this journal as a venue for your work.

Rekayasa Sipil
Rekayasa Sipil
Editor in Chief
Rekayasa Sipil
Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya
Jl. MT. Haryono 167
Malang, Jawa Timur
Indonesia 65145

Bls: [RS] Editor Decision 809

Nuroji <nuroji@lecturer.undip.ac.id>

Min 21/11/2021 12.31

Kepada: Dr. Ari Wibowo <ariwibowo@ub.ac.id>

Ysh para Editor,

Atas nama seluruh author paper ini kami haturkan terima kasih sebesar-besarnya.

Nuroji

Dari: Rekayasa Sipil <rekayasasipil@ub.ac.id>

Dikirim: Kamis, 18 November 2021 12.49

Kepada: Nuroji <nuroji@lecturer.undip.ac.id>

Subjek: [RS] Editor Decision 809

rekayasasipil@ub.ac.id

Yth. Penulis Artikel.

Bersama dengan ini kami informasikan bahwa artikel dengan judul **BETON DENGAN**

SUBSTITUSI SEMEN BERBASIS TERAK NIKEL, Penulis 1 : Nuroji, Penulis 2 :

Supriyadi Hanum, Penulis 3 : Han Ay Lie, Penulis 4 : Sie Alexander Patrick

Subagyo telah **kami terima** dan akan kami terbitkan pada Rekayasa Sipil Vol.16

no.1 Februari 2022 (P-ISSN : 1978-5658 / E-ISSN : 2502-6348) secara online

di rekayasasipil.ub.ac.id.

Atas perhatian yang diberikan, kami ucapkan terima kasih.

Salam,

Ir. Ari Wibowo, ST., MT, Ph.D

Brawijaya University

ariwibowo@ub.ac.id

Editor in Chief

Rekayasa Sipil

Jurusan Teknik Sipil

Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya

Jl. MT. Haryono 167

Malang, Jawa Timur

Indonesia 65145



REKAYASA SIPIL

Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jl. Mayjen Haryono 167 Malang 65145
Telp. (0341) 580120

SURAT TANDA TERIMA

No. 124-809/STT/RS.16.01/TSUB/02.2022

Yth. Penulis Artikel.

Bersama dengan ini kami informasikan bahwa artikel dengan judul **BETON DENGAN SUBSTITUSI SEMEN BERBASIS TERAK NIKEL**, Penulis 1 : **Nuroji**, Penulis 2 : **Supriyadi Hanum**, Penulis 3 : **Han Ay Lie**, Penulis 4 : **Sie Alexander Patrick Subagyo** telah kami terima dan akan kami terbitkan pada *Rekayasa Sipil* Vol.16 no.1 Februari 2022 (P-ISSN : 1978-5658 / E-ISSN : 2502-6348) secara online di rekayasasipil.ub.ac.id.

Malang, 18 November 2021
Tim Editor *Rekayasa Sipil*



Christin Remayanti N., ST., MT

BETON DENGAN SUBSTITUSI SEMEN BERBASIS TERAK NIKEL

Nuroji^{*1}, Supriyadi Hanum², Han Ay Lie³ dan Sie Alexander Patrick Subagyo⁴

¹Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Program Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

³Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

⁴Peneliti, PT Wiswakharman, Semarang, Indonesia

Korespondensi: nuroji@lecturer.undip.ac.id

ABSTRACT

This research studied the effect of nickel-based cement substitution in concrete to analyze its behavior. The percentage of substituted nickel-slag was 10%, 20% and 30% to the cement weight. The mechanical properties studied were the compression f'_c and tensile f_{MR} stresses at the ages of 14, 28, 42 and 56 days. The data were analyzed and the visual observation of the fractured plans were addressed to determine the failure modes. The research concluded that the nickel-slag cement reduced both the compressive and tensile strength as a function of the substituted content, the decrease process followed a linear path. It was found that the strength of nickel-slag concrete cannot be defined at 28 days due to a prolonged chemical process.

Keyword : compressive strength, concrete, flexural strength, nickel slag

1. PENDAHULUAN

Terak adalah produk limbah dan produk sampingan, yang berasal dari pemrosesan bijih metalik atau industri. Secara umum terak yang dihasilkan ada dua jenis yaitu terak ferrous (besi/baja) dan terak non-ferrous (bukan besi/baja). Pemrosesan dan penggunaan kembali terak menjadi hal yang menarik untuk diteliti dan didiskusikan karena kandungan yang dimiliki terak yang berpotensi daur-ulang atau kemungkinan untuk dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan baku sekunder pada beberapa sektor semisal pada bidang konstruksi [1–4].

