



Dampak Intrusi Mikroorganisme

terhadap **Material Beton**
dan Cara Penanggulangannya

Dr. Ir. Hanafi Ashad, M.T., IPM., ASEAN Eng.

Dampak Intrusi Mikroorganisme

terhadap Material Beton
dan Cara Penanggulangannya

UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. Penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. Penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Dampak Intrusi Mikroorganisme

terhadap Material Beton
dan Cara Penanggulangannya

Dr. Ir. Hanafi Ashad, M.T., IPM., ASEAN Eng.



Cerdas, Bahagia, Mulia, Lintas Generasi.

**DAMPAK INTRUSI MIKROORGANISME TERHADAP MATERIAL BETON DAN
CARA PENANGGULANGANNYA**

Dr. Ir. Hanafi Ashad, M.T., IPM., ASEAN Eng.

Desain Cover :
Rulie Gunadi

Sumber :
www.shutterstock.com

Tata Letak :
T. Yuliyanti

Proofreader :
Tiara Nabilah Azalia

Ukuran :
xii, 153 hlm, Uk: 15.5x23 cm

ISBN :
978-623-02-8048-1

Cetakan Pertama :
Februari 2024

Hak Cipta 2024, Pada Penulis

Isi diluar tanggung jawab percetakan

Copyright © 2024 by Deepublish Publisher
All Right Reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau
memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini
tanpa izin tertulis dari Penerbit.

PENERBIT DEEPUBLISH
(Grup Penerbitan CV BUDI UTAMA)
Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

Jl.Rajawali, G. Elang 6, No 3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman
Jl.Kaliurang Km.9,3 – Yogyakarta 55581
Telp/Faks: (0274) 4533427
Website: www.deepublish.co.id
www.penerbitdeepublish.com
E-mail: cs@deepublish.co.id

KATA PENGANTAR PENERBIT

Segala puji kami haturkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan segala anugerah dan karunia-Nya. Dalam rangka mencerdaskan dan memuliakan umat manusia dengan penyediaan serta pemanfaatan ilmu pengetahuan dan teknologi untuk menciptakan industri *processing* berbasis sumber daya alam (SDA) Indonesia, Penerbit Deepublish dengan bangga menerbitkan buku dengan judul ***Dampak Intrusi Mikroorganisme terhadap Material Beton dan Cara Penanggulangannya***.

Buku ini membahas mulai dari mikroorganisme hidup di dalam material beton, konsep hubungan intrusi mikroorganisme dan ketahanan material beton, pemeriksaan ketahanan material beton dari serangan mikroorganisme, komponen dan pengaruh mikroorganisme pada material beton dengan bubuk *slag* nikel, hingga bagaimana mengoptimasi bubuk *slag* nikel dalam sistem Ternary C-A-S. Buku ini diharapkan dapat menjadi bahan masukan bagi industri produsen semen dan industri beton pracetak dalam negeri, untuk memanfaatkan limbah nikel sebagai bahan alternatif substitusi semen dalam campuran beton serta menjadi bahan kajian investasi dalam bidang industri produsen mortar siap pakai (mortar instan), sehingga akan tercipta lapangan kerja baru.

Terima kasih dan penghargaan terbesar kami sampaikan kepada penulis, Dr. Ir. Hanafi Ashad, M.T., IPM., ASEAN Eng., yang telah memberikan kepercayaan, perhatian, dan kontribusi penuh demi kesempurnaan buku ini. Semoga buku ini bermanfaat bagi semua pembaca, mampu berkontribusi dalam mencerdaskan dan memuliakan umat manusia, serta mengoptimalkan pemanfaatan ilmu pengetahuan dan teknologi di tanah air.

Hormat Kami,
Penerbit Deepublish

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR PENERBIT	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
BAGIAN I Mikroorganisme Hidup di dalam Material	
Beton.....	1
BAGIAN II Konsep Hubungan Intrusi Mikroorganisme dan	
Ketahanan Material Beton	9
Apa itu Mikroorganisme?	9
Morfologi Bakteri	10
Morfologi Jamur (Fungi).....	11
Nutrien dan Fase Pertumbuhan Fungi.....	13
Proses Metabolisme Mikroorganisme	14
Bagaimana Mikroorganisme Menyerang Material	
Beton?	15
Mikroorganisme pada Material Beton.....	18
Ketahanan Material Beton Akibat Mikroorganisme	23
Apa Saja Bahan-Bahan Suplemen Campuran	
Beton?	30
Slag Nikel sebagai Bahan Suplemen Campuran	
Beton	33
Proporsi Campuran Semen dan Bubuk Slag Nikel	39
BAGIAN III Pemeriksaan Ketahanan Material Beton dari	
Serangan Mikroorganisme	43
Material yang Digunakan	43
Media Intrusi	46
Apa Saja Parameter yang Perlu Dikonfirmasi?	47

Desain Komposisi Bahan Penyusun Beton.....	47
Model Perlakuan Beton Terintrusi Mikroorganisme	48
Prosedur Pemeriksaan dan Pengukuran	49
Pemeriksaan Beton Keras	51
Mikrostruktur Beton	58
Nomenklatur	59
 BAGIAN IV Komponen & Pengaruh Mikroorganisme pada	
Beton dengan Bubuk Slag Nikel	61
Komponen Zat di dalam Media Air Kelapa.....	61
Pertumbuhan Mikroorganisme	62
Aspek Kimiawi Bubuk <i>Slag</i> Nikel.....	65
Efek Konsistensi dan Waktu Pengikatan	67
Profil Mikroorganisme pada Material Beton	68
Aspek Fisik dan Mekanik Beton.....	74
Modulus Elastisitas dan <i>Poisson's Ratio</i>	91
Hubungan Tegangan-Regangan.....	93
Degradasi Fisik dan Mekanik Beton Pasca-intrusi	95
Mikrostruktur dengan <i>Scanning Electron</i>	
<i>Microscopy</i>	101
Analisis Senyawa Kimia dengan <i>X-Ray Diffraction</i>	
(XRD)	104
Hubungan antara Parameter	116
 BAGIAN V Bagaimana Mengoptimasi Bubuk Slag Nikel	
dalam Sistem Ternary C-A-S?.....	125
Persamaan Keseimbangan Reaksi Kimiawi.....	125
Pembuatan Garis Pencampuran Material Semen	
dan Bubuk <i>Slag</i> Nikel.....	127
Proporsi Optimum Campuran Semen dan Bubuk	
<i>Slag</i> Nikel	136
Penutup	139
 DAFTAR PUSTAKA.....	143

DAFTAR TABEL

Tabel II.1.	Spesifikasi beton (Shirakawa, dkk., 2003)	20
Tabel II.2.	Tingkat serangan berbagai komponen agresor (DIN 4030).....	22
Tabel II.3.	Proporsi Campuran Beton MIC (Berndt, 2001).....	27
Tabel II.4.	Komposisi kimia berbagai material <i>cementitious</i> (Lane dan Ozyildirim, 1999)	33
Tabel II.5.	<i>Slag activity index</i> minimum menurut ASTM C989	37
Tabel III.1	Sifat-sifat fisis dan kimiawi semen dan bubuk <i>slag</i> nikel	44
Tabel III.2.	Sifat-sifat fisik agregat halus dan kasar	45
Tabel III.3.	Komposisi bahan penyusun beton	48
Tabel IV.1.	Kandungan zat-zat di dalam media.....	62
Tabel IV.2.	Sudut difraksi senyawa-senyawa kimia hasil identifikasi XRD.....	105
Tabel V.1	Komposisi senyawa kimia CaO, Al ₂ O ₃ , SiO ₂ campuran antara semen dan bubuk <i>slag</i> nikel	128
Tabel V.2.	Data koordinat campuran bahan dalam sistem ternary C-A-S	135

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1.	Morfologi bakteri	10
Gambar II.2.	Bentuk hifa pada fungi (Sand, 2004).....	11
Gambar II.3.	Berbagai bentuk sel khamir.....	12
Gambar II.4.	Kurva fase pertumbuhan fungi.....	14
Gambar II.5.	Produk metabolik, mekanisme serangan dan dampaknya pada material beton.....	17
Gambar II.6.	Pertumbuhan jamur pada permukaan mortar setelah diinokulasi dengan <i>Cladisporium sphaerospermum</i> dan diekspos dengan CO ₂ selama 20 jam (Shirakawa, dkk., 2003)	21
Gambar II.7.	Pembentukan kristal kalsium pada permukaan mortar pasca-inkubasi selama tiga bulan (Shirakawa, dkk., 2003)	22
Gambar II.8.	Kondisi permukaan beton pascaserangan <i>Thiobacillus ferrooxidans</i> (Berndt, 2001).....	28
Gambar II.9.	Hubungan antara pelarutan kapur bebas dengan lama ekspos larutan asam (Tremper, 1989).....	30
Gambar II.10.	Hubungan antara kuat tekan dengan lama ekspos di dalam larutan asam (Tremper, 1989)	30
Gambar II.11.	Tekstur butiran dan mikrostruktur <i>fly ash</i>	31
Gambar II.12.	Tekstur butiran dan mikrostruktur <i>silica fume</i>	31
Gambar II.13.	Tekstur butiran dan mikrostruktur <i>blast furnace slag</i>	32
Gambar II.14.	Material suplemen dalam diagram fase sistem ternary C-A-S	32
Gambar II.15.	Proses produksi nikel matte dan <i>slag</i> nikel	35
Gambar II.16.	Garis keseimbangan gabungan mineral sistem ternary C-A-S	41
Gambar II.17.	Daerah gabungan mineral semen, <i>fly ash</i> , dan <i>silica fume</i>	41

Gambar II.18.	Garis pencampuran dengan rasio SF/FS = 1	42
Gambar III.1.	Kurva distribusi butiran agregat halus dan kasar.....	46
Gambar III.2.	pH meter Model perlakuan beton terintrusi mikroorganisme.....	49
Gambar III.3.	Model pemeriksaan kuat tarik belah (<i>splitting test</i>).....	54
Gambar III.4.	Model pemeriksaan kuat tarik lentur (<i>modulus of rupture</i>).....	55
Gambar III.5.	Prosedur pemeriksaan mikroorganisme pada material beton	57
Gambar III.6.	Preparasi beton untuk pemeriksaan menggunakan <i>Scanning Electron Microscopy</i>	59
Gambar IV.1.	Visualisasi hasil identifikasi golongan mikroorganisme.....	63
Gambar IV.2.	Kurva pertumbuhan golongan mikroorganisme jamur dan ragi (<i>Aspergillus niger and Sacchromycodes ludwigi</i>).....	65
Gambar IV.3.	Mikrostruktur bubuk <i>slag</i> nikel (perbesaran 500 kali).....	66
Gambar IV.4.	Persentase kebutuhan air pada berbagai campuran bahan semen dan bubuk <i>slag</i> nikel dalam kondisi konsistensi normal	67
Gambar IV.5.	Grafik hubungan antara total koloni mikroorganisme maksimum dengan persentase bubuk <i>slag</i> nikel	70
Gambar IV.6.	Grafik hubungan antara total koloni mikroorganisme maksimum dengan kedalam intrusi.....	71
Gambar IV.7.	Hasil <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) pertumbuhan mikroorganisme pada beton setelah terintrusi selama 28 hari	72
Gambar IV.8.	Hasil <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) pembentukan kristal kalsium pada beton saat puncak pertumbuhan mikroorganisme	73

Gambar IV.9.	Mikrostruktur beton tanpa dan dengan 16% bubuk <i>slag</i> nikel setelah terintrusi mikroorganisme.....	77
Gambar IV.10.	Kurva hubungan antara kuat tarik lentur dengan kuat tekan beton nonintrusi dan terintrusi mikroorganisme dan perbandingannya dengan ACI363R-92, ACI318-02, dan Mindess dan Young (1981)	90
Gambar IV.11.	Kurva hubungan antara kuat tarik lentur dengan kuat tekan beton nonintrusi dan terintrusi mikroorganisme dan perbandingannya dengan hasil penelitian Videla dan Gaedicke (2004)	91
Gambar IV.12.	Mikrostruktur dan pertumbuhan mikroorganisme pada beton tanpa bubuk <i>slag</i> nikel	102
Gambar IV.13.	Mikrostruktur dan pertumbuhan mikroorganisme pada beton dengan 16% bubuk nikel.....	103
Gambar IV.14.	Hasil identifikasi senyawa-senyawa kimia pada beton nonintrusi dan terintrusi mikroorganisme dengan <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	106
Gambar V.1.	Posisi garis keseimbangan gabungan mineral C-A-S	127
Gambar V.2.	Posisi C100-0 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S	128
Gambar V.3.	Posisi C90-10 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S	129
Gambar V.4.	Posisi C85-15 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S	129
Gambar V.5.	Posisi C80-20 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S	130
Gambar V.6.	Posisi C70-30 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S	130
Gambar V.7.	Posisi C60-40 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S	131
Gambar V.8.	Posisi C50-50 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S	131

Gambar V.9.	Posisi C0-100 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S.....	132
Gambar V.10.	Detail koordinat CaO, Al ₂ O ₃ , SiO ₂ bahan C100-0	133
Gambar V.11.	Detail dan posisi koordinat C100-0 dalam sistem C-A-S.....	133
Gambar V.12.	Posisi garis pencampuran bahan semen dan bubuk <i>slag</i> nikel dalam sistem ternary C-A-S (CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂).....	136
Gambar V.13.	Proporsi optimum campuran semen dan bubuk <i>slag</i> nikel dalam sistem ternary C-A-S (CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂).....	137
Gambar V.14.	Diagram proporsi campuran semen dan bubuk <i>slag</i> nikel	137
Gambar V.15.	Grafik hubungan antara senyawa silika oksida (SiO ₂) versus persentase bubuk <i>slag</i> nikel.....	138

BAGIAN I

Mikroorganisme Hidup di dalam Material Beton

Perkembangan riset di bidang teknologi material beton sudah memasuki era baru. Dalam era ini, komponen beton dapat diproduksi melalui utilisasi bahan-bahan produk sampingan (limbah) industri, seperti; abu terbang (*fly ash*), endapan silika (*silica fume*), terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), abu sekam (*rice husk ash*), dan lain-lain. Penggunaan bahan-bahan ini dilakukan untuk mengurangi dampak eksploitasi sumber daya alam dan pencemaran lingkungan akibat aktivitas industri, terutama di zaman industri seperti sekarang. Hal tersebut sejalan dengan ide untuk menyeimbangkan antara pembangunan dan pelestarian lingkungan, yang juga dikenal sebagai konsep pembangunan berwawasan lingkungan.

Ketika kita berbicara tentang pembangunan di kota-kota, pencemaran lingkungan tidak hanya disebabkan oleh eksploitasi sumber daya alam dan kegiatan industri besar-besaran. Pencemaran lingkungan juga bisa berasal dari aktivitas sehari-hari manusia, terutama di daerah kumuh, pasar tradisional, dan sejenisnya. Di tempat-tempat seperti ini, limbah air kotor dan penanganan sampah basah seringkali belum diatasi dengan baik, sehingga berdampak negatif pada lingkungan sekitarnya. Bahkan, dalam beberapa kondisi, ini dapat menjadi penyebab pertumbuhan mikroorganisme dan menimbulkan bau tidak sedap sebagai tanda bahwa proses metabolisme mikroorganisme sedang berlangsung.

Struktur beton dalam kondisi lingkungan seperti yang disebutkan sebelumnya cukup rentan terhadap kerusakan, terutama jika produk sampingan dari aktivitas mikroorganisme memiliki tingkat keagresifan yang tinggi. Mikroorganisme ini bisa mengisi ruang atau pori-pori beton, hingga memengaruhi unsur kimia produk hidrasi semen. Salah satu produk

sampingan mikroorganisme yang berpotensi merusak beton adalah zat asam. Zat asam yang bereaksi dengan kalsium hidroksida dapat menyebabkan hilangnya sifat keasaman, penurunan massa beton, dan memicu proses kerusakan. Stabilitas kalsium silikat hidrat (CSH), yang merupakan unsur kekuatan beton, juga dapat terganggu oleh reaksi dengan zat asam. Akibatnya, porositas dan permeabilitas beton meningkat, sementara kekuatan dan kekakuan berkurang. Situasi seperti ini dapat ditemukan pada bangunan pasar tradisional, terutama pada struktur beton di sekitar area jual-beli bahan seperti kelapa dan sayur-mayur. Sampah-sampah basah dari area tersebut dapat menjadi tempat berkembangbiakan mikroorganisme. Selain merusak beton, kondisi seperti ini juga dapat berdampak pada estetika, serta memiliki dampak lebih luas terhadap aspek sosial, ekonomi, kesehatan, dan keselamatan manusia.

Untuk mengatasi problematika di atas, selain meningkatkan kesadaran menjaga lingkungan, langkah-langkah antisipasi juga diperlukan saat proses pekerjaan konstruksi, terutama dalam perancangan bahan-bahan beton. Perancangan yang dimaksud idealnya harus menghasilkan beton yang tidak hanya mencegah masuknya mikroorganisme ke dalam pori-pori beton, tetapi juga membatasi pertumbuhannya di dalam beton. Dua sifat ini sangat dipengaruhi oleh porositas dan produk reaksi hidrasi dari trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S) semen, khususnya kalsium hidroksida yang dapat diuraikan oleh mikroorganisme. Oleh karena itu, material yang dapat memberikan efek penyusutan pori dan efek pozzolanik, seperti *fly ash*, *silica fume*, *blast furnace slag*, *slag* nikel, dan sejenisnya, sangat cocok digunakan di dalam perancangan bahan-bahan beton.

Pada tahun 1990-an, Indonesia pernah menghasilkan beton dengan sifat fisik yang baik dan kekuatan tekan mencapai 100 MPa. Keberhasilan ini dicapai melalui penggunaan mineral tambahan berupa abu terbang dari limbah industri Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) [Besari, dkk. (1992), Munaf (1992), Suhud, dkk. (1999), Imran, dkk. (1999)]. Pada tahun yang sama, penggunaan *slag* nikel, baik sebagai agregat maupun pengganti sebagian semen, juga dilaporkan terbukti mampu menghasilkan beton berkualitas tinggi dan berkinerja tinggi (Soegiri, dkk., 1997, 1998).

Namun, dalam hal prinsip kesetaraan, perkembangan penggunaan *slag* nikel sebagai mineral tambahan dalam campuran beton masih tertinggal dibandingkan dengan penggunaan abu terbang. Hal ini perlu kita perhatikan sebab limbah nikel dari industri nikel di Indonesia cukup besar, yakni sekitar 1,2 juta meter kubik per tahun. Riset tentang pemanfaatan limbah nikel sebagai bahan alternatif pembentuk beton masih terbatas, sehingga untuk memenuhi prinsip kesetaraan, diperlukan kemitraan yang lebih luas dari berbagai pihak terkait.

Indonesia memiliki dua industri pengolahan nikel yang cukup besar, yaitu PT International Nickel Indonesia (PT INCO) di Soroako, Sulawesi Selatan, dan PT Aneka Tambang di Pomalaa, Sulawesi Tenggara. PT INCO merupakan industri terbesar hasil kerja sama antara pemerintah Indonesia dan Kanada, dengan masa operasi hingga tahun 2040. Limbah nikel (*slag* nikel) yang dihasilkan oleh industri ini berasal dari proses peleburan bijih laterit pada tanur listrik dengan temperatur sekitar 1300°C.

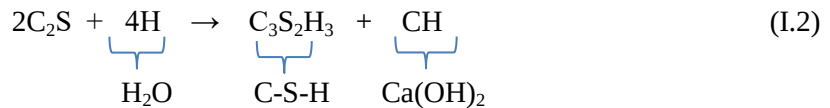
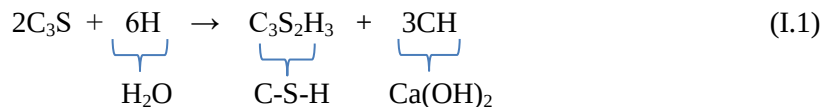
Limbah industri *slag* nikel sebagaimana yang dilaporkan oleh Soegiri, dkk. (1997), memiliki potensi sebagai bahan pengganti sebagian porsi semen dalam campuran beton. Hal ini ditunjukkan oleh kandungan senyawa kimia $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ yang melebihi 70%. Reaksi pozzolanik antara senyawa kimia silika oksida (SiO_2) dengan kalsium hidroksida (CH) produk reaksi hidrasi trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S) semen, akan memberikan tambahan kekuatan beton berupa kalsium silikat hidrat baru ($\text{CSH}_{\text{sekunder}}$). Dengan bahan substitusi *slag* nikel, kesempatan hidup mikroorganisme di dalam beton diharapkan dapat berkurang karena efek pengecilan pori dan efek pozzolani.

Perlu disadari bahwa hingga saat ini, informasi mengenai dampak intrusi mikroorganisme pada material beton masih sangat terbatas kita peroleh. Dalam era 1990-an, beberapa peneliti seperti Popesku dan Beshea (1990), Cookson (1995), Islander (1999), dan Covino (1999), hanya melaporkan perihal keberadaan mikroorganisme di dalam beton, bahkan dari laporan tersebut ada yang bersifat dugaan. Artinya, era tersebut masih sebatas titik awal bagi beberapa peneliti untuk mempelajari dan mengkaji fenomena mikroorganisme di dalam material beton. Kemudian pada awal tahun 2000-an, keberadaan mikroorganisme di dalam material beton sudah telah dibuktikan oleh beberapa peneliti seperti Muethel (2001), Pedersen,

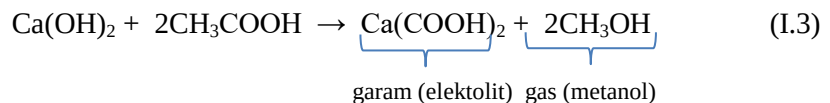
K. (2001) dan Hernandez, dkk. (2002), namun belum secara substansial menggambarkan dampaknya terhadap material beton.

Fenomena kerusakan komponen struktur beton akibat invasi mikroorganisme terjadi karena adanya interaksi antara bio-kimia dan sifat fisik material beton. Mikroorganisme memiliki perilaku metabolisme seperti makhluk hidup pada umumnya. Mereka mengambil atau mengasimilasi zat-zat makanan dan membuang sisa-sisa yang tidak diperlukan. Selama proses ini, mikroorganisme dapat menghasilkan gas dan zat-zat asam. Gas-gas yang dihasilkan dari proses metabolisme tersebut dapat berupa karbon dioksida, metana, hidrogen, hidrogen sulfida, nitrogen, atau amoniak. Sedangkan zat-zat asam yang dihasilkannya meliputi asam sulfat, asam nitrat, asam susu, asam cuka, dan asam lemak (Waluyo, 2005 dan Pedersen, 2005).

Salah satu sumber nutrisi untuk mikroorganisme dalam beton adalah unsur kalsium. Unsur ini terdapat di dalam kalsium hidroksida (CH) dan kalsium silikat hidrat (CSH), yang merupakan produk reaksi hidrasi dari trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S) semen dengan air.



Jika proses metabolisme mikroorganisme dapat berlangsung di dalam material beton, maka perlu kita konfirmasi apakah proses tersebut akan berdampak negatif terhadap perilaku fisik dan mekanik beton. Hal ini dapat digambarkan dalam salah satu contoh kasus di mana zat hasil dari metabolisme mikroorganisme adalah asam asetat (CH_3COOH) yang kemudian bereaksi dengan kalsium hidroksida di dalam beton akan menghasilkan garam elektrolit dan gas etanol.



Mikroorganisme dalam proses metabolisme akan membongkar garam elektrolit untuk mengambil ion kalsium sebagai bahan nutrisi mereka, kemudian sisa penggunaannya akan dibuang lalu menghasilkan zat baru, sebagaimana pada Persamaan I.4 dan I.5.

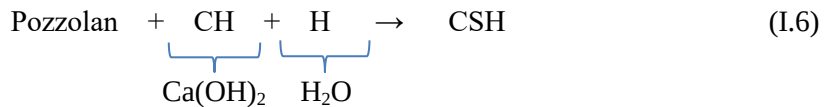


Persamaan I.3 hingga I.5 merupakan gambaran proses metabolisme mikroorganisme di dalam material beton.

Persamaan (I.1 dan I.2) menunjukkan, bahwa kalsium hidroksida (CH) yang diproduksi oleh trikalsium silikat (C_3S) ternyata tiga kali lebih banyak daripada dikalsium silikat (C_2S). Kondisi ini tentu menjadi kontradiktif dengan fungsi trikalsium silikat (C_3S) sebagai kontributor utama bagi kekuatan beton jika kita mengaitkannya dengan konteks sumber nutrisi bagi mikroorganisme di dalam material beton.

Oleh karena itu, dalam hal ini kita perlu tahu tentang bagaimana mengendalikan produk sampingan kalsium hidroksida (CH) agar dampak intrusi mikroorganisme pada material beton dapat diminimalisasikan. Sederhananya, pengendalian dampak intrusi mikroorganisme di sini ialah dengan melakukan minimisasi endapan kalsium hidroksida di dalam material beton. Minimalisasi ini bukan berarti mengurangi kuantitas secara fisik, melainkan tentang bagaimana mengubah sifatnya yang semula hanya sebagai endapan yang *porous* dan sumber nutrisi bagi mikroorganisme menjadi kontributif terhadap perilaku fisik dan mekanik beton.