Selain itu terak yang hanya ditimbun atau dibuang akan berdampak pada lingkungan. Disebutkan dalam aturan pengelolaan limbah B3, secara spesifik dalam Peraturan Pemerintah (PP) No. 101 tahun 2014 [5–7] dijelaskan bahwa terak mengandung fosfor dari proses yang menggunakan teknologi *electric furnace* tergolong dalam kategori bahaya “2”. Oleh karenanya, pengolahan dan pemanfaatan terak setidaknya dapat menyelesaikan dua permasalahan sekaligus. Yang pertama adalah permasalahan lingkungan akan tereduksi dengan

diolahnya limbah jenis ini, dan yang kedua adalah jika limbah ini dapat dimanfaatkan maka kebutuhan akan bahan baku (*raw material*) sekunder untuk bidang konstruksi dapat dipenuhi. Pengaruh sekunder adalah bahwa penggunaan terak nikel memiliki potensi untuk menekan kebutuhan semen [3,8]. Seperti telah diketahui, produksi semen mengakibatkan pembentukan gas CO₂ yang merupakan unsur pencemaran udara dan salah satu sebab terjadinya *green-house effect* [9,10].

Berdasarkan data Laporan Kinerja Tahun 2019 Direktur Jenderal Mineral dan Batubara, Kementerian ESDM terdapat 17 buah fasilitas pengolahan dan pemurnian atau smelter yang telah beroperasi di Indonesia, 11 buah smelter diantaranya merupakan smelter nikel [11]. Saat ini di Indonesia kapasitas total peleburan nikel dalam negeri mencapai 5 juta ton/tahun dengan asumsi memproduksi ferronikel dengan kadar Ni 10% membutuhkan bahan baku bijih nikel sekitar 40 juta ton/tahun dimana sekitar 30 juta ton akan menjadi limbah berupa terak [2,11,12]. Penggolongan terak sebagai limbah B3 tidak terlepas dari jumlah yang sangat besar ini. Sedangkan tingkat pemanfaatan semen terak

sebagai substitusi semen saat ini masih tergolong amat rendah. Hal ini menunjukkan potensi penggunaan terak nikel sebagai pengganti semen yang masih sangat besar di masa depan [3,6,13,14].

Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis dan menjelaskan pengaruh terak nikel sebagai bahan substitusi semen portland pada properti mekanik beton. Penelitian ini memfokuskan analisa pada properti kuat tekan f_c dan kuat tarik dengan metode lentur f_{MR} . Karena waktu ikat terak nikel dapat berbeda dengan PC, maka pengaruh terak nikel pada waktu ikat diamati dengan menguji beton pada usia 14, 28, 42 dan 56 hari. Perubahan pola keruntuhan diamati secara visual, dan dibandingkan terhadap perilaku beton dengan pengikat PC. Informasi yang didapatkan diharapkan dapat memberikan masukan terutama bagi dunia industri terapan, sehingga beton dengan terak nikel dapat digunakan secara massal.

Penelitian dalam bidang ini telah dilakukan oleh [15,16] untuk optimasi bubuk slag nikel menggunakan sistem ternary C-A-S. Dimana sistem ternary merupakan diagram fasa yang terdiri atas tiga unsur logam murni, respon senyawa yang diamati berupa C-A-S ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$). Sistem ternary ini merupakan perhitungan matematis untuk membentuk kesetimbangan dalam campuran [17]. Dalam penelitian Ashad et al. [16] ditemukan bahwa bubuk slag nikel memerlukan senyawa yang berasal dari semen dan air untuk dapat bereaksi. Dari penelitian ini ditemukan bahwa sistem ternary C-A-S mencapai optimum pada kadar 14,59%.

Penelitian tersebut didasarkan pada logam murni. Logam murni di lapangan sulit didapatkan, dengan demikian hasil penelitian akan berbeda dengan kondisi di lapangan. Penelitian ini menggunakan terak nikel dengan kondisi sesuai keadaan di lapangan, penelitian ini dilakukan agar dapat memberikan informasi lebih lanjut tentang substitusi terak nikel pada semen portland dalam korelasinya terhadap kuat tekan dan kuat tarik beton dengan varian bebas berupa persentase substitusi terak nikel. Varian lain dianggap tetap.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Terak

Terak nikel yang digunakan sebagai pengganti semen dihaluskan terlebih dahulu

seperti semen karena semakin halus teraknya maka semakin besar kontribusinya dalam peningkatan mutu beton. Terak nikel memiliki kemampuan untuk dapat digunakan sebagai bahan konstruksi alternatif karena adanya kemiripan dengan sifat fisik semen. Terak nikel yang tampil sebagai bahan yang lebih ramah lingkungan ini juga menunjukkan peningkatan *workability* [18].

2.2. Kuat tekan beton

Berdasarkan SNI 03-1974-1990, kuat tekan beban beton dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Dimana:

f_c = kuat tekan beban beton (N/mm²)

P = beban maksimum (N)

A = luas penampang (mm²)

Menurut SNI 03-6815-2002, besarnya variasi kekuatan contoh uji beton tergantung pada mutu material, pembuatan, dan kontrol dalam pengujiannya. Perbedaan kekuatan dapat ditemukan dari dua penyebab utama, yaitu:

- Perbedaan dalam perilaku kekuatan yang terbentuk dari campuran beton dan bahan penyusunnya.
- Perbedaan jelas dalam kekuatan yang disebabkan oleh perpaduan variasi dalam pengujian.

2.3. Kuat tarik lentur beton

Berdasarkan SNI 03-4431-1997, kuat tarik lentur adalah kemampuan balok beton yang diletakan pada dua perletakan untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu benda uji, yang diberikan padanya sampai benda uji patah. Kuat tarik lentur dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$f_{MR} = \frac{PL}{b d^2} \quad (2)$$

Dimana:

f_{MR} = kuat tarik lentur (N/mm²)

P = beban maksimum (N)

L = panjang balok (mm)

b = lebar penampang balok (mm)

d = tinggi penampang balok (mm)

Metode yang digunakan adalah SNI 4431:2011 dimana cara uji kuat lentur beton normal dengan dua titik pembebanan dan ASTM C78-08 yang menggunakan balok berukuran

150x150x600 mm yang diberi beban terpusat sebanyak dua buah yang terletak pada 1/3 panjang bentang.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan material berupa:

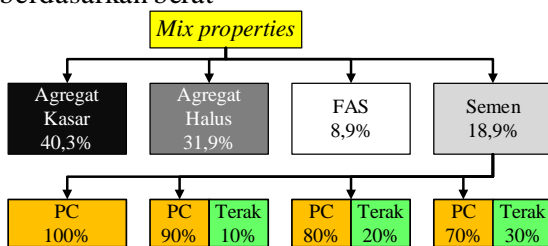
- Aggregat halus berupa pasir yang bersumber dari Galunggung.
- Aggregat kasar ukuran 10-20 mm yang bersumber dari Subang.
- Semen portland tipe I dari produk Semen Gresik.
- Bubuk terak nikel dari PT Growth Java Industry
- Air yang berasal dari pompa air dalam di lingkungan pabrik

Pembuatan benda uji direncanakan dengan metode pendekatan yang tercantum dalam SNI 03-2834-2000 tentang cara pembuatan rencana campuran beton normal. Komposisi mix design tersaji dalam **Tabel 1**.

Tabel 1. Mix design

No	Material	% Berat
1	Aggregat Kasar	40.3
2	Aggregat Halus	31.9
3	Air	8.9
4	Semen	18.9

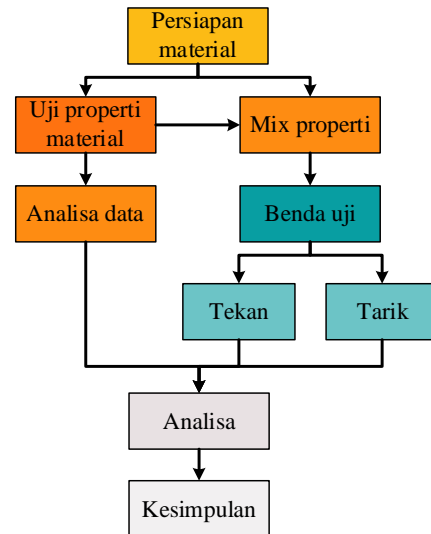
Gambar 1 menunjukkan skematis proporsi campuran, termasuk substitusi kerak nikel dalam berat. Substitusi dilakukan berdasarkan berat



Gambar 1. Mix properties

Benda uji direncanakan menggunakan substitusi terak nikel sebesar 0%, 10%, 20%, dan 30% berat. Untuk setiap proporsi campuran, dibuat empat benda uji, baik untuk silinder yang digunakan untuk menguji kuat tekan, maupun balok yang digunakan untuk uji tarik.

Prosedur pelaksanaan penelitian meliputi tahapan-tahapan seperti yang tampak dalam **Gambar 2**.



Gambar 2. Bagan alir penelitian

Tahapan diuraikan sebagai berikut:

- Persiapan material dasar**
Pada tahapan ini material dasar, peralatan pengadukan dan pencetakan disiapkan. Identifikasi visual dan fisik terhadap material agregat kasar, halus, semen PC dan terak nikel dilakukan. Untuk mendukung penelitian, dilakukan studi literatur baik ke arah standar, *code* maupun penelitian terkait sehubungan dengan material dasar tersebut.
- Uji properti material**
Berdasarkan standar maka dilakukan pengujian bahan dasar agar didapatkan gambaran tentang korelasi kondisi eksisting terhadap batasan yang diberikan oleh peraturan. Apabila terdapat penyimpangan di luar koridor itu, maka diperlukan penanganan atau pergantian sebelum pembuatan benda uji. Pengujian untuk agregat halus berupa uji kadar lumpur, berat jenis, dan gradasi. Sedangkan pengujian agregat kasar adalah uji abrasi, berat jenis, dan gradasi.
- Mix properties**
Dengan menggunakan metode perhitungan ACI ditentukan proporsi masing-masing bahan. Hasil pengujian terhadap material data merupakan masukkan pada perhitungan dan penentuan proporsi material dalam adukan. Agar agregat dapat distandarisasi, maka seluruh agregat dibuat saturated surface dry (SSD), sehingga faktor air semen yang digunakan hanya berfungsi sebagai reagen semen dan peningkatan kelecakan adukan. FAS dalam