Dengan mengadopsi beberapa laporan riset terdahulu, kita akan mencoba mengkaji modifikasi sifat kalsium hidroksida (CH) menggunakan salah satu limbah industri dalam negeri, yaitu limbah nikel PT International Nickel Indonesia (PT INCO). Limbah yang dimaksud telah dibuktikan oleh riset sebelumnya yang dilakukan Soegiri, dkk. (1997). Maka dari itu, dasar pemikiran modifikasi sifat kalsium hidroksida (CH) yang akan kita gunakan sebagai landasan adalah sebagai berikut:



Persamaan (I.6) menunjukkan bahwa kalsium hidroksida (CH) akan berubah menjadi kalsium silika hidrat (CSH) setelah bereaksi dengan bahan pozzolanik dan air. Perubahan ini bersifat kontributif terhadap perilaku mekanik dan fisik material beton.

Selain itu, dalam pembahasan lebih lanjut juga kita akan mengidentifikasi prosedur formulasi penggunaan limbah nikel secara optimal sebagai bahan pozzolan agar mampu mengubah kalsium hidroksida (CH) menjadi kalsium silikat hidrat (CSH) sekunder pada beton. Dengan begitu, selain memberikan efek pozzolanik sebagaimana dalam Persamaan (I.6), formulasi tersebut juga akan memberikan efek fisik berupa penyelimutan (*packing effect*). Efek ini memungkinkan dapat diperoleh melalui penggunaan bahan pozzolanik (limbah nikel) dengan ukuran partikel yang lebih halus daripada partikel semen. Efek inilah yang akan berdampak pada mengecilnya pori-pori beton, sehingga beton menjadi lebih padat (*impermeable*).

Terkait dengan golongan mikroorganisme, penulis melalui buku ini akan fokus pada golongan yang tumbuh pada media air kelapa sebagai representasi dari kejadian-kejadian yang sudah disebutkan di atas. Identifikasi yang dimaksud berupa konfirmasi apakah mereka dapat hidup dan berkembang di dalam material beton serta pengaruhnya terhadap perilaku fisik dan mekanik beton. Selain itu, kita juga akan sama-sama membahas tentang degradasi fisik dan mekanik beton akibat intrusi mikroorganisme, serta sejauh mana kontribusi *slag* nikel serta pengaruh mutu beton terhadap degradasi tersebut. Dan tentu yang terakhir ialah mengenai perubahan-perubahan yang terjadi terhadap produk kalsium hidroksida (CH) dan kalsium silikat hidrat (CSH) beton terintrusi mikroorganisme serta optimasi penggunaan *slag* nikel dalam campuran beton pada kondisi lingkungan agresif.

Reaksi hidrasi trikalsium silikat dan dikalsium silikat semen dengan air menghasilkan gel kalsium silikat hidrat dan kalsium hidroksida pada dasarnya memberikan kekuatan pada beton. Namun, senyawa kimia ini,

terutama kalsium hidroksida, dapat menjadi sumber nutrisi bagi mikroorganisme, terutama jika beton memiliki pori-pori yang memungkinkan mikroorganisme untuk hidup dan melakukan metabolisme di dalamnya. Kalsium hidroksida mudah larut dibandingkan dengan kalsium silikat hidrat, sehingga mikroorganisme cenderung menggunakannya sebagai sumber nutrisi utama yang mudah diakses dan diuraikan untuk mengambil unsur kalsium.

Salah satu cara untuk mengatasi hal ini adalah dengan meningkatkan kualitas beton dan mengurangi kalsium hidroksida (CH) yang dihasilkan dari reaksi hidrasi trikalsium silikat (C3S) dan dikalsium silikat (C₂S) semen. Ini dapat dilakukan dengan menggunakan material yang menghasilkan beton dengan porositas kecil dan mampu mengubah kalsium hidroksida menjadi kalsium silikat hidrat melalui reaksi pozzolanik. Salah satu material yang berpotensi untuk ini adalah limbah nikel atau *slag* nikel (Soegiri, dkk., 1997).

Berdasarkan konsep atau teori di atas, kita dapat menduga bahwa mikroorganisme seperti ini dapat hidup dan berkembang di dalam material beton karena ketersediaan kalsium hidroksida, dan hal ini dapat merugikan perilaku fisik dan mekanik beton. Penggunaan *slag* nikel memiliki potensi untuk mengurangi dampak negatif dari keberadaan mikroorganisme di dalam beton.

Perlu dipahami bahwa di dalam buku ini, penulis hanya fokus pada sub-sub pembahasan tertentu sebagai bentuk limitasi kontekstual secara umum. Pertama ialah tentang media intrusi yang digunakan, yakni air kelapa dengan fermentasi secara alamiah. Kedua, identifikasi golongan mikroorganisme yang tumbuh pada media, hanya dilakukan terhadap golongan yang dominan saja dan dinyatakan sebagai koloni mikroorganisme. Parameter korosifitas tidak dikaji dalam hal ini, kemudian *slag* nikel yang digunakan di sini ialah hasil sampingan proses peleburan (*smelting process*), bukan hasil sampingan proses pemurnian (*converting process*).

Penulis berharap buku ini nantinya dapat menjadi referensi untuk mengurangi dampak eksploitasi sumber daya alam dan lingkungan. Terutama sebagai solusi bagi kesinambungan fungsi bangunan pada kondisi terintrusi mikroorganisme dan sebagai bahan pertimbangan dan

masukan bagi pemerintah, swasta, dan seluruh komponen yang terlibat dalam dunia konstruksi, terutama dalam kaitannya dengan pembangunan infrastruktur pada kondisi lingkungan agresif, seperti pasar-pasar tradisional, bangunan bawah tanah (*basement*), dan lain-lain.

Buku ini juga diharapkan menjadi bahan masukan bagi industri produsen semen dan industri beton pracetak dalam negeri, untuk memanfaatkan limbah nikel sebagai bahan alternatif substitusi semen dalam campuran beton serta menjadi bahan kajian investasi dalam bidang industri produsen mortar siap pakai (mortar instan), sehingga akan tercipta lapangan kerja baru.

BAGIAN II

Konsep Hubungan Intrusi Mikroorganisme dan Ketahanan Material Beton

Apa itu Mikroorganisme?

Mikroorganisme adalah makhluk hidup kecil yang tidak bisa kita lihat dengan mata telanjang. Bentuk dan ukuran mereka bervariasi antara satu kelompok dengan kelompok lainnya. Dunia mikroorganisme melibatkan berbagai jenis organisme kecil, sebagian besar bersel tunggal atau uniseluler, dengan beberapa memiliki ciri-ciri mirip sel tumbuhan, hewan, atau keduanya.

Sebelumnya, para ahli biologi cenderung menggolongkan semua makhluk mikro menjadi dunia tumbuhan atau dunia hewan dan hal ini menimbulkan beberapa ketidaksesuaian. Sebagai contoh, jamur, meskipun dianggap sebagai tumbuhan karena biasanya tidak bergerak, sebenarnya memiliki perbedaan yang signifikan dari tumbuhan dan lebih terkait dengan protozoa.

Ernst Haeckel pada tahun 1866 mengusulkan pembentukan dunia terpisah yang disebut protista untuk menyertakan alga, protozoa, jamur (fungi), dan bakteri. Namun, penemuan baru menggunakan teknik mikroskopi elektron menunjukkan bahwa bakteri memiliki struktur sel yang fundamental berbeda dengan alga, protozoa, dan jamur. Kelompok terakhir memiliki struktur sel yang lebih maju, yang disebut eukariotik, sementara bakteri memiliki struktur sel yang lebih primitif, dikenal sebagai prokariotik.

Mikroorganisme, selain sebagian besar bersel tunggal (uniseluler), mereka juga dapat membentuk filamen atau serat, yang merupakan rangkaian sel dua atau lebih yang membentuk rantai, seperti yang

umumnya terjadi pada jamur dan mikroalga. Bentuk lainnya adalah koloni, di mana dua sel atau lebih bergabung dalam satu ruang.

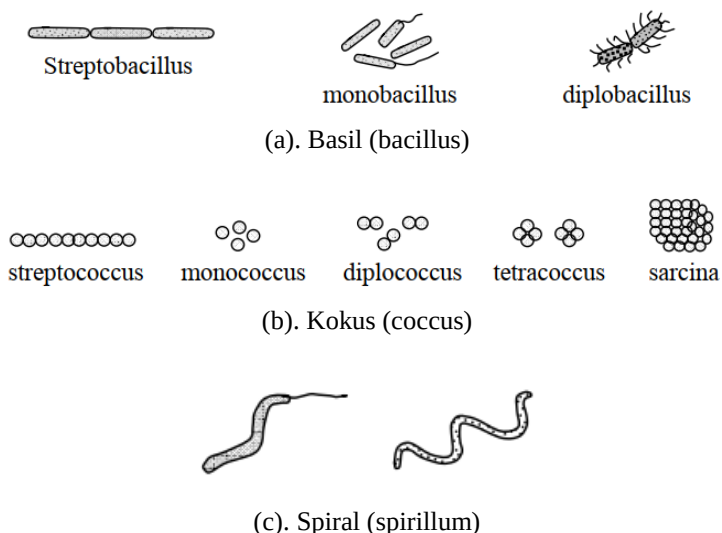
Morfologi Bakteri

Ukuran tubuh bakteri umumnya sangat kecil. Lebar tubuh mereka yakni antara 1 hingga 2 μm , panjang antara 2 hingga 5 μm . Bakteri yang berbentuk kokus, umumnya berdiameter antara 0,5 hingga 2,5 μm . Sedangkan bakteri yang berbentuk basil, umumnya memiliki ukuran lebar antara 0,2 hingga 2,0 μm .

Secara garis besar, morfologi bakteri dapat dikelompokkan ke dalam tiga golongan, yakni:

- (1). Basil (bacillus)
- (2). Kokus (coccus)
- (3). Spiril (spirillum)

Basil (bacillus) merupakan bakteri berbentuk tongkat pendek (batang kecil) dan silindris. Kokus adalah bakteri berbentuk bulat seperti bola-bola kecil, sedangkan spiril adalah bakteri yang berbentuk spiral. Gambaran morfologi ketiga golongan bakteri ini dapat dilihat pada Gambar II.1.



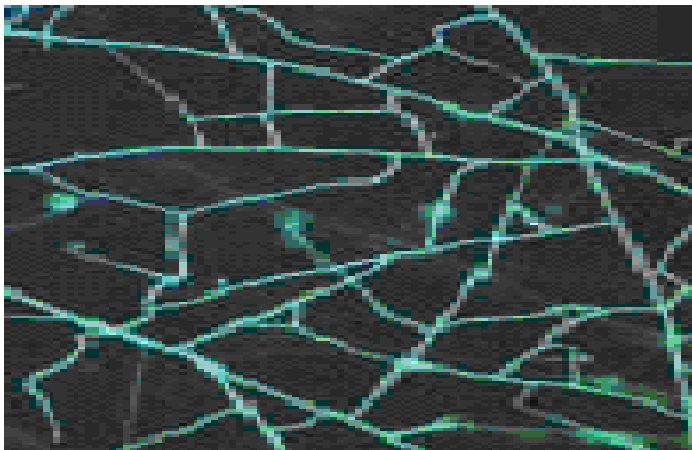
Gambar II.1. Morfologi bakteri

Morfologi Jamur (Fungi)

Jamur (fungi) memiliki ciri yang khas, yakni benang tunggal atau bercabang-cabang yang disebut dengan hifa. Hifa merupakan bagian penting dari fungi yang berfungsi sebagai pengabsorpsi nutrisi dari substrat serta membentuk struktur untuk reproduksi. Bentuk hifa ini dapat dilihat pada Gambar II.2.

Fungi merupakan organisme eukariotik dengan ciri-ciri sebagai berikut:

- (1). Mempunyai spora
- (2). Memproduksi spora
- (3). Tidak mempunyai klorofil sehingga tidak berfotosintesis
- (4). Dapat berkembang biak secara seksual dan asexual
- (5). Tubuh berfilamen dan dinding sel mengandung kitin, glukukan, selulosa, dan manan



Gambar II.2. Bentuk hifa pada fungi (Sand, 2004)

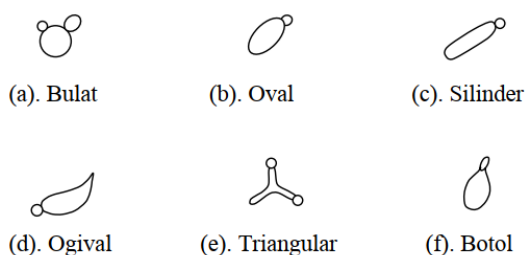
Fungi memiliki kemampuan untuk menyintesis protein dengan menggunakan sumber karbon dari karbohidrat seperti glukosa, sukrosa, dan maltosa. Mereka juga memanfaatkan sumber nitrogen dari bahan organik atau anorganik, serta mineral dari substrat tempat mereka tumbuh.

Fungi dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama, yaitu kapang dan khamir. Kapang memiliki struktur berfilamen atau miselium, sementara khamir merupakan fungi bersel tunggal dan tidak berfilamen.

Kapang memiliki bagian tubuh yang mencolok, yaitu miselium yang terbentuk dari kumpulan hifa yang bercabang-cabang dan membentuk jala berwarna putih. Diameter hifa biasanya berkisar antara 3 hingga 30 μm (Carlile dan Watkinson, 1994). Sebagian besar kapang bersifat mesofilik, artinya mereka dapat tumbuh dengan baik pada suhu kamar. Suhu optimum pertumbuhannya adalah sekitar 25-30°C, tetapi beberapa di antaranya dapat tumbuh pada suhu 35-37°C atau lebih, misalnya *aspergillus*. Dalam pertumbuhannya, semua kapang bersifat aerobik dan dapat tumbuh dengan baik pada kisaran pH antara 2,0 hingga 8,5.

Nagai, dkk. (1998) dalam risetnya tentang distribusi kapang di hutan mangrove melaporkan adanya ada kapang yang tumbuh dengan sangat baik pada pH 10,0. Kelompok kapang ini disebut sebagai kapang indigenous alkalofilik, termasuk golongan *Acremonium furcatum* dan *Acremonium strictum*.

Khamir sendiri memiliki ukuran sel yang bervariasi yaitu dengan panjang 1-25 μm , dan lebar 1-10 μm . Bentuk khamir bermacam-macam, ada yang berbentuk bulat, oval, silinder, ogival, triangular, dan ada pula yang berbentuk botol, seperti pada Gambar II.3.



Gambar II.3. Berbagai bentuk sel khamir

Interval suhu untuk pertumbuhan khamir umumnya hampir sama dengan kapang, yaitu optimum di antara 25 hingga 30°C dan maksimum di antara 35 hingga 47°C. Sebagian besar khamir lebih cepat tumbuh pada pH 4,0 hingga 4,5, dan tidak dapat tumbuh dengan baik pada medium alkali, kecuali jika mereka telah beradaptasi. Khamir tumbuh baik pada kondisi aerobik, tetapi yang bersifat fermentasi dapat tumbuh secara anaerobik meskipun relatif lambat.

Nutrien dan Fase Pertumbuhan Fungi

Dalam mikrobiologi, pertumbuhan didefinisikan sebagai peningkatan volume sel karena adanya penambahan protoplasma dan senyawa asam nukleat yang melibatkan sintesis DNA dan pembelahan mitosis. Semua jenis mikroorganisme, termasuk fungi, memerlukan nutrisi seperti karbon (C), nitrogen (N), sulfur (S), fosfor (P), kalium (K), magnesium (Mg), natrium (Na), kalsium (Ca), nutrisi mikro (besi, mangan, seng, dan kobalt), dan vitamin.

Mengamati nutrisi-nutrisi tersebut, mikroorganisme, terutama jamur (fungi), sangat mungkin dapat hidup di dalam material beton karena sebagian unsur nutrisinya, seperti kalsium (Ca), oksigen (O), magnesium (Mg), *ferrum* (Fe), dan sulfur (S), terdapat dalam material beton. Kalsium (Ca) dan oksigen (O) berasal dari kalsium silikat hidrat (CSH), kalsium hidroksida (CH), dan ettringite (CASH). Unsur *ferrum* (Fe) berasal dari kalsium sulfo aluminat ferrit (CSAF), sementara magnesium (Mg) dan sulfur (S) berasal dari komponen semen yang tidak membentuk kristal atau bersifat amorf.

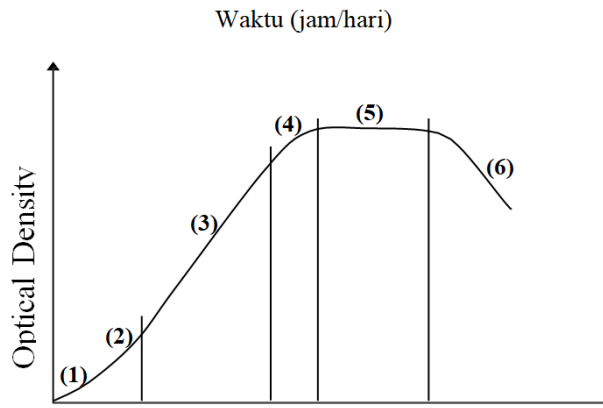
Seperti mikroorganisme lainnya, fungi dalam proses pertumbuhannya mengalami beberapa fase sebagai berikut:

- (1). Fase lag, yaitu fase penyesuaian diri sel-sel dengan substrat dan kondisi lingkungan di sekitarnya.
- (2). Fase akselerasi, yaitu fase lainnya sel-sel membelah dan fase lag menjadi fase aktif.
- (3). Fase eksponensial, merupakan fase memperbanyak sel yang sangat banyak, aktivitas sel meningkat dengan cepat, di mana penambahan jumlah sel mengikuti kurva eksponensial. Pada fase ini, kecepatan pertumbuhan sangat dipengaruhi oleh substratnya seperti pH, kandungan nutrisi, suhu, dan kelembaban udara. Energi yang dibutuhkan pada fase ini juga lebih banyak dibandingkan dengan fase lainnya. Sel paling sensitif terhadap kondisi lingkungan di sekitarnya.
- (4). Fase deselerasi, yaitu fase di mana sel-sel mulai kurang aktif membelah. Hal ini terjadi karena nutrisi di dalam substrat sudah berkurang atau ditemukannya zat-zat yang dapat menghambat pertumbuhan fungi. Pada fase ini pertumbuhan sel tidak stabil, tetapi

jumlah populasi masih naik. Jumlah sel yang tumbuh masih lebih banyak daripada jumlah sel yang mati.

- (5). Fase stasioner, yaitu fase di mana jumlah sel yang tumbuh dan jumlah sel yang mati relatif seimbang.
- (6). Fase kematian, yaitu jumlah sel-sel yang tidak aktif sama sekali atau mati lebih banyak dibandingkan sel-sel yang masih hidup.

Fase-fase di atas digambarkan dalam bentuk kurva pertumbuhan seperti pada Gambar II.4.



Gambar II.4. Kurva fase pertumbuhan fungi

Proses Metabolisme Mikroorganisme

Metabolisme, menurut Voet dan Voet (1995), adalah serangkaian proses kimia di dalam mikroorganisme yang bertujuan untuk memperoleh dan menggunakan energi guna melaksanakan berbagai fungsi hidupnya. Selama proses metabolisme, nutrisi diubah menjadi materi sel, energi, dan produk buangan (Bilgrami dan Verma, 1994).

Proses metabolisme terdiri dari dua jalur utama, yaitu jalur penyusunan atau pengambilan zat makanan (anabolisme) dan jalur penggunaan atau pembongkaran zat makanan (katabolisme). Pada anabolisme, senyawa kompleks dibentuk dari nutrisi sederhana yang berasal dari lingkungan. Sementara pada katabolisme, senyawa kompleks diuraikan menjadi produk yang lebih sederhana.

Aktivitas kimiawi dalam sel sangat rumit karena berbagai bahan nutrisi yang digunakan oleh sel di satu sisi dan berbagai substansi yang dihasilkan sebagai komponen sel di sisi lain. Proses penyusunan zat organik, pencernaan, dan pembongkaran zat makanan memerlukan biokatalisator yang disebut enzim. Enzim ini merupakan protein dalam bentuk koloid yang disebut apoenzim. Dalam kegiatannya, banyak enzim memerlukan bantuan koenzim, yang umumnya berupa zat anorganik seperti kalium (K), magnesium (Mg), dan *ferrum* (Fe).

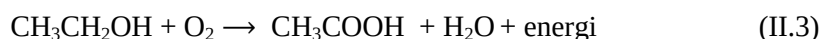
Pembongkaran zat-zat makanan oleh mikroorganisme akan menghasilkan zat baru berupa gas, air, zat organik, dan energi. Jenis dan kuantitas zat-zat yang dihasilkan ini dipengaruhi oleh substratnya. Apabila substrat yang digunakan mengandung glukosa, maka mikroorganisme khususnya golongan *sacchromycodes* akan mengoksidasi substrat menjadi alkohol dengan reaksi kimia sebagai berikut:



Dengan sistem pernapasan aerob, mikroorganisme dapat mengubah substrat glukosa menjadi sejumlah zat baru berupa gas, air, dan energi dengan reaksi kimia sebagai berikut:



Produk alkohol pada Persamaan (II.1) memiliki peran sebagai substrat sekunder bagi mikroorganisme. Dalam proses pembongkaran akan menghasilkan zat organik (asam cuka), air, dan sejumlah energi dengan reaksi kimia sebagai berikut:

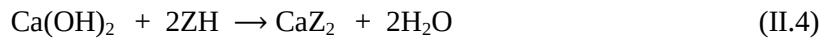


Energi yang dihasilkan di dalam Persamaan (II.1, II.2, dan II.3) berturut-turut adalah sebesar 31,2, 675, dan 116 kilo kalori (Waluyo, 2004).

Bagaimana Mikroorganisme Menyerang Material Beton?

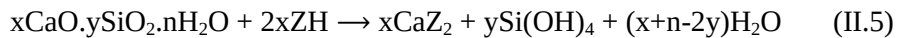
Beton cukup rentan terhadap serangan zat asam, terutama komponen kalsium hidroksida (CH). CH merupakan salah satu komponen produk hidrasi trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S) semen yang

dapat larut jika berkontak langsung dengan zat asam tersebut. Proses pelarutannya terjadi melalui mekanisme reaksi kimia sebagai berikut:



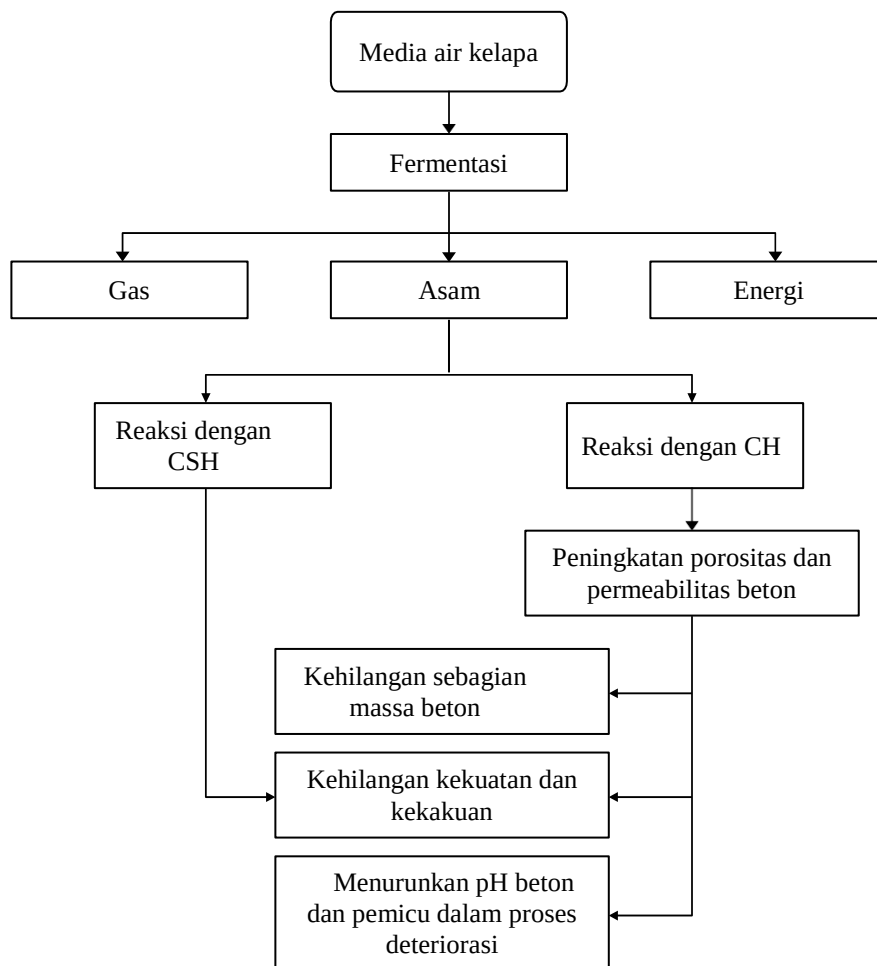
Z di sini adalah ion negatif dari zat asam.

Persamaan reaksi di atas menunjukkan, bahwa ion hidrogen akan mempercepat proses pelarutan kalsium hidroksida. Pada kondisi ini, dekomposisi material beton sangat dipengaruhi oleh porositas pasta, konsentrasi asam, dan daya larut garam kalsium. Jika konsentrasi ion hidrogen cukup tinggi, maka komponen lain dari produk hidrasi trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S) semen yaitu kalsium silikat hidrat (CSH) berpotensi ikut diserang, sehingga membentuk gel silika. Gel silika dianggap sulit dilakukan dekomposisi oleh larutan asam. Reaksi yang terjadi akibat serangan tersebut adalah sebagai berikut:



Persamaan II.4 menunjukkan bahwa serangan zat asam terhadap kalsium hidroksida (CH) akan memicu peningkatan porositas dan permeabilitas beton. Peningkatan ini umumnya terjadi karena munculnya cacat pada permukaan beton yang berimplikasi pada hilangnya sifat alkalinitas dan massa beton, menurunnya kekuatan dan kekakuan serta pH beton hingga akhirnya menjadi pemicu di dalam proses deteriorasi.