- penelitian ini adalah 0.46
- (d) Pembuatan benda uji
Pada tahap ini dilakukan pembuatan adukan beton sesuai dengan job mix design yang telah dilakukan, pengecoran, dan perawatan benda uji dengan waktu sesuai umur rencana.
- (e) Pengujian kuat tekan beton
Pengujian kuat tekan mengacu pada standar ASTM C39 menggunakan alat *Compression Machine*. Pengujian dilakukan dengan menaikkan stroke *compressive jack* dengan kecepatan 0,4-0,7 ton/detik sampai kapasitas tertinggi dan benda uji mengalami retak/pecah. Beban maksimum di data, serta pola keruntuhan direkam secara visual.
- (f) Pengujian kuat lentur beton
Pengujian kuat lentur beton mengacu pada ASTM C78 menggunakan alat *Static Uniaxial Testing Machine*. Pengujian dilakukan dengan menaikkan stroke *compressive jack* dengan kecepatan beban 0,5-0,8 ton/detik sampai kapasitas tertinggi dan benda uji terbelah. Pola keruntuhan dan pengamatan terhadap bidang fraktur dilakukan secara visual
- (g) Analisis
Dari hasil pengujian, dilakukan analisa data individual untuk menentukan keabsahan data. Setidaknya tiga data valid diperlukan untuk menganalisa perilaku. Variabel bebas berupa persentase substitusi terak nikel dan usia beton. Dengan menggunakan pengamatan perilaku, dan dengan menggunakan kaidah normatif perilaku beton, dapat disimpulkan pengaruh terak nikel pada kuat tekan dan tarik beton pada beberapa tahapan usia.
- (h) Kesimpulan
Pada tahap ini, data yang telah dianalisa dibuatkan suatu kesimpulan yang terkait dengan tujuan penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Properti kimia terak nikel tersaji dalam **Tabel 2**.

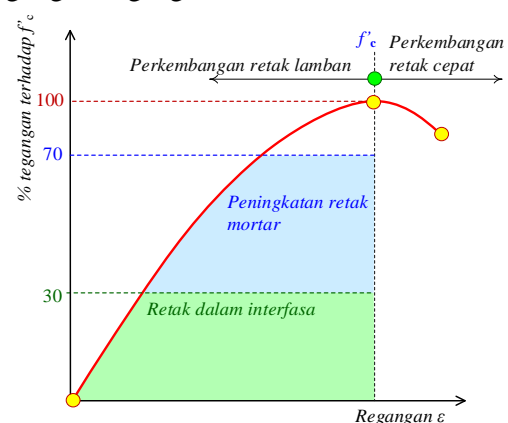
Tabel 2. Tabel property kimia terak nikel

Unsur	% Kandungan
Mg	18.45
Al	9.06
Si	35.50

Unsur	% Kandungan
P	0.02
S	0.75
K	0.31
Ca	33.09
Cr	0.51
Mn	0.84
Fe	1.25
Zn	0.07
Sr	0.14
Zr	0.01
Total	100

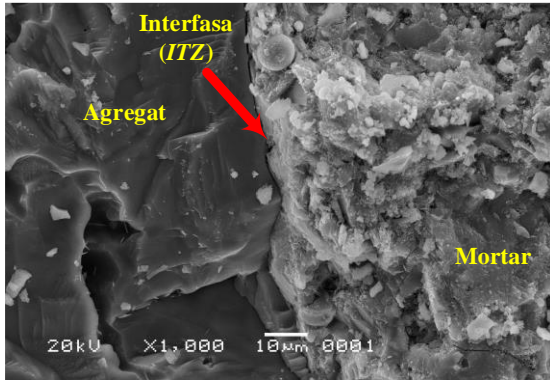
4.1 Respon kuat tekan

Kuat tekan beton merupakan kontribusi kuat tekan masing-masing komponen penyusun, dan interfasa antara agregat dengan pasta semen. Pada umumnya retak akan diawali di daerah interfasa ini, karena merupakan bagian terlemah dalam beton. **Gambar 3** menunjukkan proses keruntuhan beton sebagai fungsi perilaku tegangan-regangan [18].



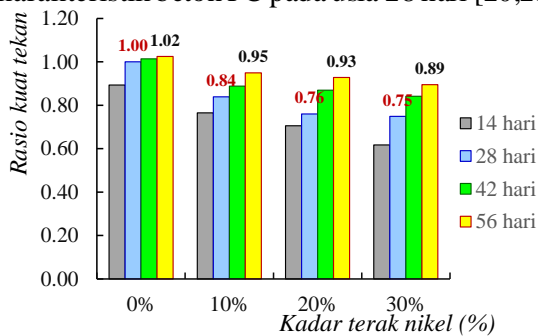
Gambar 3. Pola keruntuhan material beton

Setelah lekatan interfasa hilang, retak merambat masuk ke mortar, dan dengan semakin besarnya retakan tersebut proses keruntuhan beton akan terjadi dalam waktu yang relatif singkat. Hilangnya lekatan interfasa umumnya terjadi karena buruknya respon lekatan permukaan agregat karena kandungan lumpur yang tinggi, permukaan yang terlalu halus, atau kelebihan air adukan yang menyebabkan terbentuknya kristal semen yang runcing, panjang dan lemah di daerah ini [19]. **Gambar 4** menunjukkan retak dalam interfasa antara agregat dengan mortar pada perbesaran 1000x.



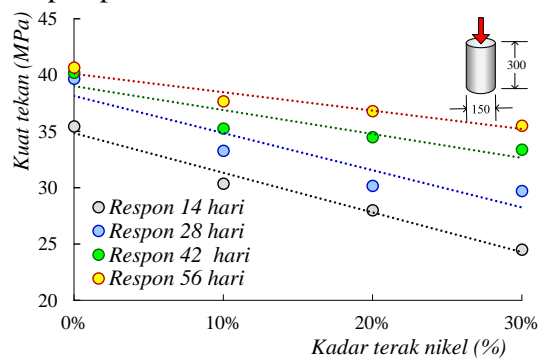
Gambar 4. Keretakan dalam interfasa

Respon kuat tekan beton sangat tergantung kinerja elemen pengikat, dalam hal ini semen. **Gambar 5** menunjukkan hubungan kuat tekan beton dengan variasi substitusi terak nikel, pada beberapa usia. Nilai kuat tekan dinormalisasikan terhadap kuat tekan karakteristik beton PC pada usia 28 hari [20,21].



Gambar 5. Respon kuat tekan beton terak nikel

Tampak terak nikel menurunkan kuat tekan beton pada semua usia [21,22]. Tampak dari data tersebut bahwa semua spesimen mengalami peningkatan kuat tekan sebagai fungsi waktu. Pengamatan perilaku penurunan kuat tekan sebagai fungsi kandungan terak nikel tampak pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Pola penurunan kuat tekan sebagai fungsi kadar terak nikel

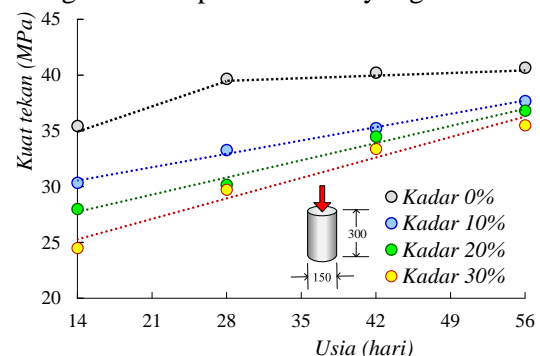
Tampak bahwa pola penurunan kuat

tekan menurun mengikuti pola linier. Pada usia 14 hari penurunan mengikuti alur yang relatif linier, sehingga dapat disimpulkan bahwa kuat tekan merupakan fungsi langsung terhadap kandungan terak. Lekatan antara mortar dan agregat terlepas [21,23], menandakan proses hidrasi yang belum sempurna (**Gambar 7**).



Gambar 7. Terlepasnya lekatan interfasa antara mortar dan agregat

Pada usia 28, 42 dan 56 hari pola penurunan dipengaruhi oleh lekatan interfasa dan proses hidrasi. Laju penurunan tampak makin landai dengan bertambahnya usia beton. **Gambar 8** menunjukkan perilaku perkembangan kuat tekan sebagai fungsi waktu. Tampak jelas bahwa penambahan terak nikel sebesar 10% sangat drastis menurunkan kuat tekan, yang tampak dari jarak relatif kedua kurva tersebut. Penambahan terak nikel secara bertahap sebesar 10% menurunkan kuat tekan, tetapi tidak sedrastis penurunan antara beton normal dengan beton terak nikel 10%. Ini menunjukkan bahwa peningkatan substitusi kandungan terak nikel diatas 10% mengakibatkan proses hidrasi yang relatif stabil.