Sementara serangan terhadap kalsium silikat hidrat sebagaimana pada Persamaan II.5, akan mengakibatkan terjadinya instabilitas kalsium silikat hidrat (CSH) hingga material beton akan mengalami penurunan kekuatan dan kekakuan. Kemudian terkait penggunaan air kelapa sebagai media intrusi, hasil proses metabolik dan mekanisme serangan mikroorganisme pada material beton akan menimbulkan dampak seperti pada Gambar II.5.



Gambar II.5. Produk metabolik, mekanisme serangan dan dampaknya pada material beton

Mikroorganisme pada Material Beton

Keberadaan mikroorganisme terbukti secara ilmiah dapat ditemukan di dalam material beton, namun sampai saat ini belum ditemukan apakah mikroorganisme dapat hidup dan aktif di dalam beton. Popesku dan Beshea (1990) melaporkan, bahwa mikroorganisme, baik dari golongan bakteri maupun jamur sangat mungkin hadir dan hidup di dalam material beton. Agresivitas kedua golongan mikroorganisme ini berpotensi menyebabkan biodeteriorasi konstruksi bangunan sipil.

Seperti bentuk kehidupan pada umumnya, hasil sampingan aktivitas metabolik dari berbagai mikroorganisme berpengaruh terhadap kondisi lingkungan di sekelilingnya. Populasi mikroorganisme dalam bentuk koloni, tergolong aktif dan dapat bertahan hidup lebih lama jika jumlah satuan bentukan koloni (colony forming unit) lebih besar dari 10^6 cfu/m³ (Cookson, 1995).

Edwards, dkk. (1997) melaporkan bahwa proses metabolisme dari dua golongan bakteri yaitu *Thiobacillus thiooxidans* (pengoksidasi sulfur) dan *Thiobacillus ferrooxidans* (pengoksidasi besi) dapat menyebabkan kerusakan secara signifikan pada infrastruktur bawah tanah.

Islander (1999) pernah melaporkan adanya kerusakan pipa beton di dalam tanah yang mungkin disebabkan oleh aktivitas metabolik mikroorganisme dari golongan pengoksidasi sulfur, seperti *Thiobacillus thiooxidans*. Unsur sulfur di dalam tanah dilaporkan telah teroksidasi oleh mikroorganisme ini menjadi asam belerang, yang kemudian mencemari pipa beton. Asam belerang ini dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida sehingga menyebabkan dekomposisi material beton.

Walaupun laporan dan penjelasan dari Islander (1999) masih bersifat dugaan, kehadiran mikroorganisme di dalam beton masih menjadi pertanyaan yang diragukan. Covino (1999) juga sepakat, bahwa peran mikroorganisme terhadap degradasi beton masih belum dapat dipastikan. Selain itu ada peneliti lain yakni Muethel (2001) yang menyatakan bahwa mikroorganisme ada di dalam beton dan dapat menyebabkan kerusakan prematur pada beton. Ia melakukan riset pada trotoar beton akibat karbonasi dan paparan air tanah yang menyebabkan pH trotoar beton menjadi lebih rendah dibandingkan dengan pH beton yang normal.

Laporan ilmiah lainnya datang dari Pedersen (2001) yang menyampaikan bahwa mikroorganisme dari golongan jamur dan bakteri, selain memproduksi asam, juga dapat menghasilkan gas di dalam beton melalui hidrolisis alkalin dengan fermentasi monomer dan oligomer. Gas yang dihasilkan dapat berupa karbon dioksida, metana, hidrogen, hidrogen sulfida, atau nitrogen. Pertumbuhan mikroorganisme sangat mungkin terjadi di dalam limbah yang telah mengeras dengan semen.

Dengan mempertimbangkan laporan Pedersen (2001) di atas, maka dapat kita pastikan di awal bahwa keberadaan karbondioksida sebagai produk sampingan biodegradasi mikroorganisme di dalam beton dapat menjadi salah satu penyebab kerusakan pada material beton. Hal ini terjadi melalui reaksi antara karbon dioksida dengan kalsium hidroksida, yang merupakan hasil sampingan dari reaksi hidrasi trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S) semen, membentuk kalsium karbonat ($CaCO_3$). Proses ini dikenal sebagai fenomena karbonasi. Salah satu ciri dampak dari fenomena ini adalah penurunan pH beton secara signifikan hingga mencapai tingkat keasaman yang tinggi.

Hernandez, dkk. (2002) juga menambahkan, bahwa di dalam beton ditemukan mikroorganisme aktif sebesar 12% dari golongan *Thiobacillus ferrooxidans* dan 42% dari golongan *Thiobacillus thiooxidans*. Sebagian besar sumber energi yang dibutuhkan oleh mikroorganisme tersebut antara lain sulfur, besi, dan karbon organik tersedia di dalam beton.

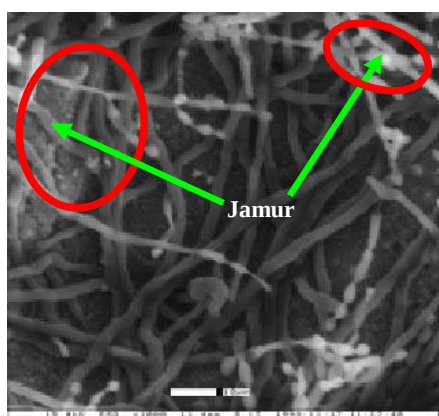
Studi relevan lainnya datang dari Shirakawa, dkk. (2003) yang melakukan pengukuran pertumbuhan mikroorganisme pada mortar menggunakan *Environment Scanning Electron Microscopy* (ESEM). Medium yang digunakan adalah jamur dari golongan *Cladysporium sphaerospermum* yang ditumbuhkan di dalam dextrose agar pada suhu 25°C dengan masa inkubasi selama lima hari. Beton berukuran 1 x 1 x 0,3 cm dibuat dalam empat jenis yang berbeda, yaitu mortar 3F, 4F, A, dan B. Shirakawa, dkk. juga menggunakan mortar 3F dan 4F berbahan semen, kapur dan pasir standar Brazil dengan perbandingan berat masing-masing adalah 1: 1,04: 10,32. Sementara mortar A dan B dibuat dari bahan siap pakai (mortar instan) yang beredar di pasaran Brazil. Kapur dan pasir memiliki ukuran butir yang sama yaitu terdiri dari empat fraksi untuk mortar 3F (2,4-1,2 mm; 1,2-0,6 mm; 0,6-0,3 mm dan 0,3-0,15 mm) dan

tiga fraksi untuk mortar 4F (1,2-0,6 mm; 0,6-0,3 mm dan 0,3-0,15 mm). Spesifikasi beton dapat dilihat pada Tabel II.1.

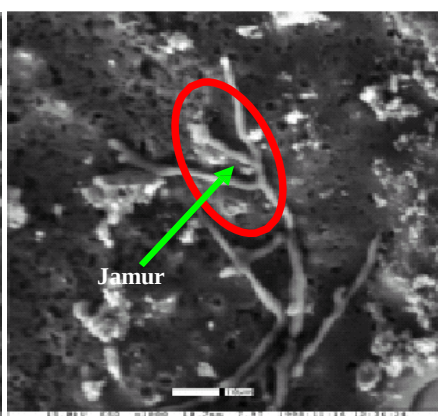
Tabel II.1. Spesifikasi beton (Shirakawa, dkk., 2003)

No.	Uraian	Kode Mortar			
		3F	4F	A	B
1	Air: Semen	2,37	2,60	2,47	2,87
2	Material kering: Air	5,20	4,74	5,00	4,31
3	Konsistensi (<i>flow table</i>), mm	260±10	260±10	380±10	310±10

Beton yang sudah diinokulasi dengan medium *Cladisporium sphaerospermum* diekspos 5% CO₂ selama 20 jam di dalam *chamber* karbon dioksida. Shirakawa, dkk. melaporkan, bahwa mortar 3F menunjukkan pertumbuhan jamur yang padat dengan ciri pertumbuhan berkelompok, struktur berbentuk tubular, dan pH di permukaan mortar $9,0 \pm 0,1$ (Gambar II.6a). Mortar 4F sendiri memiliki pertumbuhan jamur yang lebih sedikit dibandingkan 3F dengan ciri tanpa spora atau bersifat non reproduksi dengan pH $9,2 \pm 0,1$ (Gambar II.6b). Mortar A memiliki pertumbuhan jamur dengan area yang relatif sangat kecil dibandingkan dengan mortar 3F dan 4F, pH $8,6 \pm 0,2$ (Gambar II.6c), sementara untuk mortar B tidak menunjukkan adanya pertumbuhan jamur, dengan pH $10,4 \pm 0,2$ (Gambar II.6d).



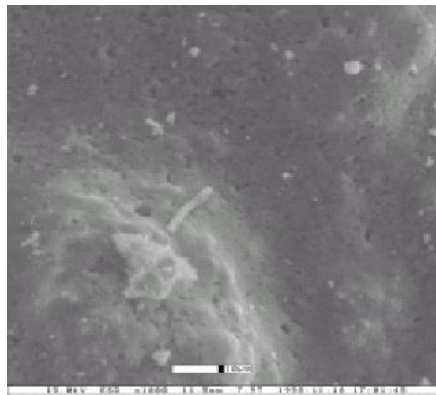
(a). Mortar 3F



(b). Mortar 4F



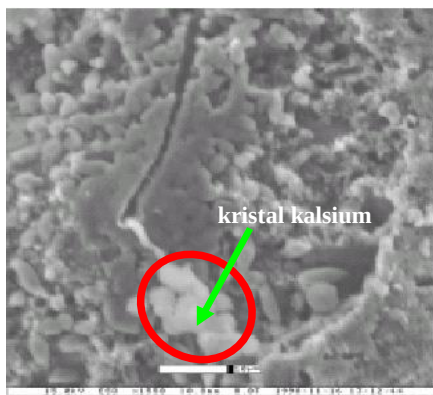
(c). Mortar A



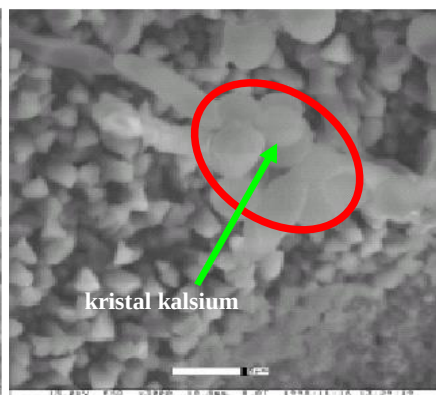
(d). Mortar B

Gambar II.6. Pertumbuhan jamur pada permukaan mortar setelah diinokulasi dengan *Cladisporium sphaerospermum* dan diekspos dengan CO₂ selama 20 jam (Shirakawa, dkk., 2003)

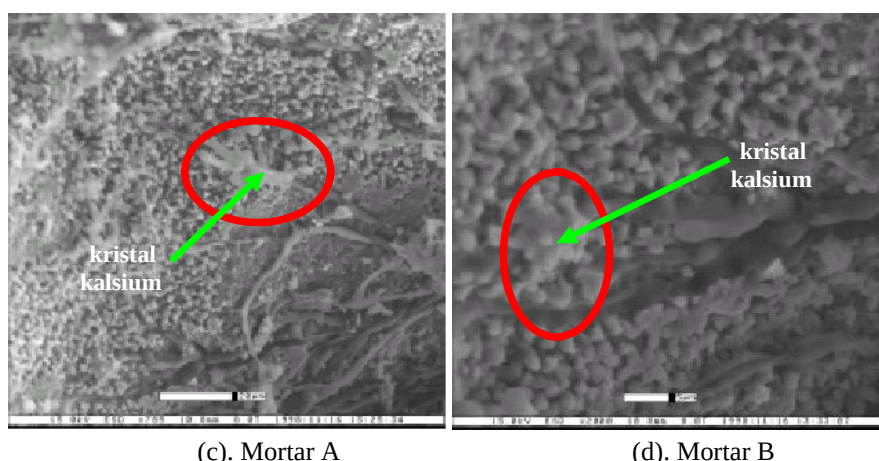
Setelah masa inkubasi selama tiga bulan pada temperatur 25°C, Shirakawa, dkk. kembali melaporkan adanya perubahan-perubahan dalam bentuk dekomposisi kalsium hidroksida. Hal ini ditunjukkan oleh pengendapan kristal kalsium pada permukaan mortar seperti yang ditunjukkan pada Gambar II.7. Penguraian kalsium terjadi akibat peran asam organik yang diproduksi selama pertumbuhan jamur. Fenomena ini menjadi indikasi penyebabnya mekanisme deteriorasi mortar.



(a). Mortar 3F



(b). Mortar 4F



Gambar II.7. Pembentukan kristal kalsium pada permukaan mortar pasca-inkubasi selama tiga bulan (Shirakawa, dkk., 2003)

Studi relevan lainnya, yakni dari Sutter dan Dam (2003), melaporkan bahwa mikroorganisme yang mengkonsumsi sulfur dapat menimbulkan degradasi dalam bentuk ekspansi sulfat sebagai hasil oksidasi sulfur menjadi asam sulfat. Begitu pun jika unsur besi dioksidasi menjadi asam besi. Secara spontan, asam besi tersebut akan mengoksidasi sulfur menjadi asam sulfat. Aktivitas mikroorganisme seperti ini akan berdampak pada ekspansi beton dalam bentuk disintegrasi pasta dan degradasi matriks beton.

DIN 4030 “*Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase*” (“*Evaluation of water, soils and gases aggressive to concrete*”) memberikan gambaran mengenai tingkat serangan dari berbagai komponen penyerang seperti pada Tabel II.2.

Tabel II.2. Tingkat serangan berbagai komponen agresor (DIN 4030)

No.	Komponen	Unit	Tingkat serangan		
			Lemah	Keras	Sangat keras
1	Pelarutan kapur bebas	mg/l	15-40	40-100	> 100
2	Asam	pH	6,5-5,5	5,5-4,5	< 4,5
3	Magnesium (Mg^{2+})	mg/l	300-1000	1000-3000	> 3000
4	Amonium (NH_4^+)	mg/l	15-30	30-60	> 60
5	2-Sulfat (SO_4)	mg/l	200-600	600-3000	> 3000

Kulpa dan Baker (1990) juga menambahkan konsep yang berhasil mereka temukan tentang urutan-urutan kejadian penyebab deteriorasi beton yang diserang oleh mikroorganisme golongan bakteri pengoksidasi sulfur sebagai berikut:

- (1). Kehadiran sumber sulfur yakni berupa unsur sulfur (S) dan hidrogen sulfur (H_2S) di dalam lingkungan.
- (2). Aktivitas bakteri pengoksidasi sulfur dalam taraf moderat pada pH netral, di mana dalam taraf ini, pH lingkungan berubah hingga mencapai pH 4-5.
- (3). Kehadiran sulfur masih berlanjut.
- (4). Nilai pH (4-5) yang memicu pertumbuhan pada bakteri golongan *Thiobacillus thiooxidans* dan *Thiobacillus ferrooxidans*.
- (5). Nilai pH turun hingga 2-3, sehingga menghasilkan asam sulfat (H_2SO_4) secara signifikan. Hadirnya asam sulfat tersebut mengakibatkan deteriorasi material beton.

Kulpa dan Baker (1990) juga memberikan indikator-indikator yang menunjukkan gejala deteriorasi material beton akibat serangan bakteri pengoksidasi sulfur sebagai berikut:

- (a). Tahap awal
 1. Nilai pH netral
 2. Nilai pH pada permukaan beton sekitar 6-4
 3. Tingkat keasaman relatif rendah
- (b). Tahap lanjutan
 1. Tingkat keasaman relatif tinggi
 2. Nilai pH pada permukaan beton umumnya di bawah 3,0
 3. Kehilangan pH netral

Ketahanan Material Beton Akibat Mikroorganisme

Seperti yang sudah kita duga di awal, bahwa ketahanan material beton akibat intrusi mikroorganisme sangat tergantung pada porositas dan kuantitas kalsium hidroksida. Karena hal inilah sudah banyak cara dilakukan untuk meningkatkan ketahanan material beton terhadap serangan produk mikroorganisme.

Hall (1989) melaporkan bahwa beton silika tahan asam yang diberi lapisan epoxy, terbukti cukup berhasil menahan serangan mikroorganisme

golongan bakteri yang mengoksidasi sulfur (*Thiobacillus thiooxidans*). Kulpa dan Baker (1990) menambahkan, bahwa deteriorasi material beton dapat terjadi karena pengaruh *Thiobacillus neapolitanus*, *Thiobacillus thiooxidans*, dan *Thiobacillus ferrooxidans*. Tingkat kerusakan yang ditimbulkan oleh ketiga golongan bakteri ini berbeda-beda bergantung pada banyaknya satuan bentukan koloni (colony forming unit) dan pH pertumbuhannya. Percobaan terhadap pipa beton menunjukkan bahwa golongan *Thiobacillus thiooxidans* memiliki kuantitas pertumbuhan yang cukup besar yaitu antara $6,0 \times 10^3$ hingga $4,5 \times 10^4$ cfu/gram, disusul oleh golongan *Thiobacillus ferrooxidans* dan *Thiobacillus neapolitanus* yaitu masing-masing antara 750 hingga 6×10^3 cfu/gram dan 40 hingga 600 cfu/gram sample. Ketiga golongan ini memiliki pH pertumbuhan berturut-turut adalah 4,5 hingga 1,0, 5,8 hingga 1,3, dan 7,0 hingga 4,0. Laporan ini hanya bersifat informatif tanpa dilanjutkan dengan penawaran alternatif solusi penanggulangannya.

Mather, dalam ACI 233R-95 (1995), menyatakan bahwa beton yang menggunakan semen tipe II dan beton dengan *ground granulated blast furnace slag* (GGBFS) mengalami penurunan kekuatan yang sama jika perawatannya dihentikan setelah 3 hari. Fulton juga melaporkan bahwa beton dengan GGBFS di atas 30% lebih rentan terhadap kondisi perawatan yang buruk dibandingkan dengan beton normal. Kerentanan ini dapat menghambat pembentukan hidrasi beton pada awalnya, yang sebenarnya diperlukan untuk kelanjutan hidrasi. Beton dengan GGBFS dan beton dengan semen tipe I dan tipe II juga dikonfirmasi memiliki ketahanan yang sama terhadap pembekuan dan pencairan. Penggunaan GGBFS di sini berkaitan dengan pengurangan permeabilitas beton, yang dapat menghambat penetrasi zat eksternal yang dapat merusak material beton.

George (1997) melakukan studi tentang ketahanan pipa beton menggunakan dua jenis semen, yaitu *ordinary portland cement* (OPC) dan *calcium aluminate cement* (CAC). Ia melaporkan, bahwa pipa beton CAC memiliki ketahanan yang lebih baik dibandingkan dengan pipa beton OPC. Hal ini disebabkan oleh sifat pelarutan produk hidrasi CAC yang lebih rendah dibandingkan dengan produk hidrasi OPC.

Belie, dkk. (1997) juga menambahkan bahwa beton yang menggunakan semen alumina tinggi (HAC) dalam lingkungan zat asam

memiliki ketahanan yang lebih baik daripada beton yang menggunakan semen biasa (OPC). Hal ini dapat dijelaskan melalui proses reaksi kimia sebagai berikut:

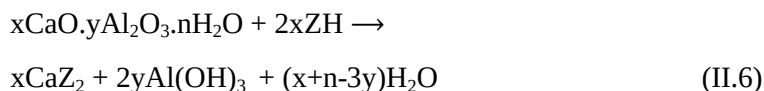
(1). Reaksi kimia OPC dengan zat asam (ZH).

Reaksi ini memiliki dua sifat yang berbeda sebagaimana Persamaan II.4 dan II.5. Pertama; reaksi kimia zat asam dengan kalsium hidroksida (serangan langsung) yang menghasilkan garam kalsium dan air (Persamaan II.4). Reaksi ini disebut dengan reaksi pelarutan kalsium hidroksida. Kedua; reaksi kimia zat asam dengan kalsium silikat hidrat yang menghasilkan garam kalsium, gel kalsium, dan air (Persamaan II.5). Reaksi ini disebut sebagai reaksi instabilitas kalsium silikat hidrat sebab masih menyisakan komponen yang tidak terdekomposisi oleh zat asam tersebut yaitu gel silika (Si(OH)_4).

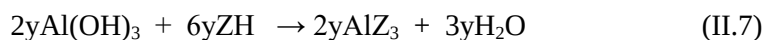
(2). Reaksi kimia HAC dengan zat asam (ZH)

Fenomena pada reaksi ini ialah dekomposisi *calcium aluminate hidrate* (CAH) dan kemungkinan dekomposisi lanjut pada gel aluminium hidroksida (Al(OH)_3).

(a). Dekomposisi *calcium aluminate hidrate* terjadi melalui reaksi kimia sebagai berikut:



(b). Dekomposisi aluminium hidroksida terjadi jika pH larutan di bawah 4,0 dengan reaksi kimia sebagai berikut:



Pernyataan-pernyataan di atas secara tidak langsung menunjukkan, bahwa ketahanan beton HAC disebabkan oleh tidak adanya kalsium hidroksida sebagai produk reaksi hidrasi senyawa-senyawa utama HAC dengan air, sehingga yang terjadi hanya dekomposisi kalsium aluminat hidrat (bukan pelarutan). Robson (1992) dalam hal ini menjelaskan, bahwa beton dengan semen alumina tinggi (HAC) lebih tahan terhadap pelarutan zat asam daripada beton OPC. Selain tidak adanya kalsium hidroksida (CH), ia menganggap bahwa fenomena tersebut dipicu oleh gel alumina yang memiliki sifat protektif terhadap zat asam.

Studi relevan lainnya datang dari Berndt (2001) yang berhasil mengonfirmasi proteksi beton dari pengaruh mikrobiologi pada menara pendingin dalam rangkaian program MIC (*Microbiologically Influenced Corrosion*). Beton yang dibuat Berndt memiliki spesifikasi material sebagai berikut:

- Semen *type V* (tahan sulfat) dan semen *type I* (*ordinary Portland cement*) sebagai kontrol,
- Pasir dan batu silika sesuai ASTM C33 dengan ukuran nominal 9,5 mm,
- Sodium naphthalene sulphonate superplasticizer,
- Rasio air-semen (w/c) adalah 0,40,
- Bahan suplemen sebagai pengganti parsial semen yaitu *silica fume* 5% dan 10% dari total berat semen, dan *blast furnace slag* 40% dan 60% dari total berat semen,
- Proporsi campuran seperti tercantum dalam Tabel II.3.

Pemeriksaan ketahanan beton dilakukan Berndt sesuai standar ASTM C868. Ia menggunakan medium *Thiobacillus ferrooxidans*. Niali pH rata-rata medium di awal adalah 2,59 dengan konsentrasi koloni mikroba sebesar 10^5 cfu/ml sampai dengan 10^6 cfu/ml. Temperatur medium dipertahankan pada 40°C dan temperatur luar tercatat sebesar 30,4°C. Durasi dari langkah ini dilakukan selama 60 hari hingga menghasilkan beberapa hal sebagai berikut:

- (1). Penggunaan bahan-bahan suplemen yang bersifat *cementitious* (*silica fume* dan *blast furnace slag*) sangat cocok sebagai antisipasi pengaruh mikrobiologi (*Microbiologically Influenced Corrosion*) pada struktur beton menara pendingin.
- (2). Beton dengan semen *type I* dan *type V* sangat rentan terhadap serangan, sebagaimana cacat permukaan yang ditunjukkan pada Gambar II.8.
- (3). Secara visual, deteriorasi serius terjadi pada beton dengan semen *type V*.
- (4). Beton dengan *silica fume* 5% sampai 10% memiliki ketahanan terhadap pengaruh mikrobiologi (MIC), tetapi tidak bisa menghilangkan serangan.

- (5).Beton dengan 40% *slag* memiliki durabilitas yang lebih baik dibandingkan beton semen *type I* dan *type V*.
- (6).Pada level serangan yang sama, beton dengan 40% *slag* memiliki cacat permukaan yang lebih ringan dibandingkan dengan beton *silica fume*.
- (7).Penambahan kadar *slag* 60% sebagai pengganti sebagian porsi semen mampu mengurangi ketahanan beton terhadap serangan mikrobiologi dan cacat-cacat yang terjadi lebih meluas di atas permukaan beton.

Tabel II.3. Proporsi Campuran Beton MIC (Berndt, 2001)

Material	<i>Type I</i>	<i>Type V</i>	5% <i>Silica Fume</i>	10% <i>Silica Fume</i>	40% <i>Slag</i>	60% <i>Slag</i>
<i>Cement type I</i> (kg/m ³)	348,4		340,0	322,2	208,3	138,7
<i>Cement type V</i> (kg/m ³)		348,9				
<i>Silica Fume</i> (kg/m ³)			17,9	35,8		
<i>Blast Furnace Slag</i> (kg/m ³)					138,9	208,0
Air (kg/m ³)	139,4	139,5	143,2	143,2	138,9	138,7
Agregat halus (kg/m ³)	824,6	824,7	846,1	846,1	820,6	819,5
Agregat kasar (kg/m ³)	918,6	919,9	943,7	943,7	915,3	914,1
Superplasticizer (ltr/m ³)	3,49	3,49	3,58	3,58	3,47	3,47
<i>Unit weight</i> (kg/m ³)	2230	2233	2291	2258	2222	2219
Kuat tekan 28 hari (MPa)	40,9±1,0	36,1±1,0	45,0±1,3	47,9±0,8	50,8±0,4	35,4±1,8



(a). Beton dengan semen type V



(b). Beton dengan *silica fume* 10%

Gambar II.8. Kondisi permukaan beton pascaserangan *Thiobacillus ferrooxidans* (Berndt, 2001)

Aviam, dkk. (2004) dalam studinya melaporkan, bahwa stabilitas semen dalam lingkungan yang agresif dapat terganggu oleh bakteri pengoksidasi sulfur yang mengubah sulfur menjadi asam sulfur. Bakteri ini dikenal sebagai penyebab utama korosi baja dan degradasi beton. Senyawa sulfur yang dioksidasi oleh *chemoautotrophs* menghasilkan asam sulfur, yang dapat serius merusak beton dan menyebabkan korosi. Reaksi asam sulfur dengan kapur bebas (CH) dalam beton membentuk gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), yang dapat merusak permukaan beton dan memicu

degradasi jika menembus pori-pori beton. Gypsum yang terbentuk juga dapat bereaksi dengan kalsium aluminat, menyebabkan kerusakan lebih lanjut di dalam beton. Aviam, dkk. (2004) juga melaporkan bahwa bentuk kerusakan akibat reaksi antara gypsum dan kalsium aluminat adalah kehilangan berat di atas 16% setelah 39 hari.

Selain itu ada studi relevan lainnya yang datang dari Tremper (1989) tentang pengaruh larutan asam terhadap dekomposisi material beton, yang berarti pelarutan kapur bebas di dalam beton. Beberapa kesimpulan yang dihasilkan Tremper antara lain:

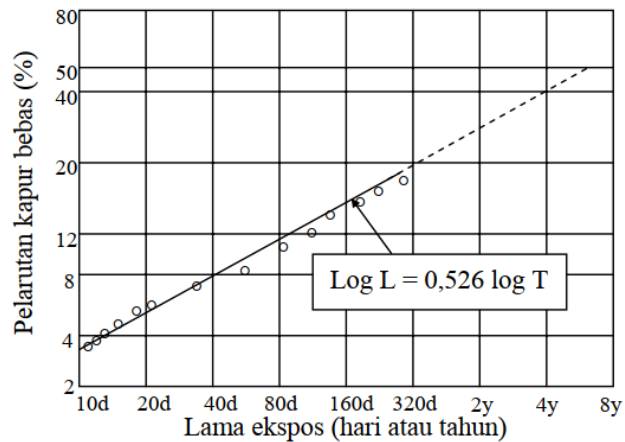
- (1). Beton mutu tinggi lebih tahan terhadap serangan asam dibandingkan dengan beton mutu rendah.
- (2). Kekuatan beton terserang larutan asam bergantung pada rasio antara jumlah air dengan jumlah kapur bebas di dalam beton.
- (3). Kehilangan kapur bebas merupakan penyebab turunnya kekuatan beton. Jika beton mengalami kehilangan kapur bebas $\geq 50\%$ dari aslinya, maka kekuatan beton akan berkurang serta kehilangan daya lekat.
- (4). Tingkat serangan sangat dipengaruhi oleh rasio antara luas permukaan dan volume beton.

Persentase pelarutan kapur bebas dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

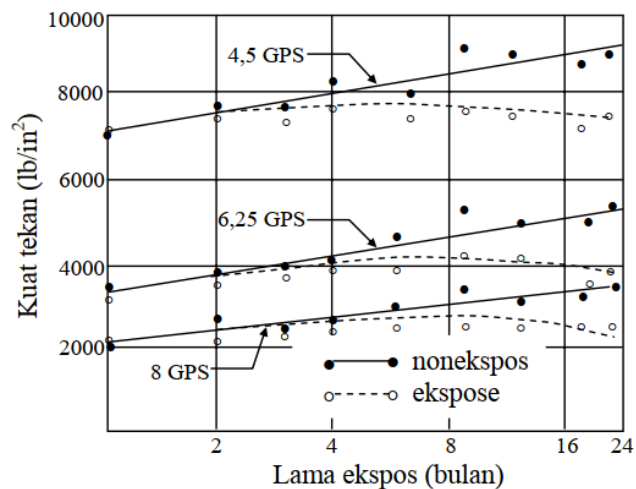
$$\text{Log } L = K \log T \quad (\text{II.8})$$

L di atas adalah pelarutan kapur bebas (%), T adalah waktu ekspos beton dengan larutan asam (hari), dan K adalah konstanta.

Tremper (1989) dalam hal ini menunjukkan bahwa pelarutan kapur bebas 50% dari aslinya terjadi dengan lama waktu ekspos sekitar empat setengah tahun. Konstanta K di dalam Persamaan II.8 diperoleh dari regresi linier yaitu sebesar 0,526 sebagaimana Gambar II.9. Perubahan-perubahan kuat tekan beton selama diekspos larutan asam dapat dipelajari pada Gambar II.10.



Gambar II.9. Hubungan antara pelarutan kapur bebas dengan lama ekspos larutan asam (Tremper, 1989)

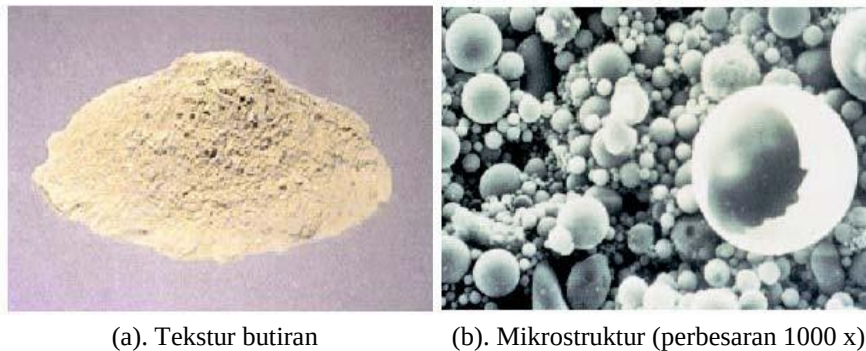


Gambar II.10. Hubungan antara kuat tekan dengan lama ekspos di dalam larutan asam (Tremper, 1989)

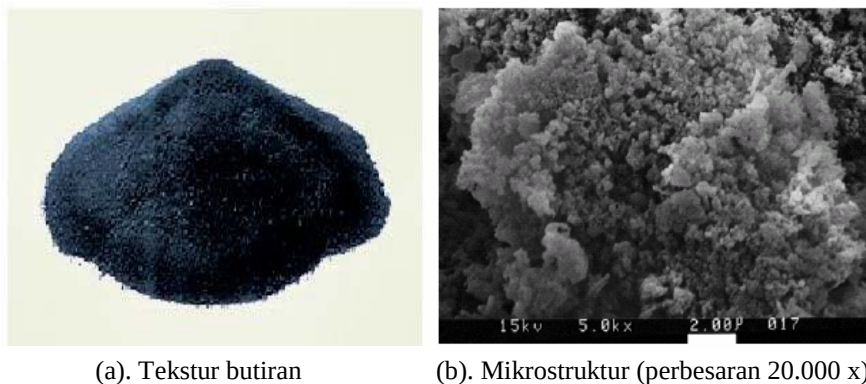
Apa Saja Bahan-Bahan Suplemen Campuran Beton?

Penggunaan bahan tambahan dalam campuran beton yang berasal dari limbah industri telah menjadi tren di Amerika Utara sejak tahun 1970-an. Penggunaan ini diharapkan dapat memberikan karakteristik khusus

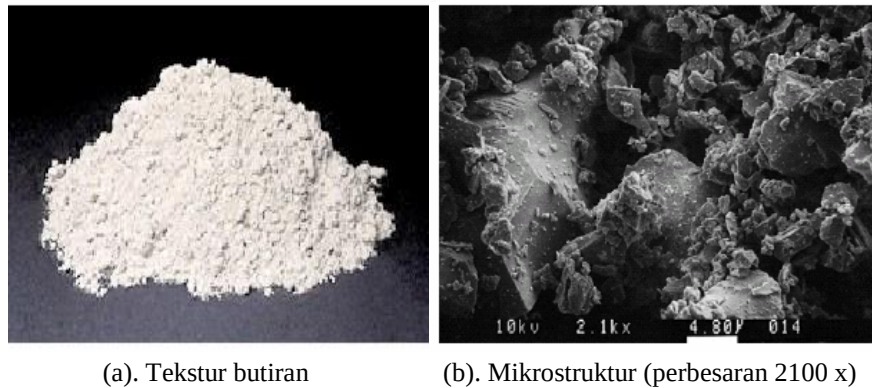
pada beton, terutama terkait dengan keawetan. Jumlah yang optimal dari bahan ini tergantung pada kebutuhan dan prioritas karakteristik beton yang diinginkan. Beberapa limbah industri yang umum digunakan sebagai bahan tambahan dalam campuran beton meliputi *fly ash*, *silica fume*, *blast furnace slag*, dan bahan pozzolanik lainnya. Bentuk butiran dari material-material ini dapat dilihat pada Gambar II.11 hingga Gambar II.13.



Gambar II.11. Tekstur butiran dan mikrostruktur *fly ash*

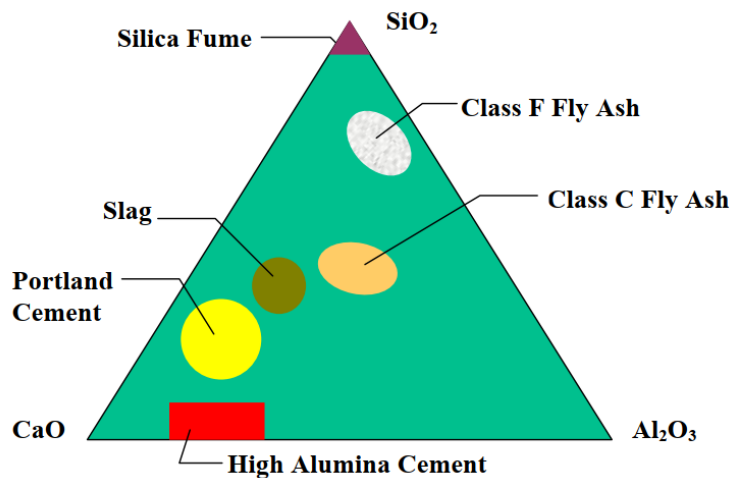


Gambar II.12. Tekstur butiran dan mikrostruktur *silica fume*



Gambar II.13. Tekstur butiran dan mikrostruktur *blast furnace slag*

Perbedaan mendasar dari berbagai material suplemen dapat digambarkan dalam diagram fase sistem ternary $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (C-A-S) sebagaimana Gambar II.14.



Gambar II.14. Material suplemen dalam diagram fase sistem ternary C-A-S

Komposisi kimia dari bahan-bahan di atas bervariasi untuk setiap negara industri produsen masing-masing limbah tersebut. Komposisi kimia yang dicantumkan pada Tabel II.4 diperoleh berdasarkan hasil studi

bertajuk “Virginia Transportation Research Council” yang dilaporkan oleh Lane dan Ozyildirim (1999).

Tabel II.4. Komposisi kimia berbagai material *cementitious*
(Lane dan Ozyildirim, 1999)

Komposisi	<i>Fly ash</i> Klas C	<i>Fly ash</i> Klas F	<i>Slag</i>	<i>Silica fume</i>
SiO ₂ , %	35,0	53,0	37,60	94,60
Al ₂ O ₃ , %	18,0	31,3	3,30	0,30
Fe ₂ O ₃ , %	6,0	5,6	0,40	0,10
CaO, %	21,0	1,0	17,60	0,50
MgO, %	0,26	0,5	11,20	0,40
SO ₃ , %	4,10	0,54	1,94	-
Na ₂ O, %	5,80	0,22	0,22	0,15
K ₂ O, %	0,70	1,77	0,34	0,56
Total alkali, %	6,26	1,36	-	0,52
LoI, %	0,50	1,50	1,0	-

Selain digunakan sebagai material dalam campuran beton, limbah-limbah industri di atas juga menjadi solusi alternatif penanggulangan dampak lingkungan. Karena itulah limbah industri tersebut dikategorikan sebagai “*green materials*” (Anderson, dkk., 2004).

Slag Nikel sebagai Bahan Suplemen Campuran Beton

Slag nikel merupakan hasil sampingan proses produksi nikel yang diperoleh dari hasil peleburan bijih laterit pada temperatur $\pm 1300^{\circ}\text{C}$. Bijih laterit memiliki komposisi kimia sebagai berikut:

- Nikel (Ni) : 1,4-2,5%
- Besi (Fe) : 16-44%
- Magnesium oksida (MgO) : 3-25%
- Silika dioksida (SiO₂) : 7-35%

Slag nikel juga dapat diperoleh dari hasil pemurnian nikel (*nickel matte*) dengan kuantitas yang jauh lebih sedikit dibandingkan dengan *slag* nikel dari hasil peleburan bijih laterir. Gambar II.15 merupakan gambaran dari proses produksi nikel (*nickel matte*) dan *slag* nikel yang tahapannya terdiri dari:

(1). Penambangan (*Mining*)

(2). Persiapan bahan (*material preparation*)

Bijih laterit dari *stock pile* diangkut ke pabrik kemudian dikeringkan di dalam mesin pengering (*dryer*). Setelah itu dilakukan penyaringan beberapa kali untuk mendapatkan bijih laterit dengan ukuran ± 4 inch (± 10 cm). Bijih laterit diangkut dengan *belt conveyor* dan dicampur hingga merata menggunakan *traveling tripper* dan *blending stacker* yang terletak di dalam bangunan gudang bijih (*dry ore storage building*). Alat *stacker* menumpukkan bijih ke lantai baris demi baris, lapisan demi lapisan yang sama tebalnya. Bijih yang tertumpuk dalam bentuk-bentuk seperti ini diambil dengan *loader* dari arah yang tegak lurus dengan baris-baris bijih yang tertumpuk tersebut. Langkah ini dilakukan agar bijih yang telah dicampur mengandung kadar nikel yang merata.

(3). Proses reduksi dan sulfidasi (*reduction and sulfidation process*)

Bijih laterit yang telah dicampur merata diangkut ke dalam *kiln* yang berputar dengan suhu $\pm 700^{\circ}\text{C}$. Proses ini dilakukan untuk mendapatkan reaksi pereduksian bijih sebab adanya penambahan oli. Reaksi pensulfidasi nikel yang disebabkan oleh penambahan sulfur, terjadi setelah hasil reduksi (*calcine*) keluar dari *kiln* dan masuk ke dalam *surge bin*. Produksi yang dikeluarkan dari *reduction kiln* disebut reduksi calcine.

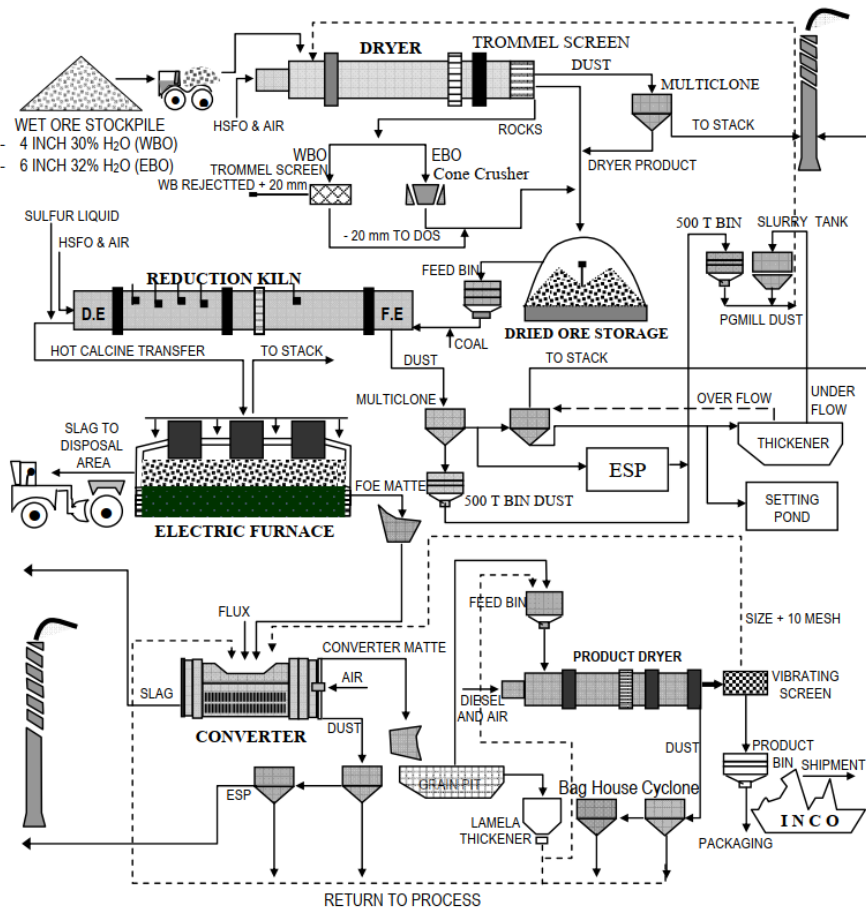
(4). Proses peleburan (*smelting process*)

Reduksi calcine dimasukkan ke dalam tanur listrik (*electric furnace*). Bahan dilebur pada temperatur $\pm 1300^{\circ}\text{C}$ untuk membentuk nickel matte (mengandung $\pm 25\%$ nikel) dan bahan-bahan yang terbuang (*slag*). Matte dan *slag* dapat dipisahkan dengan mudah karena *slag* terapung di atas matte yang mencair. Produksi *slag* pada tahap ini bisa mencapai 2 hingga 3 juta ton per tahun.

(5). Proses pemurnian (*converting process*)

Nickel matte dari *furnace* yang mengandung $\pm 25\%$ nikel diolah lebih lanjut di dalam converter. Besi yang terkandung dioksidasi dengan penambahan silica flux sehingga kadar nikel menjadi bertambah sampai jumlah standar yaitu 75% nikel. Nikel selanjutnya digranulasi, dikeringkan, ditimbang, dan dikemas

sedemikian sehingga menjadi produk akhir (nickel matte). Seperti halnya di peleburan, proses ini juga memproduksi *slag* sebanyak ± 3000 ton per tahun.



Gambar II.15. Proses produksi nikel matte dan *slag* nikel

Sejauh ini, penggunaan *slag* nikel sebagai bagian dari komponen pembentuk beton belum mendapatkan perhatian yang serius, meskipun studi-studi sebelumnya sudah mengonfirmasi, bahwa *slag* nikel memiliki potensi untuk digunakan dalam produksi beton. Misalnya Soegiri, dkk. (1997) yang menegaskan bahwa sifat-sifat mekanik beton mutu tinggi

dengan menggunakan *slag* nikel sebagai agregat kasar relatif lebih baik dibandingkan dengan beton yang menggunakan agregat kasar alami.

Kemudian ada Khosama (1997) yang melaporkan bahwa penggunaan *slag* nikel sebagai agregat kasar dan halus pada beton mutu tinggi menunjukkan tingkat kelecakan (nilai slump), perilaku fisik, dan mekanik yang lebih baik daripada beton dengan agregat alami. Selain itu, retak mikro pada daerah antar permukaan (*interface zone*) beton *slag* nikel lebih kecil dibandingkan dengan beton agregat alam.

Ashad (1998) juga menambahkan, bahwa *slag* nikel dalam bentuk bubuk memiliki potensi sebagai pengganti sebagian semen dalam campuran beton. Dengan substitusi sebesar 10 hingga 20%, bubuk *slag* nikel dengan *specific surface* 306 m²/kg memberikan kontribusi positif terhadap sifat-sifat fisik dan mekanik beton, serta menunjukkan ketahanan terhadap kondisi lingkungan basah-kering (*wet-dry environment*).

Louis (2003) juga melakukan studi yang serupa terkait penggunaan terak nikel sebagai agregat beton pemberat pipa gas lepas pantai. Terak nikel padat yang digunakan oleh Louis hingga menghasilkan beton dengan berat jenis 3267 kg/m³, kuat tekan 28 hari sebesar 50,77 MPa, dan absorpsi sebesar 0,61%. Ia menyimpulkan, bahwa beton tersebut mampu menjaga stabilitas posisi pipa dalam menghadapi gaya apung dan gaya lainnya yang timbul akibat pergerakan air di dasar laut, seperti gaya geser, inersia, dan seret.

Kita perlu juga mengenal ASTM C618-93 yang mengatur tentang penggunaan limbah-limbah industri yang disebutkan di atas sebagai mineral tambahan di dalam campuran beton. Salah satunya ialah jika jumlah dari komposisi kimia SiO₂, Fe₂O₃ dan Al₂O₃ lebih besar atau sama dengan 70%, maka bahan tersebut dapat digunakan sebagai mineral campuran di dalam beton.

Efektivitas penggunaan *slag* sebagai bahan *cementitious* dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor sebagai berikut:

- (a). Komposisi kimia
- (b). Konsentrasi alkali dari sistem reaksi
- (c). Kadar glass
- (d). Kehalusan
- (e). Suhu selama fase awal proses hidrasi

Mengingat kompleksnya faktor-faktor tersebut di atas, Bijen (1996) mengusulkan kriteria yang dapat dijadikan sebagai indikasi sifat *cementitious*. Kriteria yang dimaksud disebut dengan kriteria modulus kimia dengan konsep matematis sebagai berikut:

$$\frac{Ca + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} \leq 1 \quad (II.9)$$

Dari Persamaan (II.9) kita melihat, bahwa dari keempat senyawa kimia yang diperhitungkan, senyawa silika oksida (SiO_2) merupakan senyawa dominan yang diharapkan. Hal ini berkaitan dengan potensi SiO_2 yang bereaksi dengan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) sebagai produk sampingan reaksi hidrasi trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S) semen. Kriteria modulus kimia ini dianggap masih kontroversial penggunaannya sebab belum cukup menggambarkan secara pasti sifat *cementitious* dari bahan yang diamati.

Maka dari itulah perlu dilakukan evaluasi secara langsung terhadap kelecakan, karakteristik kekuatan dan *durability* sebagai pengukuran yang lebih realistis dalam menilai potensi *slag* sebagai bahan *cementitious*. ASTM C989 dalam hal ini mendefinisikan potensi *slag* sebagai bahan *cementitious* dalam bentuk kinerja yaitu indeks aktivitas *slag* (*slag activity index*) sebagai berikut:

$$Slag \ activity \ index = \frac{SP}{P} \times 100\% \quad (II.10)$$

SP di sini artinya kuat tekan rata-rata mortar semen + *slag* (MPa), dan P adalah kuat tekan rata-rata mortar semen (MPa).

ASTM C989 mengatur indeks aktivitas *slag* (*slag activity index*) minimum ke dalam tiga mutu (*grade*) yang berbeda sebagaimana Tabel II.5.

Tabel II.5. *Slag activity index* minimum menurut ASTM C989

Mutu	<i>Slag Activity Index</i> Minimum (%)	
	Rata-rata lima contoh	Satu contoh
Index 7 hari		
Grade 80	-	-
Grade 100	75	70
Grade 120	95	90

Mutu	Slag Activity Index Minimum (%)	
	Rata-rata lima contoh	Satu contoh
Index 28 hari		
Grade 80	75	70
Grade 100	95	90
Grade 120	115	110

Dari tabel di atas, kita dapat mengasumsikan bahwa penggunaan 20% bubuk *slag* nikel dapat memberikan *slag activity index* 7 dan 28 hari masing-masing 72,14% dan 86,07% (Ashad, 1998). Selain itu, ASTM C989 juga dapat memberikan kriteria tambahan mengenai batasan total alkali sebagai berikut:

$$\text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O} < 0,6 \quad (\text{II.11})$$

Wang dan Emery (2004) pernah mengusulkan dua bentuk kriteria utilisasi *slag* yaitu kriteria berdasarkan sifat-sifat fisis dan kriteria tegangan volumetrik. Kriteria sifat-sifat fisis dapat direpresentasikan oleh Persamaan II.12, di mana peruntukannya lebih kepada penggunaan *slag* sebagai material granular (agregat). Sementara kriteria tegangan volumetrik (Persamaan II.13) diperuntukkan dalam penggunaan *slag* sebagai komponen matriks beton.

$$F \leq k \frac{(\gamma_s - \gamma_o)}{\gamma_s^2} \times 100\% \quad (\text{II.12})$$

F di sini adalah kadar oksida ($\text{CaO} + \text{MgO}$) *slag*, γ_s adalah *specific gravity slag*, γ_o adalah *bulk density slag*, dan k adalah konstanta sifat-sifat fisis *slag*. Jika kadar oksida ($\text{CaO} + \text{MgO}$) yang dimiliki oleh *slag* lebih kecil dari ruas kanan Persamaan II.12, *slag* tidak akan mengembang secara makroskopik jika digunakan sebagai material granular (agregat).

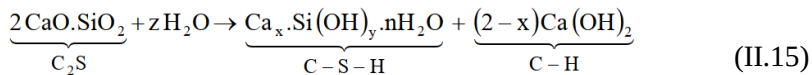
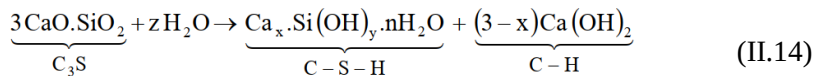
$$\sigma_d = k \frac{\pi d \sigma_c}{R \phi} \leq \sigma \quad (\text{II.13})$$

Notasi σ_d adalah tegangan tarik maksimum *slag* (N/m^2), k adalah faktor keamanan lebih besar dari satu, d adalah ukuran partikel *slag*, R adalah rasio retak partikel, σ_c adalah tegangan ekspansi volumetrik (N/m^3), ϕ adalah faktor isi *slag* dan σ adalah tegangan izin tarik.