Gambar 8. Respon perkembangan kuat tekan sebagai fungsi waktu

Pada usia 56 hari, beton dengan terak nikel 10%, 20%, dan 30% mencapai kuat tekan yang hampir sama. Dengan demikian tampak

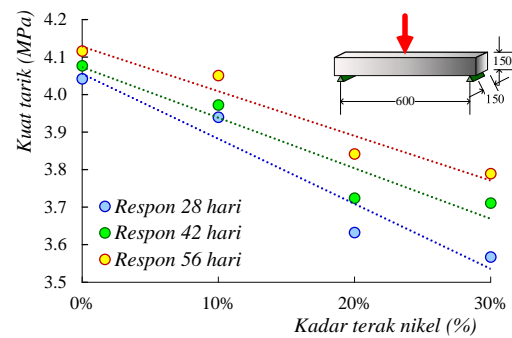
bahwa efek negatif substitusi terak nikel terhadap kuat tekan mengalami normalisasi pada usia 56 hari. Penggunaan terak nikel tinggi juga tidak dapat ditetapkan pada usia 28 hari, sebagaimana standar beton dengan semen PC. Apabila kurva beton PC relatif landai setelah usia 28 hari, dan fungsi peningkatan kuat tekan sebagai fungsi waktu dapat didekati dengan kurva bi-linier. Gradien setelah 28 hari tercatat sebagai 0.005 rad. Gradien kurva untuk kandungan terak nikel 10%, 20% dan 30% berturut-turut adalah 0.17, 0.22 dan 0.26 rad. **Gambar 8** juga menunjukkan bahwa pada usia 56 hari laju peningkatan kuat tekan beton terak nikel belum mencapai konvergensi. Katsiotis et al. [7] menjelaskan penggunaan terak metalurgi dalam substitusi klinker dalam semen portland biasanya menghasilkan kuat awal yang lebih rendah dan waktu pengerasan yang lebih lama.

Penurunan kuat tekan akibat pengaruh terak nikel dapat dijelaskan karena kehadiran terak nikel dalam campuran mengakibatkan reaksi kimiawi semen tidak dapat bereaksi seluruhnya. Hal ini senada dengan yang disampaikan oleh Ashad et al. [16] bahwa optimasi bubuk slag nikel terjadi dalam 3 fase utama yang mana membutuhkan senyawa yang terkandung dalam semen dengan air untuk membentuk komponen produk reaksi yaitu kalsium silikat hidrat (CSH), kalsium hidroksida (CH), dan kalsium sulfoaluminat (CASH). Sehingga substitusi tinggi seperti yang terjadi pada benda uji dengan substitusi 30% terak nikel mengakibatkan proporsi semen portland dibutuhkan untuk dapat bereaksi berkurang.

4.2 Respon kuat tarik

Karena kuat tarik material beton sangat tergantung lekatan dalam interfasa, dan interfasa umumnya lemah, maka kuat tarik beton akan jauh lebih rendah dari kuat tekan. SNI menyatakan bahwa kuat tarik f_{tr} hanya mencapai 10%-15% kuat tekan. Metode pengujian kuat tarik berbeda dengan uji tekan, karena pengujian langsung akan menghadapi kesulitan pada saat mengimplikasikan gaya tarik sentris pada penampang. Uji tarik umumnya dilakukan dengan metode tidak langsung; uji belah silinder atau uji lentur. Dalam penelitian ini kuat tarik diperoleh melalui uji lentur.

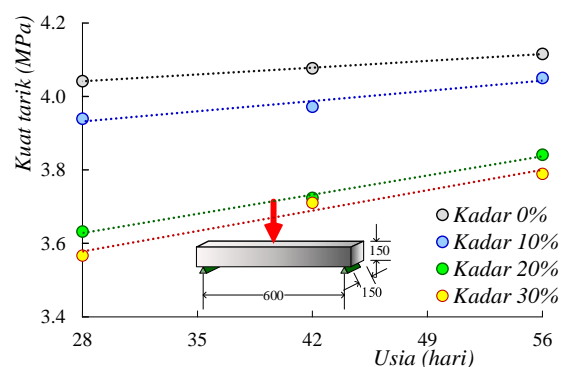
Karena kuat tarik rendah, maka tidak dilakukan pengujian beton pada usia 14 hari. Data kuat tarik sebagai fungsi kandungan terak nikel tampak dalam **Gambar 9**.



Gambar 9. Pola penurunan kuat tarik sebagai fungsi kadar terak nikel

Kuat tarik mengalami penurunan sebagai fungsi peningkatan kadar terak nikel. Laju penurunan pada semua usia hampir sama, yang tampak dari tangent sudut yang dibentuk oleh garis yang menggambarkan pola penurunan tersebut. Seperti kuat tekan, fungsi penurunan dapat digambarkan sebagai fungsi linier. Apabila penurunan kuat tekan sebagai fungsi waktu untuk beton konvensional relatif kecil, penurunan ini tampak jauh lebih besar pada beton dengan terak nikel.

Pengamatan perkembangan kuat tarik sebagai fungsi waktu tampak dalam **Gambar 10**. Yang menarik adalah bahwa perbedaan signifikan terjadi antara kadar terak nikel 10% dengan 20%, hal ini berbeda dengan perilaku tekan, yang justru mengalami jeda besar antara kadar 0% dan 10%.



Gambar 10. Respon perkembangan kuat tarik sebagai fungsi waktu

Ini berarti bahwa pengaruh terak nikel pada beton sebagai fungsi usia berbeda. Perbedaan ini disebabkan karena pola tekan dipengaruhi lekatan interfasa dan kuat tekan mortar, sedang pada perilaku tarik lekatan interfasa merupakan faktor utama keruntuhan tarik. Pengamatan visual pada benda bidang keruntuhan kandungan 10% menunjukkan bahwa terdapat keruntuhan pada mortar dan

interfasa, sedang pada kandungan 20% seluruh keruntuhan terjadi pada interfasa (**Gambar 11**).



Gambar 11. Fraktur pada bidang keruntuhan tarik. (a) keruntuhan mortar dan interfasa, (b), agregat terlepas dari mortar.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan terhadap benda uji dengan substitusi 0%, 10%, 20%, dan 30% terak nikel pada usia 14, 28, 42, dan 56 hari didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

- (a) Terak nikel menurunkan kuat tekan dan kuat tarik. Pola degradasi kekuatan merupakan fungsi langsung dari kandungan terak nikel dan berupa fungsi linier. Hal ini menunjukkan bahwa perilaku penurunan ini terjadi pada daerah respon linier model konstitutif tegangan-regangan. Di daerah ini keruntuhan tekan maupun tarik terutama ditandai terlepasnya bond interfasa antara agregat dan mortar. Hal ini digaris bawahi oleh pengamatan visual pada bidang keruntuhan baik pada percobaan tekan maupun tarik. Pengamatan ini menunjukkan bahwa agregat terlepas dari mortar pada interfasa.
- (b) Penurunan kuat tekan dan tarik diamati pada usia 14, 28, 42 dan 56 hari. Dari pengamatan ini tampak bahwa usia 28 hari sebagai tolok ukur kuat tekan dengan asumsi telah terjadi konvergensi kuat tekan, tidak berlaku pada beton dengan terak nikel. Kurva hubungan kuat tekan sebagai fungsi waktu menunjukkan kurva datar untuk beton normal, tetapi masih meningkat untuk beton dengan substitusi terak nikel. Apabila pada beton normal peningkatan kuat tekan beton setelah 28 hari hanya 1% peningkatan pada kadar terak nikel 10%, 20% dan 30% berkisar antara 6% sampai 14%.
- (c) Apabila kuat tekan beton mengalami penurunan signifikan pada kandungan 10%, maka untuk kuat tarik hal ini teramati pada kandungan 20%. Pengamatan visual pada bidang fraktur tarik, menunjukkan

bahwa pada kadar 20% terjadi gabungan keruntuhan interfasa dan fraktur dalam mortar. Apabila kuat tekan merupakan kontribusi dari kekuatan mortar, agregat dan interfasa, maka pada kapasitas tarik hanya lekatan interfasa dan kekuatan tarik mortar yang berpengaruh. Perbedaan faktor ini yang mengakibatkan pergeseran perilaku penurunan antara kuat tekan dan tarik.

- (d) Apabila hubungan kuat tarik dan tekan didekati dengan fungsi dimana f_{MR} adalah kuat tarik lentur, dan f'_c merupakan kuat tekan silinder usia 28 hari maka koefisien C yang dihasilkan untuk beton normal, masih dapat digunakan pada beton dengan kandungan terak nikel. Koefisien C berkisar antara 0.64-0.68
- (e) Dengan mempertimbangkan posisi terak nikel sebagai limbah, maka penggunaan bahan ini sebagai substitusi beton dapat direkomendasikan. Pada usia 28 hari penurunan beton terak nikel dengan kadar 30% mencapai 25% terhadap kuat tekan beton normal, namun pada usia 56 hari, penurunan ini hanya 10%. Kendala waktu ikat lama dapat diatasi dengan menggunakan beton ini pada elemen pracetak, yang dapat mengalami curing lebih lama di pabrik, sebelum digunakan. Dengan demikian manfaat penggunaan limbah dan penurunan penggunaan semen PC dapat dioptimasi.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Xi, R. Li, X. Zhao, Q. Dang, D. Zhang, and W. Tan, "Constraints and opportunities for the recycling of growing ferronickel slag in China," *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.08.002.
- [2] Direktorat Industri Logam and Ditjen Industri Logam Mesin Alat Transportasi dan Elektronika, "Dukungan Kebijakan Pemanfaatan Slag Untuk Sektor Industri Hilir dan Infrastruktur," 2018, no. September.
- [3] Q. Wu, Y. Wu, W. Tong, and H. Ma, "Utilization of nickel slag as raw material in the production of Portland cement for road construction," *Constr. Build. Mater.*, vol. 193, pp. 426–434, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.109.
- [4] A. K. Saha, M. N. N. Khan, and P. K. Sarker, "Value added utilization of by-product electric furnace ferronickel slag as