Proporsi Campuran Semen dan Bubuk *Slag* Nikel

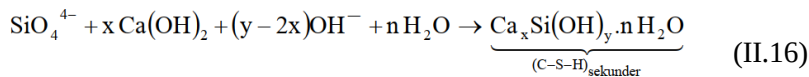
Livingston dan Bumrongjaroen (2005) pernah mengusulkan metode pendekatan untuk menentukan proporsi campuran antara *silica fume*, *fly ash*, dan semen dalam pembuatan beton kinerja tinggi. Pendekatan ini mengacu pada prinsip keseimbangan gabungan mineral yang diadopsi dari konsep termodinamika geokimia (*geochemical thermodynamic*). Pendekatan ini juga bersifat *chemographics* dengan melibatkan parameter-parameter senyawa kimia CaO , SiO_2 , dan Al_2O_3 dari bahan yang akan digabungkan.

Hal pertama yang dilakukan di dalam pendekatan ini ialah dengan merepresentasikan reaksi kimia dalam diagram fase yang tepat. Reaksi utama hidrasi semen direpresentasikan oleh komponen utama yaitu trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S), sebagaimana Persamaan II.14 dan II.15.

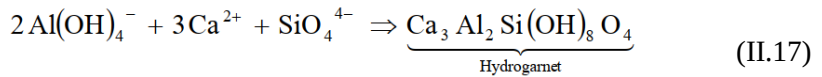


Unsur x pada kedua persamaan di atas adalah rasio C/S , di mana nilainya bervariasi antara satu referensi dengan referensi lainnya. Taylor (1997) menetapkan harga $\text{C/S} = 1,65$. Siddique (2000) menetapkan harga $\text{C/S} = 1,60$, sedangkan Mindess dan Young (1981) adalah 1,5-2,0.

Reaksi trikalsium Silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S) dengan air (H_2O) selain menghasilkan gel kalsium silikat hidrat (CSH), juga memberikan hasil sampingan yaitu kalsium hidroksida (CH). Adanya material pozzolanik dini akan memberikan tambahan ion silika yang bereaksi dengan kalsium hidroksida (CH) sehingga membentuk gel kalsium silikat hidrat (CSH) sekunder, sebagaimana Persamaan II.16.



Selain itu, unsur aluminium (Al) pada material pozzolanik juga dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida (CH) sehingga membentuk fase hydrogarnet (CASH), seperti terlihat pada Persamaan II.17.



Livingston dan Bumrongjaroen (2005) menggunakan harga C/S (x) yaitu 1,65 di dalam C-S-H dan C/S = 3, A/S = 1 di dalam hydrogarnet dan nol di dalam CH, sehingga komponen dari gabungan mineral tersebut diperoleh sebagai berikut:

$$\left. \begin{aligned} S &= 1.S_{\text{CSH}} + 1.S_{\text{Hydrogarnet}} \\ C &= 1.65.S_{\text{CSH}} + 3.S_{\text{Hydrogarnet}} \\ A &= 0.S_{\text{CSH}} + 1.S_{\text{Hydrogarnet}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.18})$$

Apabila kita melihat diagram fase sistem ternary, kita akan menyadari bahwa keseimbangan gabungan mineral tersebut merupakan penjumlahan dari komponen-komponen di dalam Persamaan II.18, yaitu:

$$C + S + A = 1 \quad (\text{II.19})$$

Solusi dari Persamaan II.19 adalah sebagai berikut:

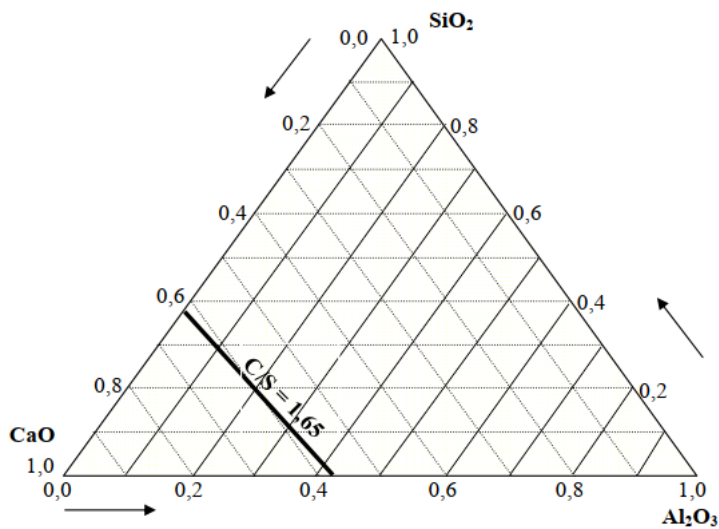
$$A = (1 - 2,65S) / 2,35 \quad (\text{II.20})$$

Persamaan II.20 digambarkan dalam diagram fase sistem ternary sebagai garis keseimbangan gabungan mineral tanpa kandungan kalsium hidroksida (CH = 0), sebagaimana Gambar II.16.

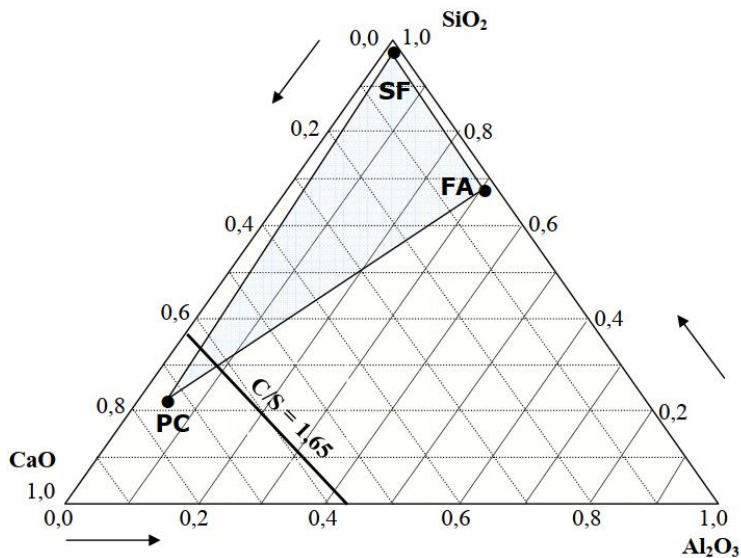
Berikutnya ialah tentang komposisi kimia CaO, Al₂O₃ dan SiO₂ dari bahan yang akan digabungkan, misalnya semen, *fly ash*, dan *silica fume*, diplot ke dalam diagram fase sistem ternary tersebut. Dari penggabungan tersebut maka akan terbentuk daerah penggabungan mineral, seperti ditunjukkan pada Gambar II.17.

Dengan perbandingan tertentu antara *fly ash* dan *silica fume*, misalnya 1: 1, maka diperoleh garis penggabungan mineral (Gambar II.18). Titik perpotongan antara garis penggabungan mineral tersebut dengan garis keseimbangan menurut Persamaan II.20, merupakan titik yang menunjukkan proporsi optimum campuran antara semen, *fly ash*, dan

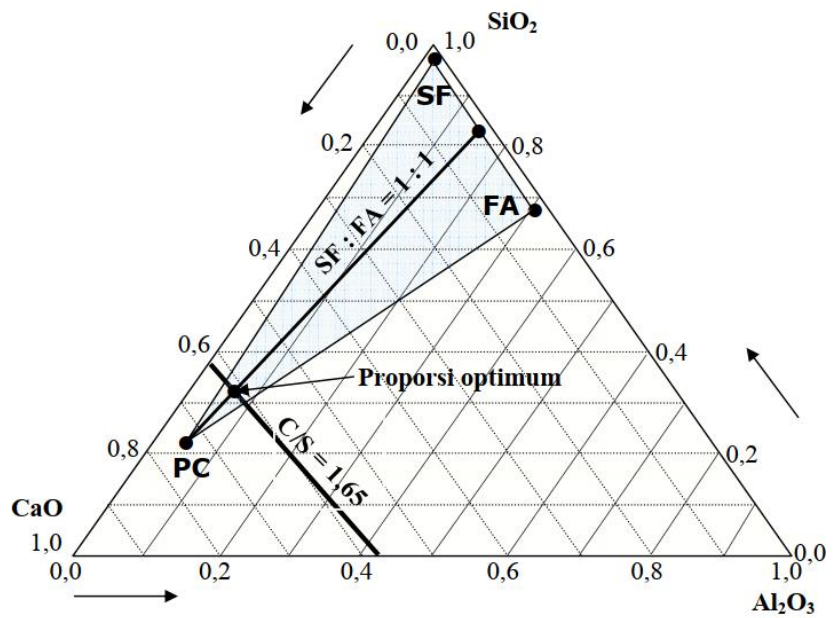
silica fume dengan produk akhir tanpa kalsium hidroksida (CH).



Gambar II.16. Garis keseimbangan gabungan mineral sistem ternary C-A-S



Gambar II.17. Daerah gabungan mineral semen, *fly ash*, dan *silica fume*



Gambar II.18. Garis pencampuran dengan rasio SF/FS = 1

BAGIAN III

Pemeriksaan Ketahanan Material Beton dari Serangan Mikroorganisme

Perlu dipahami bersama, bahwa buku ini disusun atas dasar pendekatan praktis yang secara ilmiah diproyeksikan untuk mengetahui sejauh mana dampak yang ditimbulkan akibat intrusi mikroorganisme pada material beton dan juga kontribusi bubuk *slag* nikel di dalam mengurangi dampak tersebut. Pada bab ini kita akan sama-sama membahas tentang bagaimana material penyusun beton, media intrusi, proses produksi bubuk *slag* nikel, parameter pemeriksaan, dan desain komposisi bahan penyusun beton. Termasuk juga tentang model perlakuan beton terintrusi mikroorganisme, prosedur pemeriksaan dan pengukuran serta nomenklatur beton.

Material yang Digunakan

Semen dan Bubuk *Slag* Nikel

Semen yang digunakan adalah semen tipe I merek Tiga Roda. *Slag* nikel yang digunakan berasal dari proses peleburan bijih laterit. *Slag* nikel ini muncul sebagai bongkahan dengan tekstur butiran berpori dan padat. Dalam hal ini, kita fokus pada *slag* nikel dengan tekstur butiran padat. Untuk membuat bubuk *slag* nikel, dilakukan penggilingan dan penyaringan di laboratorium dengan langkah-langkah berikut:

- (a). Memisahkan *slag* nikel antara butiran yang padat dan berpori.
- (b). Mencuci *slag* nikel berbutir padat hingga bersih kemudian dikeringkan hingga kadar airnya konstan (siap giling).
- (c). Menggiling *slag* nikel hingga halus menggunakan mesin pemecah batu
- (d). (*mini crusher machine*). Penyaringan butiran *slag* nikel halus dengan saringan No. 200 (# 75 μm). Bahan yang lolos dari saringan ini disebut sebagai bubuk *slag* nikel.

Sifat-sifat fisik dan kimiawi kedua bahan tersebut di atas dapat dilihat pada Tabel III.1.

Tabel III.1 Sifat-sifat fisis dan kimiawi semen dan bubuk *slag* nikel

No.	Uraian	Satuan	Semen <i>type</i> I	Bubuk <i>slag</i> nikel
1	<i>Specific gravity</i>	-	3,15	3,36
2	<i>Specific surface</i>	m ² /kg	291	306
3	Kadar air	%	0,59	0,32
4	SiO ₂	%	21,20	42,57
5	CaO	%	64,90	6,46
6	Al ₂ O ₃	%	6,96	3,67
7	Fe ₂ O ₃	%	3,10	25,71
8	MgO	%	1,20	12,68
9	NiO	%	0,00	4,42
10	SO ₃	%	2,10	0,29
11	Na ₂ O	%	0,00	2,29
12	K ₂ O	%	0,00	0,06
13	S	%	0,00	0,12
14	LoI	%	0,90	0,35

Agregat

Agregat halus yang digunakan di sini berasal dari pasir Galunggung, sementara agregat kasar berasal dari batu pecah Banjaran dengan ukuran maksimum 20 mm. Kami melakukan serangkaian pemeriksaan terhadap kedua jenis agregat ini. Tujuan dari langkah tersebut tidak hanya untuk menilai kualitas agregat, tetapi juga sebagai data yang digunakan dalam merancang campuran beton. Beberapa pemeriksaan yang dilakukan meliputi:

- Berat volume; standar pemeriksaan ASTM C29/C29M-91a, untuk agregat halus dan kasar.
- Specific gravity* dan absorpsi; standar pemeriksaan ASTM C128-93 untuk agregat halus dan ASTM C127-88 untuk agregat kasar.
- Gradasi; standar pemeriksaan ASTM C136-92, untuk agregat halus dan kasar.
- Kadar air; standar pemeriksaan ASTM C566-89, untuk agregat halus dan kasar.
- Kadar lumpur; standar pemeriksaan ASTM C118-81 untuk agregat

halus dan ASTM C117-90 untuk agregat kasar.

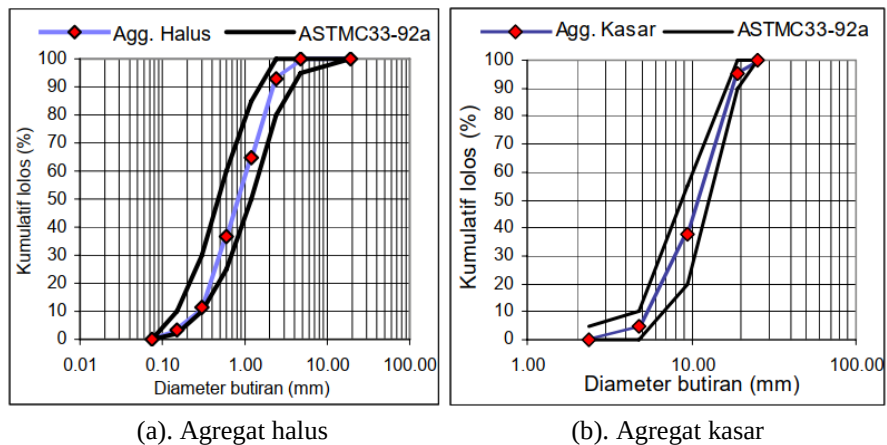
- (f). Kadar organik; standar pemeriksaan ASTM C40-92, untuk agregat halus.
- (g). Abrasi dengan mesin Los Angeles; standar pemeriksaan ASTM C131-89, untuk agregat kasar.

Hasil pemeriksaan-pemeriksaan di atas dapat dipelajari pada Tabel III.2.

Tabel III.2. Sifat-sifat fisik agregat halus dan kasar

No.	Parameter	Unit	Agregat Halus	Agregat Kasar			
				φ 2,4-4,76	φ 4,76-9,5	φ 9,5-19,5	φ 19,5 - 25,4
1.	Berat volume kering	(kg/m ³)	1597	1530	1551	1572	1584
2.	Kadar air	(%)	5.35	0.83	0.63	0.53	0.43
3.	<i>Specific gravity on:</i>						
	- <i>Apparent basic</i>	-	2.81	2.72	2.71	2.70	2.69
	- <i>Dry basic</i>	-	2.39	2.56	2.52	2.49	2.46
	- <i>SSD basic</i>	-	2.55	2.62	2.59	2.57	2.55
4.	<i>Water absorption</i>	(%)	5.93	2.35	2.74	3.09	3.41
5.	Kadar organik	-	rendah	-			
6.	Kadar lumpur	(%)	2.03	0.38	0.31	0.40	0.27
7.	Keausan	(%)	-	28.53			
8.	Distribusi butiran	-	Mengikuti spesifikasi ASTM C33-92a				
9.	Modulus kehalusan	-	2.91	3.63			

Distribusi butiran pada kedua jenis agregat tersebut (halus dan kasar) memperlihatkan bentuk gradasi menerus, seperti yang ditunjukkan pada Gambar III.1.



Gambar III.1. Kurva distribusi butiran agregat halus dan kasar

Bahan Tambahan Kimia (*Chemical Admixture*)

Bahan tambahan kimia yang digunakan adalah superplasticizer produk SIKA jenis Sikamen NN, dengan spesifikasi sebagai berikut:

Bahan dasar : Napthalene Formaldehyde Sulphonate
 Warna Berat : Cokelat tua
 jenis Dosis : 1,20 kg/liter
 0,80-3,0% berat semen. Dosis yang digunakan dalam penelitian ini adalah 1,5% berat semen.

Media Intrusi

Media intrusi yang digunakan dalam penelitian ini adalah air kelapa. Pemilihan air kelapa ini didasarkan pada kejadian yang telah dijelaskan pada bab I, di mana kerusakan pada bangunan pasar tradisional sering terjadi di daerah yang berkontak langsung dengan buangan air kelapa. Selain itu, air kelapa dianggap sebagai pilihan yang representatif untuk menumbuhkan mikroorganisme karena mengandung glukosa yang mudah mengalami pembusukan. Hal ini mendorong aktivitas mikroorganisme dalam memproduksi zat organik yang nantinya akan diintrusikan ke dalam pori-pori beton.

Apa Saja Parameter yang Perlu Dikonfirmasi?

Eksperimen dilakukan pada beton dengan dan tanpa penambahan bubuk *slag* nikel untuk mengkaji sifat fisik, mekanik, dan mikrostruktur beton. Termasuk juga aspek-aspek seperti porositas, permeabilitas, susut kering, kehilangan berat, kekuatan tekan, kekuatan tarik, modulus elastisitas, angka Poisson, hubungan tegangan-regangan, kuantitas kalsium silikat hidrat (CSH), dan kalsium hidroksida (CH). Eksperimen juga melibatkan intrusi mikroorganisme.

Ada beberapa parameter yang perlu kita konfirmasi atau periksa yakni kekuatan tekan rencana (f'_c), persentase bubuk *slag* nikel (X), dan kedalaman intrusi (D). Kekuatan tekan rencana (f'_c) dipilih dalam tiga kategori, yaitu 25 MPa, 40 MPa, dan 60 MPa, mewakili beton mutu normal, transisi, dan beton mutu tinggi.

Penambahan bubuk *slag* nikel bertujuan sebagai substitusi mineral semen, diharapkan memberikan kontribusi positif terhadap sifat-sifat beton yang dipelajari. Substitusi dilakukan dengan variasi persentase antara 10 hingga 20% berat semen, dengan kenaikan 2% setiap tingkatan kekuatan tekan rencana (f'_c). Pemilihan persentase didasarkan pada hasil riset sebelumnya. Sementara untuk pemilihan parameter kedalaman intrusi (D) dimaksudkan untuk mengukur sejauh mana produk mikroorganisme terintrusi ke dalam pori-pori beton sekaligus mengidentifikasi pengaruhnya terhadap perilaku mikrostruktur beton. Dalam hal ini, pengaruh tersebut diidentifikasi melalui analisis kuantitatif terhadap perubahan-perubahan senyawa kimia kalsium hidroksida (CH) dan kalsium silikat hidrat (CSH). Pengukuran dilakukan pada tiga jenis kedalaman intrusi (D) yaitu 0-25 mm, 25-50 mm, dan 50-75 mm.

Desain Komposisi Bahan Penyusun Beton

Desain komposisi campuran beton dilakukan sesuai dengan standar American Concrete Institute (ACI). Untuk beton dengan kekuatan tekan rencana (f'_c) 25 MPa dan 40 MPa, digunakan metode ACI 211.1-91 (*Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*). Sementara itu, beton dengan kekuatan tekan rencana (f'_c) 60 MPa mengikuti metode ACI 211.4R-93 (*Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete With Portland Cement and Fly Ash*).

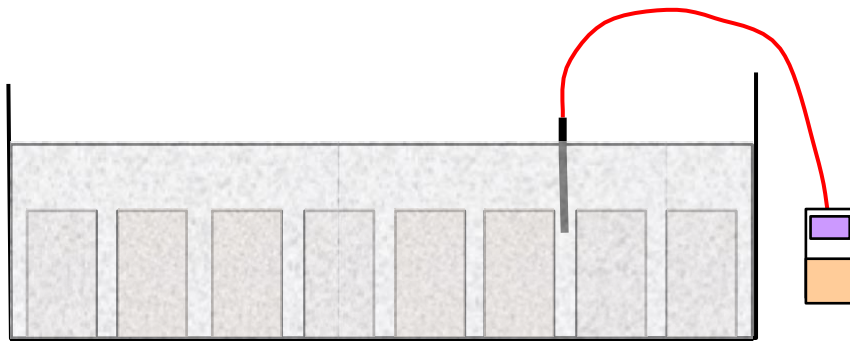
Hasil dari desain komposisi bahan penyusun beton untuk ketiga kategori kekuatan tekan rencana tersebut dapat ditemukan pada Tabel III.3.

Tabel III.3. Komposisi bahan penyusun beton

Kuat tekan rencana (MPa)	Bubuk <i>slag</i> nikel		Semen		Air (ltr)	w/c	SP (ltr)	Agregat halus (Kg)	Agregat kasar (Kg)
	(%)	(Kg)	(%)	(Kg)					
25	0	0	100	326	185	0.57	4.08	872	952
	10	32.60	90	293.40			3.67		
	12	39.12	88	286.88			3.59		
	14	45.64	86	280.36			3.50		
	16	52.16	84	273.84			3.42		
	18	58.68	82	267.32			3.34		
	20	65.20	80	260.80			3.26		
40	0	0	100	466	185	0.40	5.83	759	952
	10	46.60	90	419.40			5.24		
	12	55.92	88	410.08			5.13		
	14	65.24	86	400.76			5.01		
	16	74.56	84	391.44			4.89		
	18	83.88	82	382.12			4.78		
	20	93.20	80	372.80			4.66		
60	0	0	100	547	166	0.30	6.84	477	1,102
	10	54.70	90	492.30			6.15		
	12	65.64	88	481.36			6.02		
	14	76.58	86	470.42			5.88		
	16	87.52	84	459.48			5.74		
	18	98.46	82	448.54			5.61		
	20	109.40	80	437.60			5.47		

Model Perlakuan Beton Terintrusi Mikroorganisme

Beton diberikan perlakuan terintrusi mikroorganisme setelah mencapai sekitar 75% dari kekuatan rencana. Selama perlakuan, kami secara rutin memantau perubahan, termasuk pH medium, temperatur, dan kelembaban udara. Ini dilakukan untuk mendapatkan data yang dapat digunakan dalam analisis lebih lanjut. Model perlakuan ini dapat dipelajari pada Gambar III.2.



Gambar III.2. pH meter Model perlakuan beton terintrusi mikroorganisme

Prosedur Pemeriksaan dan Pengukuran

Pemeriksaan Kimiawi Bubuk *Slag* Nikel, Campuran Semen + Bubuk *Slag* Nikel, dan Media Intrusi

Pemeriksaan kimiawi bubuk *slag* nikel perlu kita lakukan untuk mendapatkan gambaran mengenai sifat *cementitious*, sekaligus sebagai data masukan dalam analisis optimisasi bubuk *slag* nikel dengan diagram fase sistem ternary C-A-S ($\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2$).

Pemeriksaan kimiawi campuran antara semen dan bubuk *slag* nikel juga perlu kita lakukan untuk menentukan posisi dan garis pencampuran kedua bahan ini dalam diagram fase sistem ternary C-A-S ($\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2$). Akurasi garis pencampuran dapat kita diperoleh dengan cara mencampurkan kedua bahan ini dengan persentase bubuk *slag* nikel berturut-turut ialah 10%, 15%, 20%, 30%, 40%, dan 50% terhadap berat semen. Pemeriksaan kimiawi ini dilakukan sesuai standar ASTM C114-88. Sementara itu, pemeriksaan kimiawi untuk media intrusi kita dapat lakukan untuk menggambarkan kandungan zat-zat di dalam media dan mengetahui produk yang dihasilkan selama fermentasi. pemeriksaan dilakukan dengan metode *High Performance Liquid Chromotography* (HPLC).

Konsistensi Normal dan Waktu Pengikatan

Pemeriksaan konsistensi normal material campuran antara semen dan bubuk *slag* nikel kita laksanakan untuk memperoleh gambaran

mengenai jumlah kebutuhan air dalam proses pengikatan (*setting time*). Langkah ini dilakukan sesuai standar pemeriksaan ASTM C187-86. Sedangkan pemeriksaan waktu pengikatan (*setting time*) dilakukan untuk mendapatkan gambaran laju pertambahan kekuatan beton. Metode yang diterapkan mengikuti standar pemeriksaan ASTM C191-92.

Mikrobiologi Media Intrusi

Pemeriksaan ini bertujuan untuk mengisolasi, mengidentifikasi, dan mengukur pertumbuhan mikroorganisme pada media. Proses ini dapat dilakukan di laboratorium Mikrobiologi. Penulis dalam hal ini melakukannya di Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung.

Proses isolasi dan identifikasi menggunakan media Potato Dextrose Agar (PDA) dengan metode tuang (*pour plate*) dan Acetobacter Agar (AA) dengan metode permukaan (*surface spread plate*). Isolasi dilakukan untuk mencegah kontaminasi dari lingkungan luar. Pada metode tuang (*pour plate*), media (air kelapa) sebanyak ± 1 ml dimasukkan ke dalam cawan petri, lalu ditambahkan media Potato Dextrose Agar (PDA) sebanyak 15-20 ml. Kemudian, cawan petri digoyangkan agar media menyebar di atas permukaan agar. Pada metode permukaan (*surface spread plate*), media (air kelapa) sebanyak $\pm 0,1$ ml diteteskan pada permukaan media Acetobacter Agar (AA) dan diratakan dengan batang gelas melengkung yang steril.

Setelah inkubasi, terbentuk koloni mikroorganisme dengan ciri-ciri pertumbuhan tertentu. Melalui pengamatan morfologis, mikroskopis, karakteristik koloni, karakteristik seluler, dan reaksi biokimia, identifikasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengamatan dengan ciri-ciri spesifik menurut standar literatur.

Dalam kondisi terisolir, pertumbuhan koloni mikroorganisme dan perubahan-perubahan yang terjadi dapat kita pantau setiap saat. Penulis dalam hal ini melakukan pemantauan setiap enam jam sekali hingga pertumbuhan mikroorganisme telah menunjukkan fase kematian. Pengukuran pertumbuhan mikroorganisme seperti ini dalam ilmu mikrobiologi dikenal sebagai metode hitungan cawan. Jumlah koloni dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Koloni}_{\text{per ml atau per gram}} = \text{Jumlah koloni}_{\text{per cawan}} \times \frac{1}{\text{faktor pengenceran}} \quad (\text{III.1})$$

Faktor pengenceran dalam persamaan di atas dibutuhkan jika media diperkirakan mengandung lebih dari 300 cfu/ml. Faktor pengenceran ini umum dilakukan secara desimal, yaitu 1: 10, 1: 100, 1: 1000, dan seterusnya.

Jumlah koloni mikroorganisme menurut Persamaan (III.1) ditentukan menggunakan *Standard Plate Counts* (Waluyo, 2005) sebagai berikut:

- (a). Cawan yang dipilih dan dihitung adalah cawan yang mengandung jumlah koloni antara 30 cfu/ml-300 cfu/ml. Jika jumlah koloni mikroorganisme kurang dari 30 cfu/ml, maka pengenceran yang dilakukan terlalu tinggi, demikian pula sebaliknya.
- (b). Beberapa koloni yang bergabung menjadi satu merupakan satu kumpulan koloni yang besar di mana jumlah koloninya diragukan dapat dihitung sebagai satu koloni. Satu deretan rantai koloni yang terlihat sebagai suatu garis tebal, dihitung sebagai satu koloni.
- (c). Dalam setiap pengenceran sebaiknya digunakan minimal dua cawan petri.

Pemeriksaan Beton Keras

Permeabilitas

Beton berbentuk kubus dengan ukuran 150 x 150 x 150 mm. Pemeriksaan dilakukan dalam dua kondisi berbeda, yaitu kondisi terintrusi dan tak terintrusi mikroorganisme. Prosedur dilakukan dengan mengikuti standar pemeriksaan DIN-1045. Untuk menentukan permeabilitas beton, kita mengukur kecepatan aliran air yang meresap melalui pori-pori beton.

Koefisien permeabilitas beton ditentukan menggunakan hukum Darcy sebagai berikut:

$$\frac{1}{A} \frac{dq}{dt} = k \frac{\Delta h}{L} \quad (\text{III.2})$$

Keterangan:

k = koefisien permeabilitas (m/dtk)

dq/dt = debit air yang melewati pori-pori beton (m³/dtk)

- A = luas penampang beton (m²)
 Δh = tinggi tekanan (m)
 L = ketebalan beton (m)

Porositas

Beton berbentuk kubus dengan dimensi 150 x 150 x 150 mm diperiksa dengan kondisi yang serupa dengan pemeriksaan permeabilitas sebelumnya. Metode yang digunakan mengacu pada standar pemeriksaan ASTM C642-90. Dengan menggunakan metode ini, porositas beton dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$e = \frac{B - A}{B - C} \times 100\% \quad (\text{III.3})$$

Keterangan:

- A = berat beton kering oven (gram)
 B = berat beton kering permukaan setelah direndam dan dididihkan (gram)
 C = berat beton di dalam air setelah direndam dan dididihkan (gram)

Regangan Susut

Beton berbentuk silinder dengan dimensi 150 x 300 mm diperiksa dalam kondisi tanpa intrusi mikroorganisme. Metode yang digunakan mengacu pada standar pemeriksaan ASTM C157-93. Perhitungan regangan susut menggunakan persamaan:

$$\epsilon_s = \frac{L_x - L_i}{L} \quad (\text{III.4})$$

Keterangan:

- ϵ_s = regangan susut
 L_x = pembacaan comparator pada waktu tertentu (mm)
 L_i = pembacaan awal pada comparator (mm)
 L = panjang beton (mm)

Kuat Tekan

Beton berbentuk silinder dengan dimensi 100 x 200 mm. Pemeriksaan kuat tekan beton tanpa intrusi mikroorganisme dilakukan pada berbagai umur beton, yaitu 3, 7, 14, 28, 56, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330, dan 360 hari. Sementara itu, pemeriksaan beton dengan intrusi mikroorganisme dilakukan setelah beton diberikan perlakuan intrusi mikroorganisme selama berbagai periode, yakni 14, 42, 76, 106, 136, 166, 196, 226, 256, 286, 316, dan 346 hari. Perlakuan dimulai setelah kekuatan beton diperkirakan mencapai sekitar 75% dari kekuatan rencana.

Metode pemeriksaan mengikuti standar ASTM C39-86. Pemeriksaan kita lakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan pembebanan tekan uniaksial statik monotonik dan kecepatan rata-rata 0,14-0,34 MPa/detik.

Kuat Tarik Belah

Pemeriksaan tarik belah (*splitting test*) perlu dilakukan dengan menggunakan beton berbentuk silinder berukuran 100 x 200 mm. Pemeriksaan pada beton tanpa intrusi mikroorganisme kita lakukan setelah beton berumur 28 hari. Sedangkan pemeriksaan pada beton dengan intrusi mikroorganisme dilakukan setelah perawatan normal hingga kekuatannya mencapai sekitar $\pm 75\%$ dari kekuatan rencananya, diikuti dengan intrusi mikroorganisme selama 14 hari.

Alat yang digunakan sama dengan pemeriksaan kuat tekan, dengan pembebanan berupa beban tekan di sepanjang beton dan kecepatan pembebanan rata-rata 0,011-0,023 MPa/detik. Model pemeriksaan dapat dilihat pada Gambar III.3. Prosedur pemeriksaan mengikuti standar ASTM C496-90. Kuat tarik belah dihitung dengan persamaan berikut:

$$T = \frac{2P}{\pi LD} \quad (\text{III.5})$$

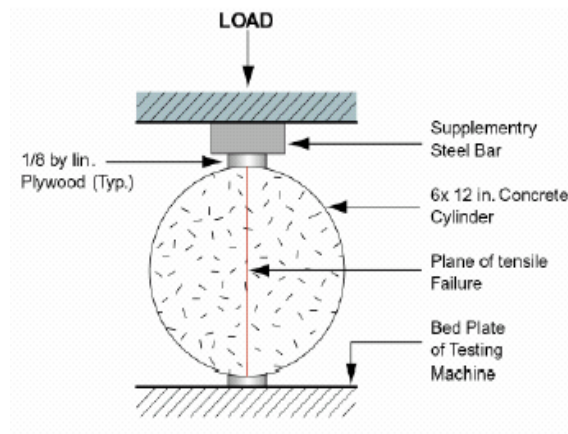
Keterangan:

T = kuat tarik belah (MPa)

P = beban maksimum (N)

L = panjang beton (mm)

D = diameter beton (mm)



Gambar III.3. Model pemeriksaan kuat tarik belah (*splitting test*)

Kuat Tarik Lentur

Beton berbentuk balok dengan dimensi 150 x 150 x 600 mm. Pemeriksaan kita lakukan pada beton tanpa intrusi dan dengan intrusi mikroorganisme pada umur pemeriksaan yang sama seperti pemeriksaan kuat tarik belah. Prosedur pemeriksaan mengikuti standar ASTM C78-84. Pembebanan dilakukan dengan beban titik di tengah bentang yang didistribusikan melalui pelat baja sehingga membentuk dua beban titik pada posisi masing-masing sepertiga panjang bentang. Kecepatan pembebanan rata-rata berkisar antara 0,014-0,020 MPa/detik. Model pemeriksaan terlihat pada Gambar III.4. Kuat tarik lentur (*modulus of rupture*) dihitung dengan persamaan berikut.

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (\text{III.6})$$

Keterangan:

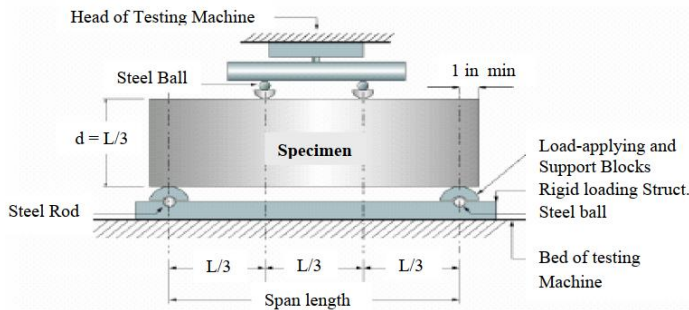
R = *modulus of rupture* (MPa)

P = beban maksimum (N)

b = lebar rata-rata beton (mm)

d = tinggi rata-rata beton (mm)

L = panjang beton (mm)



Gambar III.4. Model pemeriksaan kuat tarik lentur (*modulus of rupture*)

Modulus Elastisitas dan *Poisson's Ratio*

Bentuk, ukuran, umur, dan alat yang digunakan pada pemeriksaan ini sama dengan pemeriksaan kuat tarik belah. Prosedur pemeriksaan mengacu pada standar ASTM C469-87a. Untuk memahami hubungan antara beban dan *displacement*, digunakan LVDT (*Linier Variable Displacement Transducer*) yang terhubung ke Data Logger UCAM 70-A. Alat ini memiliki ketelitian sebesar 0,01 ton untuk pengukuran beban dan 0,001 mm untuk *displacement*. Modulus elastisitas dan *Poisson's ratio* dihitung dengan persamaan berikut:

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0,00005} \quad (\text{III.7})$$

$$\nu = \frac{\epsilon_{t2} - \epsilon_{t1}}{\epsilon_2 - 0,00005} \quad (\text{III.8})$$

Keterangan:

E_c = modulus elastisitas beton (MPa)

ν = *Poisson's ratio*

S_1 = tegangan pada saat regangan 0,00005 (MPa)

S_2 = tegangan pada kondisi 40% beban batas (MPa)

ϵ_2 = regangan longitudinal akibat tegangan S_2

ϵ_{t1} = regangan transversal pada titik tengah beton pada saat tegangan sebesar S_1

ϵ_{t2} = regangan transversal pada titik tengah beton pada saat tegangan sebesar S_2

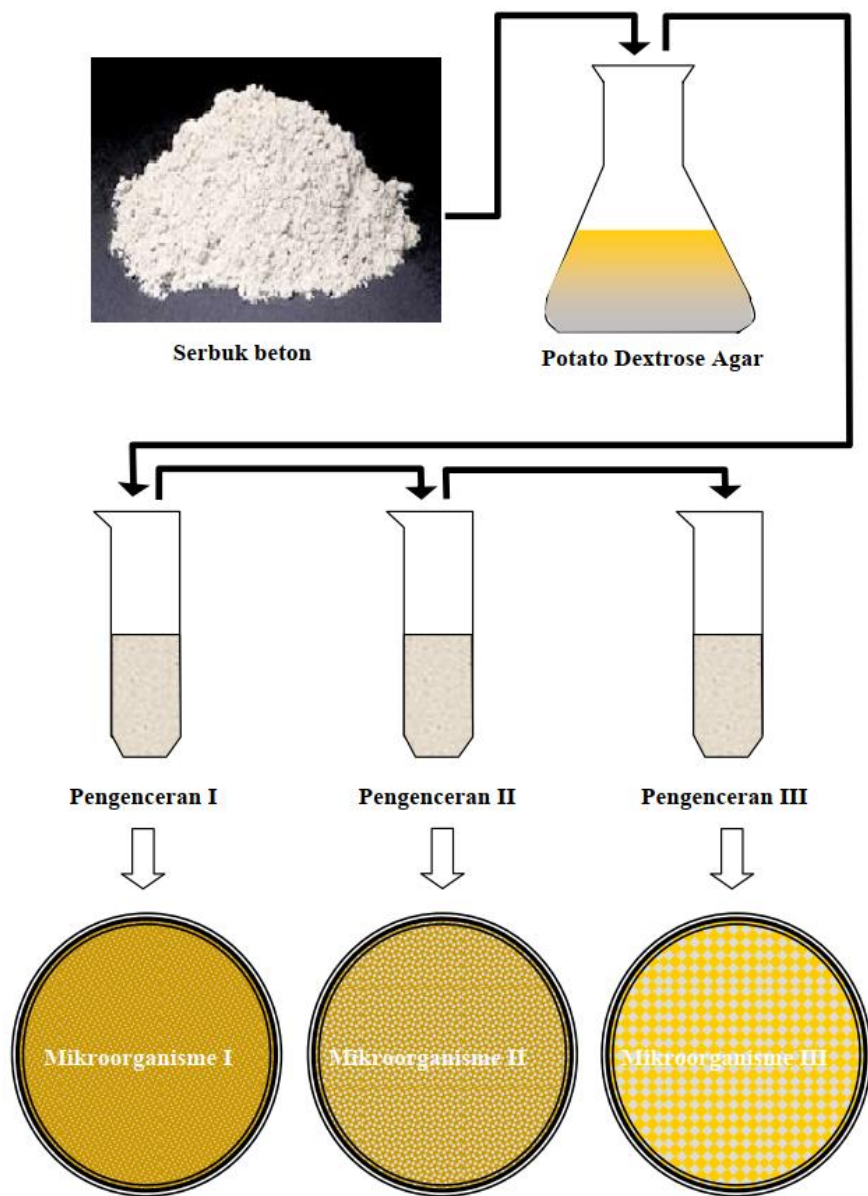
Pengukuran Mikroorganisme di dalam Beton

Untuk mengukur kuantitas mikroorganisme di dalam beton, kita perlu melakukan pengeboran pada beton dengan kedalaman 0-25 mm, 25-50 mm, dan 50-75 mm. Serbuk beton yang dihasilkan dari pengeboran kita periksa di laboratorium mikrobiologi untuk menentukan jumlah mikroorganisme dan pH-nya. Proses pengeboran dilakukan secara bersamaan dengan pemeriksaan sifat-sifat fisik dan mekanik beton.

Karena beton berbentuk serbuk beton, prosedur penentuan kuantitas mikroorganisme tidak sama seperti pada prosedur pemeriksaan media intrusi yang berbentuk cairan. Berikut adalah prosedur pemeriksaannya:

- 1) Siapkan media isolator dari bahan Potato Dextrose Agar (PDA)
 - Masukkan PDA (instan) $\pm 7,8$ gram ke dalam gelas erlenmeyer dan ditambahkan aquades ± 200 ml.
 - Panaskan sambil diaduk hingga mendidih untuk mencapai homogenitas.
 - Masukkan ke dalam autoclave selama ± 15 menit pada temperatur 121°C dengan tekanan udara 1,5 atmosfer.
- 2) Masukkan aquades ke dalam tabung reaksi ± 9 ml, lalu tutup menggunakan kapas steril.
- 3) Masukkan contoh serbuk beton ± 1 gram ke dalam gelas erlenmeyer (1.c). Pada waktu yang sama, panaskan mulut erlenmeyer lalu dikocok hingga serbuk beton terlihat menyatu dengan media. Pemanasan dilakukan untuk menghindari kontaminasi lingkungan eksternal.
- 4) Masukkan cairan dari (4) ke dalam tabung reaksi dari (3) sebanyak ± 1 ml, lalu dikocok hingga homogen.
- 5) Tuangkan cairan dari (5) ke dalam cawan petri sebanyak ± 1 ml, goyangkan sedemikian sehingga cairan menyebar ke seluruh permukaan cawan petri (pengenceran pertama). Diamkan selama ± 24 jam.
- 6) Jumlah koloni mikroorganisme dihitung sesuai Persamaan (III.1)

Jumlah koloni terbaik dari proses di atas adalah 30 sampai 300 cfu/gr (Waluyo, 2005). Prosedur pemeriksaan serbuk beton dapat dipelajari pada Gambar III.5.



Gambar III.5. Prosedur pemeriksaan mikroorganisme pada material beton

Mikrostruktur Beton

Metode *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Metode ini perlu kita lakukan untuk memberikan gambaran tentang mikrostruktur beton, baik yang tidak terintrusi maupun yang terintrusi oleh mikroorganisme. Gambaran ini mencakup keberadaan mikroorganisme, retakan mikro, pori, unsur-unsur kimia, endapan senyawa kalsium hidroksida (CH), dan senyawa kalsium silikat hidrat (CSH). Kristal kalsium hidroksida dan kalsium silikat hidrat dapat diidentifikasi melalui berbagai karakteristik, seperti warna, bentuk, dan unsur-unsur kimia, dengan menggunakan alat *Energy Dispersive Analysis X-ray* (EDAX). Beton dalam hal ini berupa kepingan kecil dari beton yang telah diperiksa kuat tekannya. Proses persiapan beton melibatkan penggunaan cincin *holder*, sebagaimana Gambar III.5.

Metode *X-Ray Diffraction* (XRD)

Metode ini perlu kita terapkan untuk mengidentifikasi senyawa kimia kristalin, seperti kalsium hidroksida (CH), kalsium silikat hidrat (CSH), ettringite, kalsium karbonat (CaCO_3), dan kemungkinan kristal-kristal lainnya yang terbentuk. Senyawa-senyawa kimia kristalin ini ditunjukkan dalam bentuk puncak pada grafik dengan intensitas dan sudut difraksi tertentu.

Komposisi senyawa kimia tersebut ditentukan dengan membandingkan luas bidang puncak dari masing-masing senyawa kristalin dengan total luas bidang puncak yang terbentuk. Luas bidang puncak dihitung melalui metode integrasi, dengan sumbu x mewakili lebar puncak dan sumbu y mewakili intensitas puncak yang diukur dari garis latar pada grafik XRD.

Dalam hal ini kita menggunakan serbuk beton yang diperoleh dari pengeboran kubus beton berukuran 150x150x150 mm, dengan kedalaman berturut-turut 0-25 mm, 25-50 mm, dan 50-75 mm. Serbuk beton hasil pengeboran disaring dengan saringan No. 200, dan yang lolos diambil sebanyak 10 gram. Setelah itu, serbuk beton tersebut dicetak pada spesimen *holder* untuk diamati dengan difraksi sinar X (X-Ray RD).



(a). Preparasi beton



(b). Mesin *Scanning Electron Microscopy*

Gambar III.6. Preparasi beton untuk pemeriksaan menggunakan *Scanning Electron Microscopy*

Nomenklatur

Campuran Semen dan Bubuk *Slag* Nikel

Nomenklatur untuk beton ini digunakan dalam pemeriksaan kimia campuran antara semen dan bubuk *slag* nikel. Perbedaan dengan penggunaan sebelumnya terletak pada perbandingan campuran antara kedua bahan, yang tidak hanya berkisar antara 10 hingga 20%, melainkan ditingkatkan dalam rentang antara 10 hingga 100%. Keputusan ini diambil dengan pertimbangan untuk mendapatkan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai perubahan senyawa kimia yang digunakan dalam menggambarkan garis pencampuran antara semen dan bubuk *slag* nikel dalam diagram fase sistem ternary C-A-S ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$). Berikut adalah nomenklatur untuk beton ini:

- (1). C100-0; yaitu 100% semen
- (2). C90-10; yaitu 90% semen + 10% bubuk *slag* nikel
- (3). C85-15; yaitu 85% semen + 15% bubuk *slag* nikel
- (4). C80-20; yaitu 80% semen + 20% bubuk *slag* nikel
- (5). C70-30; yaitu 70% semen + 30% bubuk *slag* nikel
- (6). C60-40; yaitu 60% semen + 40% bubuk *slag* nikel
- (7). C50-50; yaitu 50% semen + 50% bubuk *slag* nikel
- (8). C0-100; yaitu 100% bubuk *slag* nikel

Mortar

Pembuatan beton mortar perlu kita lakukan untuk pemeriksaan konsistensi normal, waktu pengikatan (*setting time*), dan *slag activity index*. Nomenklatur beton ini adalah sebagai berikut:

- (1). M100-0; yaitu mortar 100% semen
- (2). M90-10; yaitu mortar 90% semen + 10% bubuk *slag* nikel
- (3). M88-12; yaitu mortar 88% semen + 12% bubuk *slag* nikel
- (4). M86-14; yaitu mortar 86% semen + 14% bubuk *slag* nikel
- (5). M84-16; yaitu mortar 84% semen + 16% bubuk *slag* nikel
- (6). M82-18; yaitu mortar 82% semen + 18% bubuk *slag* nikel
- (7). M80-20; yaitu mortar 80% semen + 20% bubuk *slag* nikel
- (8). M50-50; yaitu mortar 50% semen + 50% bubuk *slag* nikel

Beton

Berdasarkan parameter-parameter yang telah disebutkan sebelumnya, untuk mempermudah identifikasi setiap beton, kita perlu memberikan kode atau nomenklatur. Berikut adalah nomenklatur untuk beton:

- (1). BNI25-X; yaitu beton nonintrusi mikroorganisme, kuat tekan rencana 25 MPa, dengan X persen bubuk *slag* nikel.
- (2). BNI40-X; yaitu beton nonintrusi mikroorganisme, kuat tekan rencana 40 MPa, dengan X persen bubuk *slag* nikel.
- (3). BNI60-X; yaitu beton nonintrusi mikroorganisme, kuat tekan rencana 60 MPa, dengan X persen bubuk *slag* nikel.
- (4). BI25-X; yaitu beton terintrusi mikroorganisme, kuat tekan rencana 25 MPa, dengan X persen bubuk *slag* nikel.
- (5). BI40-X; yaitu beton terintrusi mikroorganisme, kuat tekan rencana 40 MPa, dengan X persen bubuk *slag* nikel.
- (6). BI60-X; yaitu beton terintrusi mikroorganisme, kuat tekan rencana 60 MPa, dengan X persen bubuk *slag* nikel.

Arti X dalam nomenklatur di atas adalah persentase bubuk *slag* nikel yang mana berturut-turut; 0, 10, 12, 14, 16, 18, dan 20%.

BAGIAN IV

Komponen & Pengaruh Mikroorganisme pada Beton dengan Bubuk *Slag* Nikel

Pada bab ini, kita akan bersama-sama mengidentifikasi beberapa hal seperti komponen zat di dalam media, identifikasi dan analisis pertumbuhan serta produk metabolik mikroorganisme pada media, aspek kimiawi bubuk *slag* nikel, efek konsistensi dan waktu pengikatan (*setting time*), profil mikroorganisme di dalam material beton serta perilaku fisik dan mekanik beton nonintrusi dan terintrusi mikroorganisme.

Selain itu, kita juga akan mengonfirmasi fakta ilmiah mengenai degradasi fisik dan mekanik beton, serta mikrostruktur dan hubungan antar parameter. Degradasi fisik dan mekanik dalam hal ini meliputi; peningkatan porositas dan permeabilitas, kehilangan massa, dan penurunan kekuatan. Sedangkan mikrostruktur beton mencakup; retak mikro, *void*, unsur-unsur kimia, profil kalsium hidroksida dan kalsium silikat hidrat serta senyawa-senyawa kimia lainnya seperti; ettringite, kalsium karbonat, kalsium magnesium aluminium silikon oksida, dan rankinite.

Komponen Zat di dalam Media Air Kelapa

Media air kelapa dapat digunakan karena mengandung sejumlah zat-zat yang dapat menjadi sumber pertumbuhan mikroorganisme, seperti terlihat pada Tabel IV.1.

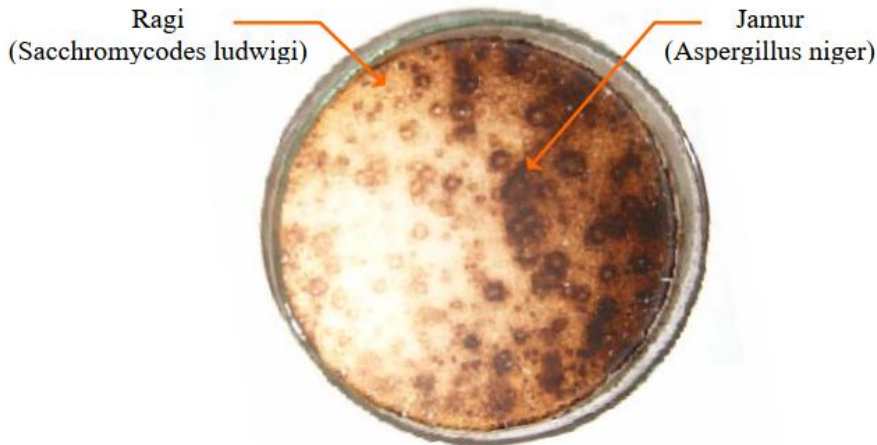
Tabel IV.1. Kandungan zat-zat di dalam media

No.	Komponen	Komposisi (%)
1	Air	95,50
2	Gula total	2,08
3	Kalium oksida	0,69
4	Mineral	0,62
5	Asam fosfat	0,56
6	Zat besi	0,50
7	Nitrogen	0,05

Zat-zat yang terdapat dalam media umumnya menjadi sumber energi dan nutrisi yang dibutuhkan untuk pertumbuhan mikroorganisme. Meskipun persentase gas nitrogen relatif kecil, namun media ini memiliki potensi sebagai pendorong daya dorong mikroorganisme masuk ke dalam pori-pori beton. Gas nitrogen juga berperan dalam proses pembusukan media, yakni mempercepat pembentukan mikroorganisme. Dalam proses pembusukan, karbohidrat (gula) menjadi unsur utama dalam pembentukan zat organik.