- construction materials: A review,” *Resources, Conservation and Recycling*. 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.02.034.
- [5] Peraturan Pemerintah, *Peraturan Pemerintah No. 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun*, no. 10. Indonesia: Peraturan Pemerintah, 2014.
- [6] D. Wang, Q. Wang, S. Zhuang, and J. Yang, “Evaluation of alkali-activated blast furnace ferronickel slag as a cementitious material: Reaction mechanism, engineering properties and leaching behaviors,” *Constr. Build. Mater.*, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.182.
- [7] N. S. Katsiotis, P. E. Tsakiridis, D. Velissariou, M. S. Katsiotis, S. M. Alhassan, and M. Beazi, “Utilization of Ferronickel Slag as Additive in Portland Cement: A Hydration Leaching Study,” *Waste and Biomass Valorization*, vol. 6, no. 2, pp. 177–189, 2015, doi: 10.1007/s12649-015-9346-7.
- [8] Z. Zhang, T. Yang, and H. Wang, “Alkali-Activated Cement (AAC) From Fly Ash and High-Magnesium Nickel Slag,” in *Handbook of Low Carbon Concrete*, 2017.
- [9] T. Norgate and S. Jahanshahi, “Assessing the energy and greenhouse gas footprints of nickel laterite processing,” *Miner. Eng.*, 2011, doi: 10.1016/j.mineng.2010.10.002.
- [10] Z. Zhang, Y. Zhu, T. Yang, L. Li, H. Zhu, and H. Wang, “Conversion of local industrial wastes into greener cement through geopolymer technology: A case study of high-magnesium nickel slag,” *J. Clean. Prod.*, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.09.147.
- [11] Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara and Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral, “Laporan Kinerja Tahun 2019,” 2020.
- [12] G. Bartzas and K. Komnitsas, “Life cycle assessment of ferronickel production in Greece,” *Resour. Conserv. Recycl.*, 2015, doi: 10.1016/j.resconrec.2015.10.016.
- [13] Q. Wu, S. Wang, T. Yang, H. Zhu, and S. Li, “Effect of High-Magnesium Nickel Slag on Hydration Characteristics of Portland Cement,” *J. Mater. Civ. Eng.*, 2019, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002685.
- [14] Q. Wang, C. Yu, J. Yang, L. Chong, X. Xu, and Q. Wu, “Influence of nickel slag powders on properties of magnesium potassium phosphate cement paste,” *Constr. Build. Mater.*, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.014.
- [15] N. Lemonis *et al.*, “Hydration study of ternary blended cements containing ferronickel slag and natural pozzolan,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 81, pp. 130–139, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.046.
- [16] H. Ashad, A. Nasution, I. Imran, and S. Soegiri, “Optimisasi Bubuk Slag Nikel dengan Sistem Ternary C-A-S,” *J. Tek. Sipil*, 2010, doi: 10.5614/jts.2008.15.3.4.
- [17] Y. Huang, Q. Wang, and M. Shi, “Characteristics and reactivity of ferronickel slag powder,” *Constr. Build. Mater.*, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.038.
- [18] B. Y. Nabillah, L. O. Nelfia, and S. Astutiningsih, “an Innovation of High Performance Concrete By Replacing Cement With Nickel Slag Powder,” *Int. J. Livable Sp.*, vol. 4, no. 2, p. 77, 2019, doi: 10.25105/livas.v4i2.5602.
- [19] M. Fadadu, N. Vadher, V. Trivedi, M. Mungule, and K. K. R. Iyer, “A comparative study on stress-strain response and associated hysteresis for conventional and PET macro-reinforced concrete,” *Constr. Build. Mater.*, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120534.
- [20] K. Wu, H. Shi, L. Xu, G. Ye, and G. De Schutter, “Microstructural characterization of ITZ in blended cement concretes and its relation to transport properties,” *Cem. Concr. Res.*, 2016, doi: 10.1016/j.cemconres.2015.09.018.
- [21] M. A. Rahman, P. K. Sarker, F. U. A. Shaikh, and A. K. Saha, “Soundness and compressive strength of Portland cement blended with ground granulated ferronickel slag,” *Constr. Build. Mater.*, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.023.
- [22] B.-S. Cho, Y.-U. Kim, D.-B. Kim, and S.-J. Choi, “Effect of Ferronickel Slag Powder on Microhydration Heat, Flow, Compressive Strength, and Drying Shrinkage of Mortar,” *Adv. Civ. Eng.*, 2018, doi: 10.1155/2018/6420238.
- [23] N. You, B. Li, R. Cao, J. Shi, C. Chen, and Y. Zhang, “The influence of steel slag and ferronickel slag on the properties of alkali-activated slag mortar,” *Constr. Build. Mater.*, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.340.
- [24] E. H. Sujiono, H. Husain, M. Mulyadi, S. Samnur, and M. Arsyad, “Deformation Pattern of Nickel Slag Bonding on the Development of Concrete Construction,” 2017, doi: 10.1088/1742-6596/846/1/012017.