Pertumbuhan Mikroorganisme

Setelah melalui proses pembusukan (fermentasi), mikroorganisme yang tumbuh pada media diidentifikasi sebagai golongan jamur (*Aspergillus niger*) dan ragi (*Sacchromyces ludwigi*) dengan visualisasi seperti terlihat pada Gambar IV.1. *Aspergillus niger*, atau jamur, merupakan golongan yang sering ditemukan dalam lingkungan konstruksi, terutama pada kondisi dengan kelembaban yang relatif tinggi. Kedua golongan ini tumbuh dan berkembang dalam bentuk koloni dengan diameter antara 0,05 μm hingga 0,5 μm .



Gambar IV.1. Visualisasi hasil identifikasi golongan mikroorganisme

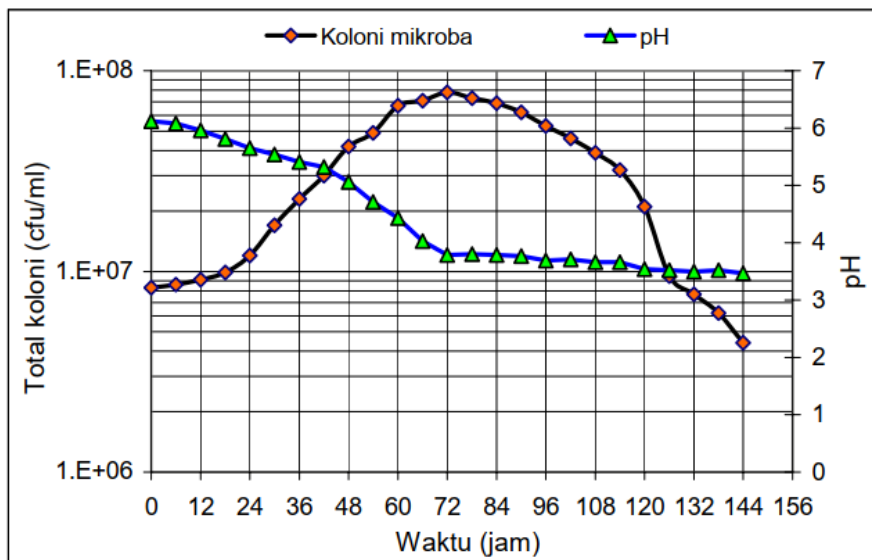
Kedua golongan mikroorganisme di atas, dalam proses metabolisme, mengoksidasi karbohidrat (gula) menjadi alkohol, berperan sebagai substrat baru. Selanjutnya, melalui sistem pernafasan aerob, substrat tersebut diuraikan sehingga menghasilkan sumber energi baru dan zat-zat organik.

Melalui pemeriksaan kromatografi dengan metode *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC), kedua golongan mikroorganisme tersebut dalam proses metabolisme memproduksi zat asam berupa asam asetat (CH_3COOH). Jika zat asam ini terintrusi ke dalam pori-pori beton, dapat bereaksi dengan senyawa kalsium hidroksida (CH) dan kalsium silikat hidrat (CSH), menyebabkan kerusakan fisik dan mekanik pada beton. Pengrusakan ini berasal dari pelarutan kalsium hidroksida (CH) dan ketidakstabilan kristal kalsium silikat hidrat (CSH) sebagai komponen utama kekuatan beton. Persamaan reaksi kimia yang menunjukkan proses pelarutan telah dicontohkan sebelumnya, seperti terlihat pada Persamaan I.3. Sedangkan persamaan reaksi kimia yang menunjukkan ketidakstabilan kalsium silikat hidrat, terlihat seperti pada Persamaan II.5. Reaksi antara asam asetat (CH_3COOH) dengan kalsium hidroksida (CH) dan kalsium silikat hidrat (CSH) tersebut merupakan bagian dari proses metabolisme mikroorganisme di dalam beton. Dari analisis

ini, kita dapat menduga, bahwa mikroorganisme berpotensi hidup dan berkembang di dalam material beton karena ketersediaan nutrisi dengan sumber utama dari kalsium hidroksida (CH).

Gambar IV.2 menunjukkan kurva pertumbuhan kedua golongan mikroorganisme (jamur dan ragi) yang terjadi di dalam beberapa fase, mulai dari fase lag (penyesuaian diri) hingga fase nonaktif (kematian). Kedua golongan mikroorganisme ini memiliki kemampuan penyesuaian diri yang relatif cepat, meskipun substratnya dalam kondisi terisolasi. Hal ini dapat kita lihat dari terbentuknya total koloni pada enam jam pertama yang cukup signifikan yaitu sebesar 8×10^6 - $8,5 \times 10^6$ cfu/ml (colony forming unit). Pembelahan sel dimulai setelah enam jam pertama hingga 12 jam berikutnya, dengan total satuan pembentukan koloni antara $8,5 \times 10^6$ - $1,0 \times 10^7$ cfu/ml (fase aktif). Aktivitas sel mikroorganisme meningkat secara eksponensial hingga umur substrat mencapai 60 jam dengan total satuan pembentukan koloni sebesar $6,7 \times 10^7$ cfu/ml (fase eksponensial). Fase deselerasi terjadi dengan berkurangnya aktivitas sel pada umur substrat 60 hingga 72 jam, mencapai puncak pertumbuhan koloni mikroorganisme sebanyak $7,8 \times 10^7$ cfu/ml. Pada fase ini, beberapa sel mikroorganisme mulai mengalami kematian.

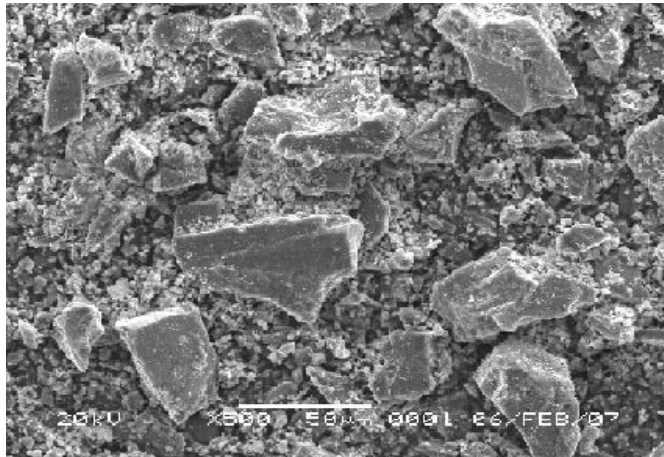
Fase stasioner berlangsung relatif cepat dan tampaknya menuju langsung ke fase kematian, di mana jumlah sel yang mati lebih banyak daripada yang masih hidup. Pada fase kematian ini, pH substrat tetap konstan dengan nilai rata-rata $\text{pH} \pm 3,5$. Meskipun nilai pH tersebut masih dalam batas yang sesuai untuk pertumbuhan kedua golongan mikroorganisme, namun karena sumber nutrisi dan sumber energi lainnya tidak mencukupi lagi untuk pertumbuhan, mikroorganisme mengalami kematian secara besar-besaran.



Gambar IV.2. Kurva pertumbuhan golongan mikroorganisme jamur dan ragi (*Aspergillus niger* and *Sacchromyces ludwigi*)

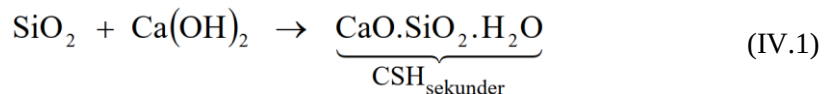
Aspek Kimiawi Bubuk *Slag* Nikel

Bubuk *slag* nikel dengan tekstur butiran, seperti yang kita lihat pada Gambar IV.3, mengandung berbagai senyawa kimia sebagaimana dijelaskan pada bab sebelumnya (Tabel III.1). Secara umum, berdasarkan kriteria yang diatur dalam spesifikasi American Society for Testing and Materials (ASTM C618-93), bubuk *slag* nikel memenuhi syarat sebagai mineral tambahan dalam campuran beton. Hal ini dapat diukur melalui beberapa parameter, seperti jumlah senyawa kimia $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ lebih besar dari 70%, SO_3 lebih kecil dari 4%, LoI (loss on ignition) lebih kecil dari 10%, dan kadar air yang lebih kecil dari 3%. Selain itu, dengan menggunakan Persamaan II.9, maka kita dapat memperoleh modulus kimia sebesar 0,54, sehingga bubuk *slag* nikel juga memenuhi kriteria modulus kimia yang diusulkan oleh Bijen, J. (1996).



Gambar IV.3. Mikrostruktur bubuk *slag* nikel (perbesaran 500 kali)

Bubuk *slag* nikel dengan kandungan senyawa kimia SiO_2 sebesar 42,45%, dapat memberikan efek pozzolanik melalui reaksi kimia sebagai berikut:



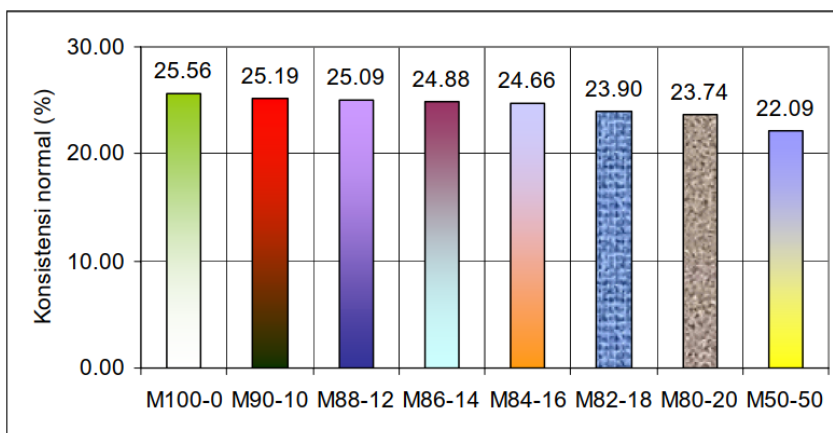
Bubuk *slag* nikel juga mengandung senyawa Fe_2O_3 sebesar 25,71%. Jika senyawa ini bereaksi dengan air (H_2O), maka senyawa besi hidroksida (2FeOOH) akan terbentuk. Senyawa ini merupakan lapisan pasif yang dapat melindungi baja tulangan terhadap kemungkinan terjadinya korosi.

Di samping itu, bubuk *slag* nikel juga mengandung senyawa MgO sebesar 12,68%, yang apabila bereaksi dengan air (H_2O) akan membentuk senyawa magnesium hidroksida ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). Senyawa ini berpotensi menyebabkan ekspansi volume yang umumnya ditandai dengan retak-retak pada matriks setelah beton mengeras.

Kita juga dapat menemukan senyawa kimia Na_2O dan K_2O yang jika bereaksi dengan air (H_2O) akan membentuk senyawa natrium hidroksida (2NaOH) dan kalium hidroksida (2KOH) sehingga pH larutan pori beton menjadi naik. Namun jika agregat yang digunakan dalam campuran beton bersifat reaktif, maka senyawa tersebut memicu disintegrasi beton yang pada akhirnya memengaruhi kekuatan beton.

Efek Konsistensi dan Waktu Pengikatan

Terkait dengan hubungan antara kebutuhan air dan penetrasi pada berbagai proporsi campuran semen dan bubuk *slag* nikel, kita melihat bahwa konsistensi normal dapat ditentukan ketika penetrasi jarum vicat menembus pasta pada kedalaman 10 ± 1 mm (ASTM C187- 86). Kondisi ini merupakan acuan untuk memperkirakan jumlah kebutuhan air optimum pada setiap proporsi campuran kedua bahan tersebut. persentase kebutuhan air optimum pada setiap 500 gram campuran semen dan bubuk *slag* nikel dapat kita pelajari pada Gambar IV.5, di mana kebutuhan air mengalami penurunan dengan setiap penambahan porsi bubuk *slag* nikel. Penurunan ini memberikan indikasi terhadap tingkat kelecakan dan kemudahan pengerjaan (*workability*) pencampuran beton. Indikasi ini juga mengarah pada efek pengecilan pori, sehingga mikroorganisme terhalang untuk menyusup ke dalam pori-pori beton.



Gambar IV.4. Persentase kebutuhan air pada berbagai campuran bahan semen dan bubuk *slag* nikel dalam kondisi konsistensi normal

Efek lain yang terlihat dari penggunaan bubuk *slag* nikel adalah waktu pengikatan (*setting time*). Pada setiap penambahan porsi bubuk *slag* nikel, waktu yang diperlukan untuk proses pengikatan menjadi lebih lama. Efek ini terjadi karena perubahan komposisi senyawa kimia kapur (CaO) yang berkurang setiap kali porsi bubuk *slag* nikel ditambahkan.

Profil Mikroorganisme pada Material Beton

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, pertumbuhan mikroorganisme di dalam beton bisa diamati melalui jumlah koloni mikroorganisme yang membentuk kelompok. Pengukuran jumlah ini dinyatakan per gram beton dengan satuan cfu/gr. Selain itu, kita juga melihat faktor-faktor seperti pH, suhu, dan kelembaban udara. Pengukuran dilakukan pada tiga kedalaman berbeda, yaitu 0-25 mm, 25-50 mm, dan 50-75 mm.

Dalam 300 hari masa intrusi, beton tanpa bubuk *slag* nikel menunjukkan peningkatan pertumbuhan mikroorganisme secara bertahap. Peningkatan ini disebabkan oleh porositas dan nutrien, terutama kalsium hidroksida, yang mendukung mikroorganisme untuk menyusup dan hidup di dalam beton.

Namun, pada beton dengan bubuk *slag* nikel, kurva pertumbuhan mikroorganisme menunjukkan puncak pertumbuhan dan kemudian penurunan signifikan, kecuali untuk beberapa saja. Penurunan ini disebabkan oleh efek pengecilan pori dan efek pozzolanik bubuk *slag* nikel, mengurangi ketersediaan nutrien, sehingga mikroorganisme sulit bertahan hidup di dalam beton.

Gambar IV.17 menunjukkan adanya peran bubuk *slag* nikel dan dampak mutu beton atau rasio air-semen (w/c) terhadap pertumbuhan mikroorganisme dalam beton. Secara umum, terlihat bahwa mutu beton atau rasio air-semen (w/c) memiliki pengaruh terhadap jumlah total koloni mikroorganisme dalam beton, dengan penurunan jumlah koloni mikroorganisme seiring peningkatan mutu beton. Secara khusus, penggunaan bubuk *slag* nikel juga berkontribusi pada penurunan jumlah koloni mikroorganisme tersebut.

Pada kedalaman 0-25 mm, puncak pertumbuhan total koloni mikroorganisme terendah berturut-turut adalah $2,4 \times 10^4$ cfu/gr untuk beton dengan w/c = 0,57 (Gambar IV.17.a), $9,7 \times 10^3$ cfu/gr untuk w/c = 0,40 (Gambar IV.17.b), dan $4,3 \times 10^3$ cfu/gr untuk w/c = 0,30 (Gambar IV.17.c). Ketiga puncak pertumbuhan ini diperoleh dengan 16% bubuk *slag* nikel.

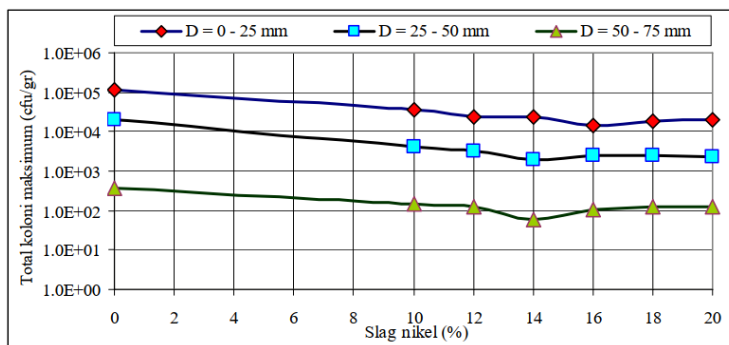
Kemudian pada kedalaman 25-50 mm, puncak pertumbuhannya berturut-turut adalah $1,9 \times 10^3$ cfu/gr untuk w/c = 0,57 dengan 14% bubuk *slag* nikel (Gambar IV.17.a), $8,0 \times 10^2$ cfu/gr untuk w/c = 0,40 (Gambar

IV.17.b), dan $7,2 \times 10^2$ cfu/gr untuk w/c = 0,30 (Gambar IV.17.c), masing-masing dengan 16% bubuk *slag* nikel.

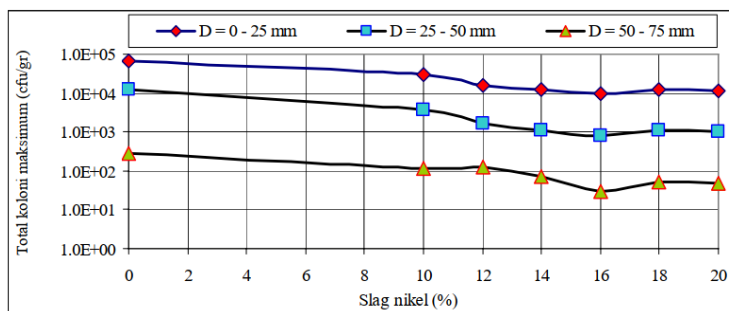
Sedangkan pada kedalaman 50-75 mm adalah sebesar 60 cfu/gr untuk w/c = 0,57 dengan 14% bubuk *slag* nikel (Gambar IV.17.a), 30 cfu/gr untuk w/c = 0,40 (Gambar IV.17.b), dan 26 cfu/gr untuk w/c = 0,30 (Gambar IV.17.c), masing-masing dengan 16% bubuk *slag* nikel.

Jika satuan puncak pertumbuhan total koloni mikroorganisme tersebut (cfu/gr) dikonversikan menjadi satuan cfu/m³ beton, maka kita dapat memperoleh faktor konversi sebesar $2,36 \times 10^6$ dengan berat isi rata-rata beton 2360 gr/m³.

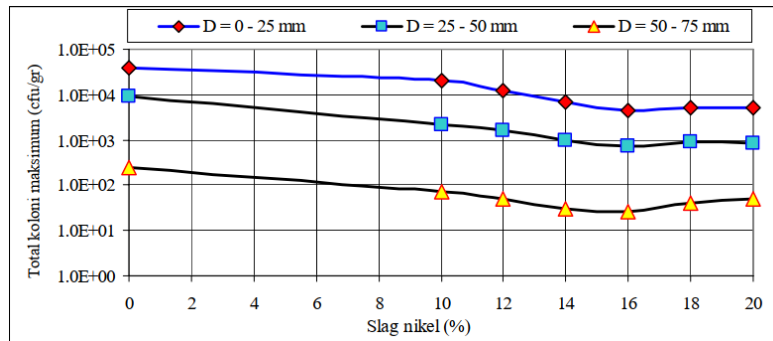
Dengan faktor konversi tersebut, maka total satuan bentukan koloni mikroorganisme pada seluruh beton melebihi 10^6 fcu/m³. Artinya, profil jamur dan ragi tergolong sebagai populasi yang aktif dan *survive* (Cookson, 1995).



(a). Beton dengan rasio air-semen (w/c = 0,57)

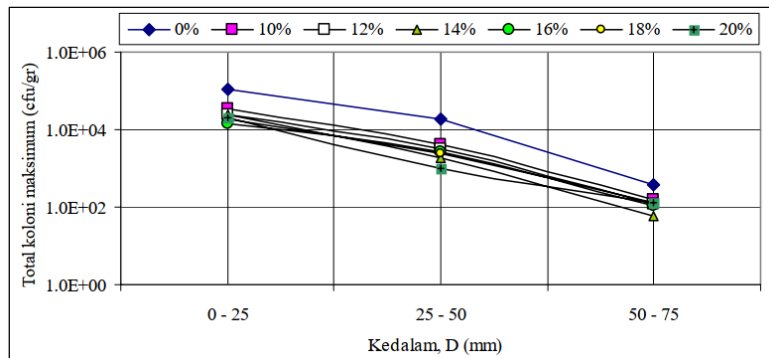


(b). Beton dengan rasio air-semen (w/c = 0,40)

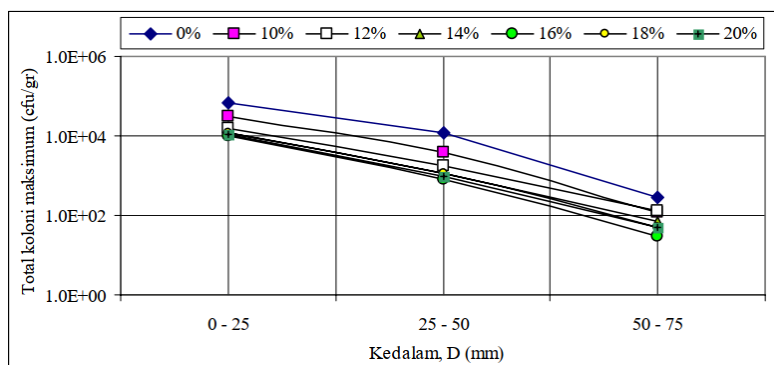


(c). Beton dengan rasio air-semen ($w/c = 0,30$)

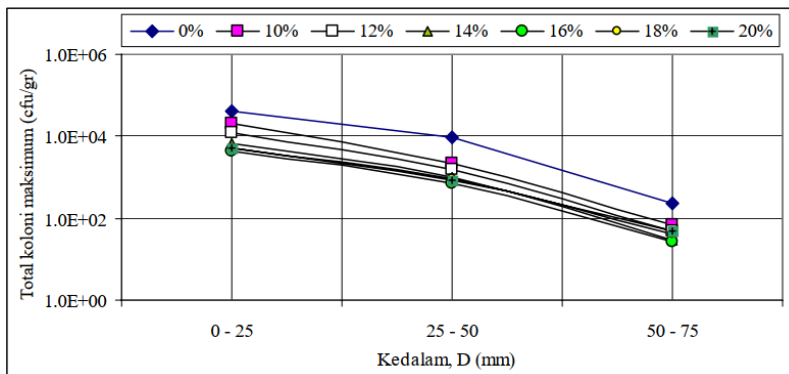
Gambar IV.5. Grafik hubungan antara total koloni mikroorganisme maksimum dengan persentase bubuk *slag* nikel



(a). Beton dengan rasio air-semen ($w/c = 0,57$)



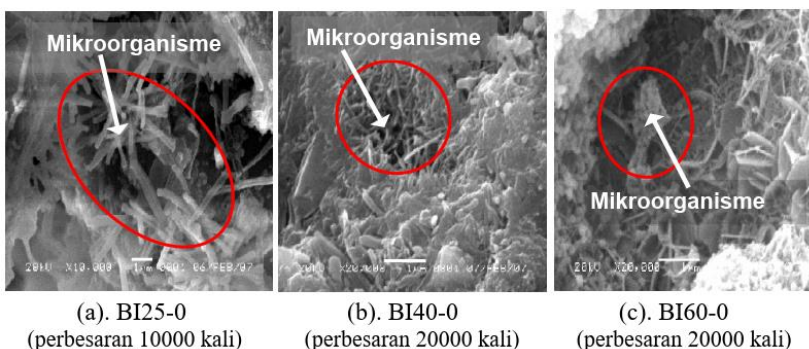
(b). Beton dengan rasio air-semen ($w/c = 0,40$)

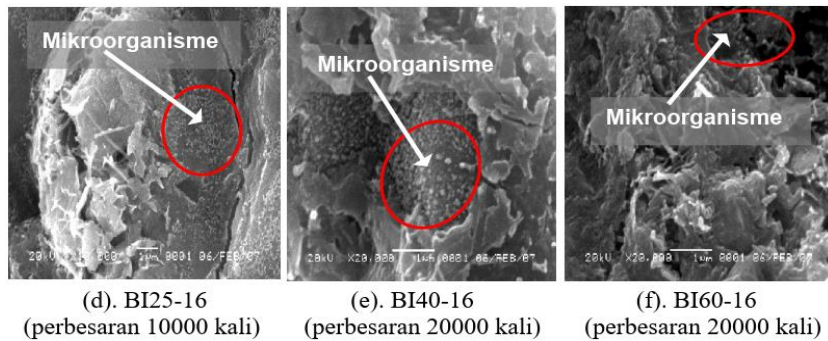


(c). Beton dengan rasio air-semen ($w/c = 0,30$)

Gambar IV.6. Grafik hubungan antara total koloni mikroorganisme maksimum dengan kedalam intrusi

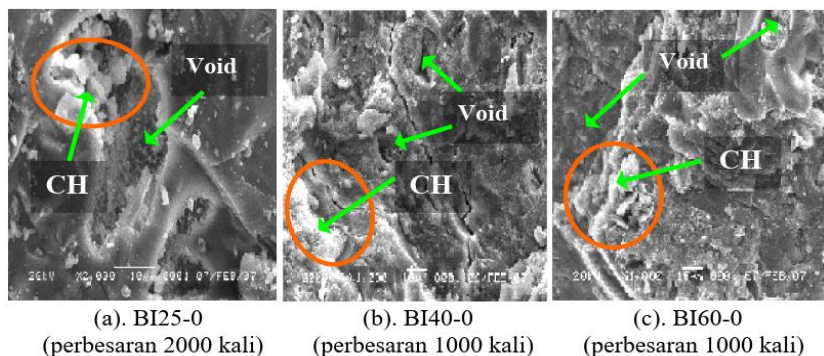
Kemudian berdasarkan hasil *scanning electron microscopy* setelah 28 hari terintrusi mikroorganisme, ada satu beton (BI25-0) yang menunjukkan pertumbuhan mikroorganisme yang padat, dengan pertumbuhan berkelompok, struktur berbentuk tubular, dan pH 11,9 (Gambar IV.19.a). Namun pada beton BI40-0, pertumbuhan mikroorganisme lebih sedikit, tanpa spora atau reproduksi, dengan pH 12,08 (Gambar IV.19.b). Beton BI60-0 menunjukkan pertumbuhan mikroorganisme dengan area yang lebih kecil dibandingkan BI25-0 dan BI40-0, dengan pH 12,55 (Gambar IV.19.c). Dengan penambahan 16% bubuk *slag* nikel, pertumbuhan mikroorganisme pada beton tersebut berkurang secara signifikan, seperti terlihat pada Gambar IV.19.d, e, dan f.

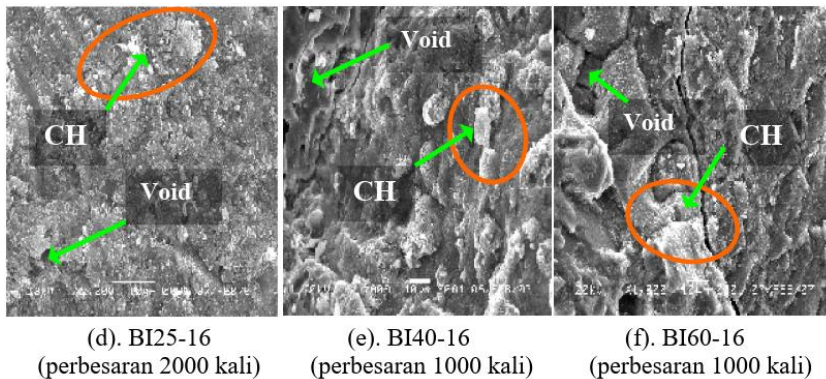




Gambar IV.7. Hasil *Scanning Electron Microscopy* (SEM) pertumbuhan mikroorganisme pada beton setelah terintrusi selama 28 hari

Pada saat puncak pertumbuhan maksimum, produk metabolik mikroorganisme yakni asam asetat (CH_3COOH) membongkar senyawa-senyawa kimia yang mengandung unsur kalsium di dalam beton. Senyawa-senyawa ini digunakan sebagai sumber nutrisi mikroorganisme. Senyawa yang paling mudah dibongkar ialah kalsium hidroksida (CH) karena sifat kelarutannya (*solubility*) yang lebih tinggi daripada senyawa kalsium silikat hidrat (CSH). Pembongkaran ini nantinya akan meninggalkan ruang kosong (pori) yang dapat memengaruhi perilaku fisik dan mekanik beton. Gambar IV.20 menunjukkan perbedaan mikrostruktur beton pada kondisi tersebut, di mana beton dengan 16% bubuk *slag* nikel umumnya memiliki dampak yang relatif lebih kecil dibandingkan beton tanpa bubuk *slag* nikel.





Gambar IV.8. Hasil *Scanning Electron Microscopy* (SEM) pembentukan kristal kalsium pada beton saat puncak pertumbuhan mikroorganisme

Perubahan-perubahan terhadap nilai pH beton juga ikut terjadi. Dalam hal ini, nilai pH beton yang menggunakan bubuk *slag* nikel umumnya lebih tinggi dibandingkan pH beton tanpa bubuk *slag* nikel. Kondisi ini menunjukkan, bahwa reaksi pozzolanik antara SiO_2 bubuk *slag* nikel dengan kalsium hidroksida (CH) hasil sampingan reaksi trikalسيوم silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S) semen dengan air, tidak berpengaruh besar terhadap nilai pH beton yang menurun. Kondisi ini disebabkan adanya kandungan senyawa alkali K_2O dan Na_2O di dalam bubuk *slag* nikel yang bereaksi dengan air (H_2O), sehingga membentuk kalium hidroksida (2KOH) dan natrium hidroksida (2NaOH) yang secara kimiawi memiliki sifat kebasaan yang relatif tinggi.

Setelah terintrusi mikroorganisme selama 300 hari, kita juga akan melihat bahwa beton tanpa bubuk *slag* nikel (BI25-0, BI40-0, dan BI60-0) mengalami penurunan nilai pH yang signifikan, dari awalnya rata-rata 12,5 hingga 13,0 menjadi 9,6 hingga 12,0. Tingkat penurunan ini bergantung pada mutu beton, dengan rasio air-semen (w/c) yang lebih kecil menghasilkan penurunan nilai pH yang lebih rendah.

Beton yang menggunakan bubuk *slag* nikel, pada kondisi yang sama, juga mengalami penurunan nilai pH dari awalnya rata-rata 12,8 hingga 13,6 menjadi 10,6 hingga 12,7. Tingkat penurunan pH juga tergantung pada mutu beton, dengan beton 16% bubuk *slag* nikel (BI25-

16, BI40-16, dan BI60-16) menunjukkan penurunan nilai pH yang sedikit lebih rendah dibandingkan dengan beton lainnya.

Meskipun kita awalnya hanya fokus pada aspek korosifitas, namun melihat nilai pH setelah terintrusi mikroorganisme selama 300 hari, kita juga bisa menduga bahwa nilai pH pada beton yang menggunakan bubuk *slag* nikel masih berada dalam batas yang mencegah terjadinya korosi ($\text{pH} > 11$).

Aspek Fisik dan Mekanik Beton

Porositas

Terdapat hubungan antara porositas dan umur pada beton nonintrusi mikroorganisme dengan rasio air-semen (w/c) masing-masing 0,57, 0,40, dan 0,30. Meskipun beton yang menggunakan bubuk *slag* nikel (dengan persentase 10 hingga 20%) perlu waktu pengikatan yang lebih lama, sehingga secara umum beton tersebut memiliki porositas lebih rendah daripada beton tanpa bubuk *slag* nikel. Artinya, bubuk *slag* nikel selain memiliki sifat pozzolanik, juga dapat menyebabkan pengecilan pori, yang berdampak pada pengurangan jumlah koloni mikroorganisme dan masa hidupnya di dalam material beton.

Selain itu, kita juga berhasil mengonfirmasi bahwa beton dengan 16% bubuk *slag* nikel memiliki total koloni mikroorganisme dengan puncak pertumbuhan terkecil dibandingkan dengan persentase bubuk *slag* nikel lainnya. Kurva-kurva tersebut cenderung mengikuti bentuk persamaan garis eksponensial.

Kemudian melalui analisis regresi linier, kita dapat mengidentifikasi hubungan antara porositas dan umur (waktu) pada beton nonintrusi mikroorganisme, baik tanpa maupun dengan bubuk *slag* nikel melalui persamaan sebagai berikut:

$$e_{ni} = e^a \cdot t^b \quad (\text{IV.2})$$

Keterangan:

e_{ni} = porositas beton nonintrusi mikroorganisme (%)

t = waktu atau umur beton (hari)

a, b = koefisien regresi

Efek pengecilan pori yang diinduksi oleh bubuk *slag* nikel pada beton nonintrusi mikroorganisme akan terus meningkat seiring dengan pertambahan umur beton. Pada kondisi ini, reduksi porositas mencapai tingkat tertinggi ketika menggunakan 16% bubuk *slag* nikel. Sebelumnya kita sudah tahu, bahwa proses pengikatan bubuk *slag* nikel (reaksi pozzolanik) memerlukan waktu yang relatif lama, sehingga kontribusinya terhadap penurunan porositas beton nonintrusi mikroorganisme baru terlihat setelah beton mencapai umur di atas 14 hari.

Pada beton terintrusi mikroorganisme, hubungan antara porositas dan durasi intrusi juga dapat kita evaluasi melalui beton tanpa bubuk *slag* nikel dengan rasio air-semen (w/c) 0,57, 0,40, dan 0,30. Ketiganya ternyata sangat rentan terhadap serangan mikroorganisme. Hal ini terlihat pada porositasnya yang meningkat seiring berjalannya waktu intrusi. Kenaikan porositas terjadi karena aktivitas metabolik mikroorganisme. Dalam hal ini, senyawa kalsium hidroksida (CH) pada beton mengalami dekomposisi melalui pelarutan, menciptakan ruang kosong (*void*).

Mekanisme pelarutan terjadi secara bio-kimia, di mana mikroorganisme dalam proses metaboliknya menyusun, mengambil, dan membongkar zat-zat makanan dari senyawa kalsium hidroksida melalui jalur anabolisme dan katabolisme. Jalur anabolisme merupakan proses di mana mikroorganisme menyusun sumber nutrisinya melalui biosintesis, membentuk senyawa kompleks berupa garam elektrolit ($\text{Ca}(\text{COOH})_2$), sebagaimana Persamaan I.3. Sementara itu, jalur katabolisme adalah proses di mana senyawa kompleks tersebut diuraikan menjadi produk yang lebih sederhana. Selanjutnya, mikroorganisme mengambil unsur kalsium sebagai nutrisi dan membuang sisa pembongkarannya, membentuk zat-zat organik baru, seperti yang dijelaskan pada Persamaan I.5.

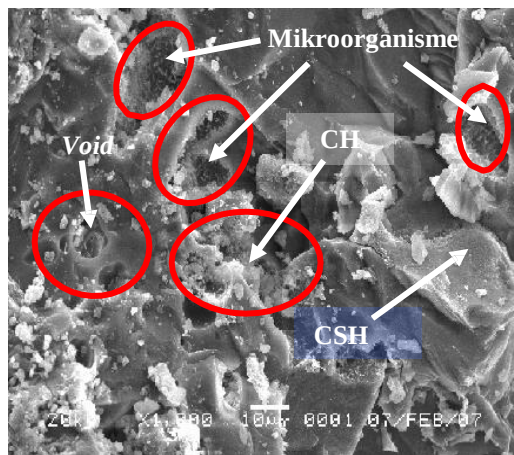
Senyawa kalsium silikat hidrat (CSH) juga dapat mengalami proses serupa, tetapi proses ini tidak semudah pelarutan kalsium hidroksida. Hal ini terjadi karena adanya kesulitan dekomposisi gel silika pada CSH oleh zat-zat organik, termasuk asam asetat, kecuali pada kondisi di mana konsentrasi ion hidrogen dari zat asam tersebut cukup tinggi.

Dalam kondisi terintrusi mikroorganisme, kurva porositas beton yang menggunakan bubuk *slag* nikel pada dasarnya mirip dengan kurva porositas pada beton tanpa intrusi mikroorganisme. Masing-masing beton

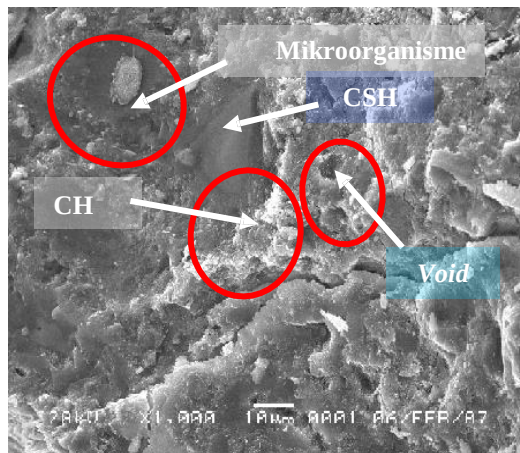
dengan 16% bubuk *slag* nikel memiliki porositas terkecil di antara kurva-kurva lainnya. Artinya, beton dengan 16% bubuk *slag* nikel memberikan kontribusi tertinggi, baik dalam kondisi tanpa intrusi maupun terintrusi mikroorganisme.

Kemudian dengan analisis regresi linier, persamaan untuk kurva-kurva porositas beton terintrusi mikroorganisme dapat kita nyatakan seperti persamaan kurva porositas beton tanpa intrusi mikroorganisme (Persamaan IV.2).

Gambar IV.28.a berikut ini menunjukkan struktur mikro beton tanpa adanya serbuk *slag* nikel, di mana terlihat bahwa aktivitas metabolik mikroorganisme menghasilkan *void* atau ruang kosong setelah senyawa kalsium hidroksida (CH) terdekomposisi. Hal ini menyebabkan peningkatan porositas beton. Kemudian pada Gambar IV.28.b, kita melihat bahwa dengan penambahan 16% serbuk *slag* nikel, terjadi perubahan dalam struktur mikro beton. Kandungan senyawa kalsium hidroksida (CH) berkurang dibandingkan dengan beton tanpa serbuk *slag* nikel, sehingga pembentukan *void* akibat aktivitas metabolik mikroorganisme menjadi lebih sedikit.



(a). Beton tanpa bubuk *slag* nikel (perbesaran 1000 kali)



(b). Beton dengan 16% bubuk *slag* nikel (perbesaran 1000 kali)

Gambar IV.9. Mikrostruktur beton tanpa dan dengan 16% bubuk *slag* nikel setelah terintrusi mikroorganisme

Terkait dengan hubungan porositas dengan perubahan kalsium hidroksida, beton tanpa bubuk *slag* nikel yang terkena intrusi mikroorganisme menunjukkan peningkatan perilaku porositas seiring berkurangnya kuantitas kalsium hidroksida. Sementara itu, pada beton dengan 16% bubuk *slag* nikel, porositas mengalami penurunan sejalan dengan berkurangnya kuantitas kalsium hidroksida. Penurunan kuantitas kalsium hidroksida pada beton tanpa bubuk *slag* nikel disebabkan oleh aktivitas metabolik mikroorganisme, sementara pada beton dengan 16% bubuk *slag* nikel lebih disebabkan oleh efek pozzolanik. Selain itu, kita juga dapat menilai bahwa senyawa kalsium silikat hidrat (CSH) tidak mengalami dekomposisi signifikan. Oleh karena itu, dapat kita pastikan bahwa peningkatan porositas beton akibat intrusi mikroorganisme lebih dominan disebabkan oleh pelarutan senyawa kalsium hidroksida (CH).

Kontribusi dari 16% bubuk *slag* nikel sendiri terhadap pengurangan porositas pada beton, baik yang terkena intrusi mikroorganisme maupun yang tidak, dapat diukur melalui rasio antara porositas beton dengan 16% bubuk *slag* nikel dan beton tanpa bubuk *slag* nikel. Dengan analisis regresi linier, maka rasio porositas tersebut dapat diungkapkan melalui persamaan berikut:

1) Beton nonintrusi mikroorganisme

(a). untuk w/c = 0,57

$$\left(\frac{e_{16}}{e_0} \right)_{ni} = 1,289t^{-0,132} \quad (\text{IV.3.a})$$

(b). untuk w/c = 0,40

$$\left(\frac{e_{16}}{e_0} \right)_{ni} = 1,222t^{-0,091} \quad (\text{IV.3.b})$$

(c). untuk w/c = 0,30

$$\left(\frac{e_{16}}{e_0} \right)_{ni} = 1,286t^{-0,109} \quad (\text{IV.3.c})$$

2) Beton terintrusi mikroorganisme

(a). untuk w/c = 0,57

$$\left(\frac{e_{16}}{e_0} \right)_i = 1,354t^{-0,181} \quad (\text{IV.4.a})$$

(b). untuk w/c = 0,40

$$\left(\frac{e_{16}}{e_0} \right)_i = 1,411t^{-0,151} \quad (\text{IV.4.b})$$

(c). untuk w/c = 0,30

$$\left(\frac{e_{16}}{e_0} \right)_i = 1,514t^{-0,170} \quad (\text{IV.4.c})$$

Notasi e_{16} dan e_0 masing-masing adalah porositas beton dengan 16% bubuk *slag* nikel dan tanpa bubuk *slag* nikel, sementara subskrip i dan ni berturut-turut menyatakan beton terintrusi dan nonintrusi mikroorganisme.

Di samping itu, dengan 16% bubuk *slag* nikel, selain dapat mengurangi peningkatan porositas, hal ini juga berdampak pada keterbatasan kesempatan hidup mikroorganisme di dalam material beton.

Kemudian untuk hubungan antara porositas beton terintrusi dan nonintrusi mikroorganisme dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

- Beton tanpa bubuk *slag* nikel:

$$e_{i0} = 1,259 e_{ni0} \quad (IV.5.a)$$

- Beton dengan 16% bubuk *slag* nikel:

$$e_{i0} = 1,092 e_{ni0} \quad (IV.5.B)$$

Notasi e_i dan e_{ni} masing-masing adalah porositas beton terintrusi dan nonintrusi mikroorganisme yang dinyatakan dalam %.

Permeabilitas

Sebagaimana porositas beton, hubungan antara koefisien permeabilitas dan umur beton, baik yang terkena maupun tidak terkena intrusi mikroorganisme memiliki persamaan yang serupa, dengan pendekatan matematis sebagai berikut:

$$k_{ni} = e^a t^b \quad (IV.6.a)$$

$$k_i = e^a t^b \quad (IV.6.b)$$

Keterangan:

k_{ni} = koefisien permeabilitas beton nonintrusi mikroorganisme (m/dtk)

k_i = koefisien permeabilitas beton terintrusi mikroorganisme (m/dtk)

t = umur atau lama intrusi (hari)

a, b = koefisien regresi

Sama seperti pada porositas beton, nilai koefisien permeabilitas terkecil ditemukan pada semua beton (terintrusi dan yang tidak intrusi) yang memiliki kuat tekan rencana 25, 40, dan 60 mPA dengan persentase serbuk *slag* nikel 16%.

Pada kondisi terintrusi mikroorganisme, koefisien permeabilitas pada beton tanpa serbuk *slag* nikel meningkat seiring berjalannya waktu

atau durasi intrusi. Peningkatan ini disebabkan oleh pelarutan senyawa kalsium hidroksida akibat aktivitas metabolik mikroorganisme. Senyawa kalsium hidroksida yang terdekomposisi akan memicu pori-pori baru dan membuat beton lebih mudah dilewati air atau bersifat poros.

Efek penyusutan pori akibat penggunaan bubuk *slag* nikel juga berdampak pada penyusutan koefisien permeabilitas. Dua faktor utama yang menyebabkan hal ini terjadi ialah efek pelumasan dan efek pozzolanik. Efek pelumasan terjadi karena butiran bubuk *slag* nikel yang lebih halus dibanding butiran semen, memudahkan dalam pengerjaan (*workability*), yang pada akhirnya menyebabkan penyusutan pori-pori beton. Sementara itu, efek pozzolanik terjadi melalui reaksi antara senyawa silika oksida (SiO_2) dari bubuk *slag* nikel dengan kalsium hidroksida (CH), produk hidrasi trikalsium silikat (C_3S), dan dikalsium silikat (C_2S) semen. Reaksi ini meningkatkan rasio kalsium silikat hidrat (CSH) terhadap kalsium hidroksida (CH), membuat beton menjadi lebih padat. Seperti yang telah dibahas sebelumnya, kontribusi dari 16% bubuk *slag* nikel terhadap pengurangan koefisien permeabilitas pada beton yang tidak terkena dan yang terkena intrusi mikroorganisme dapat diukur melalui rasio antara koefisien permeabilitas beton dengan 16% bubuk *slag* nikel dan beton tanpa bubuk *slag* nikel. Dengan menggunakan analisis regresi linier, rasio tersebut dapat dinyatakan melalui persamaan berikut:

1) Beton nonintrusi mikroorganisme

(a). untuk $w/c = 0,57$

$$\left(\frac{k_{16}}{k_0} \right)_{ni} = 1,341t^{-0,102} \quad (\text{IV.7.a})$$

(b). untuk $w/c = 0,40$

$$\left(\frac{k_{16}}{k_0} \right)_{ni} = 2,202t^{-0,278} \quad (\text{IV.7.b})$$

(c). untuk $w/c = 0,30$

$$\left(\frac{k_{16}}{k_0} \right)_{ni} = 2,283t^{-0,353} \quad (\text{IV.7.c})$$

2) Beton terintrusi mikroorganisme

(a). untuk $w/c = 0,57$

$$\left(\frac{k_{16}}{k_0} \right)_i = 1,404t^{-0,148} \quad (IV.8.a)$$

(b). untuk $w/c = 0,40$

$$\left(\frac{k_{16}}{k_0} \right)_i = 1,754t^{-0,272} \quad (IV.8.b)$$

(c). untuk $w/c = 0,30$

$$\left(\frac{k_{16}}{k_0} \right)_i = 1,194t^{-0,261} \quad (IV.8.c)$$

Notasi k_{16} dan k_0 masing-masing adalah koefisien permeabilitas beton 16% bubuk *slag* nikel dan tanpa bubuk *slag* nikel, sedangkan subskrip i dan ni berturut-turut menyatakan kondisi beton terintrusi dan nonintrusi mikroorganisme. Hubungan antara koefisien permeabilitas beton terintrusi dan nonintrusi mikroorganisme dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

- Beton tanpa bubuk *slag* nikel:

$$k_{i_0} = 1,255k_{ni_0} \quad (IV.9.a)$$

- Beton dengan 16% bubuk *slag* nikel:

$$k_{i_{16}} = 1,0842k_{ni_{16}} \quad (IV.9.B)$$

Notasi e_i dan e_{ni} masing-masing adalah porositas beton terintrusi dan nonintrusi mikroorganisme yang dinyatakan dalam %.

Regangan Susut

Pemeriksaan susut kering hanya kita lakukan pada beton nonintrusi mikroorganisme yang hanya dibuat tiga jenis pada setiap rasio air-semen, yaitu beton tanpa bubuk *slag* nikel dan beton dengan 14% dan 16% bubuk

slag nikel. Dalam hal ini kita melihat adanya perilaku regangan susut beton pada berbagai rasio air-semen. Beton yang menggunakan bubuk *slag* nikel menunjukkan regangan susut lebih kecil dibandingkan dengan beton tanpa bubuk *slag* nikel. Beton dengan 14% bubuk *slag* nikel mengurangi regangan susut rata-rata sebesar 15,35% untuk w/c = 0,57, 11,68% untuk w/c = 0,40, dan 13,19% untuk w/c = 0,30. Begitu juga dengan beton menggunakan 16% bubuk *slag* nikel, yaitu sebesar 13,70% untuk w/c = 0,57, 13,02% untuk w/c = 0,40, dan 15,63% untuk w/c = 0,30.

Reduksi regangan susut ini menunjukkan bahwa beton dengan bubuk *slag* nikel memiliki volume pori yang lebih kecil dan material yang lebih padat dibandingkan dengan beton tanpa bubuk *slag* nikel. Kondisi ini merupakan dampak lanjut dari efek pelumasan yang diberikan oleh bubuk *slag* nikel, memungkinkan pasta untuk mengisi pori-pori beton.

Melalui analisis regresi linier, regangan susut kering sebagai fungsi waktu dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\varepsilon_{sh} = \frac{t}{a + bt} (\varepsilon_{sh})_{28} \quad (IV.10)$$

Keterangan:

ε_{sh} = regangan susut kering (%)

ε_{sh28} = regangan susut kering pada umur 28 hari (%)

t = umur beton (hari)

a, b = koefisien regresi

Kuat Tekan

Dari beberapa jenis mutu beton yang diperiksa, kita dapat melihat bahwa pada usia di bawah dua puluh delapan hari, beton yang menggunakan bubuk *slag* nikel memiliki pertumbuhan kekuatan yang lebih lambat dibandingkan dengan beton normal (100% semen). Lambatnya pertumbuhan kekuatan ini terjadi karena perubahan komposisi kimia campuran antara semen dan bubuk *slag* nikel, terutama berkurangnya komposisi kapur (CaO) secara signifikan. Hal ini berakibat pada waktu pengikatan (*setting time*) yang menjadi lebih lama. Sebaliknya, pada usia 28 hari ke atas, kontribusi bubuk *slag* nikel mulai terlihat, meskipun pada kondisi intrusif mikroorganisme masih mengikuti pola

kekuatan beton yang tidak terkena intrusi mikroorganisme secara relatif.

Kontribusi bubuk *slag* nikel dapat dianggap sebagai kontribusi kolektif. Selain mencegah masuknya mikroorganisme ke dalam pori-pori beton, bubuk *slag* nikel juga dapat mengurangi ketersediaan nutrisi yang diperlukan oleh mikroorganisme untuk hidup dan berkembang di dalam beton. Pencegahan masuknya mikroorganisme ke dalam pori-pori beton telah ditunjukkan melalui pengurangan porositas dan koefisien permeabilitas.

Dengan kandungan silika oksida (SiO_2) sebagai senyawa kimia dominan, bubuk *slag* nikel memiliki potensi untuk mengurangi sumber nutrisi mikroorganisme, seperti kalsium hidroksida, di dalam beton. Pengurangan ini terjadi melalui reaksi kimia antara senyawa silika oksida (SiO_2) dengan kalsium hidroksida (CH), membentuk kalsium silikat hidrat (CSH) baru. CSH ini tidak hanya memberikan tambahan kekuatan pada beton, tetapi juga mencegah kemungkinan terjadinya reaksi lanjutan antara kalsium hidroksida dengan asam asetat (CH_3COOH). Pencegahan reaksi ini akan mengurangi kesempatan mikroorganisme untuk melakukan aktivitas metabolik di dalam material beton.

Reaksi antara SiO_2 dari bubuk *slag* nikel dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ merupakan reaksi pozzolanik yang dapat meningkatkan rasio kalsium silika hidrat terhadap kalsium hidroksida. Efek ini dikenal sebagai efek pozzolanik yang dapat meningkatkan kinerja fisik dan mekanik beton.

Melalui analisis regresi linier, kuat tekan beton sebagai fungsi waktu dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

(a). Beton nonintrusi mikroorganisme (dengan dan tanpa bubuk *slag* nikel)

$$f_{C_{ni}}(t) = f_{C_{28}} \left(\frac{t}{a + bt} \right) \quad (\text{IV.11.a})$$

(b). Beton terintrusi mikroorganisme

- Tanpa bubuk *slag* nikel

$$f_{C_i}(t) = a e^{-bt} \quad (\text{IV.11.b})$$

- Dengan bubuk *slag* nikel

$$f_{C_i}(t) = f_{C_0} \left(\frac{t}{a + bt} \right) \quad (\text{IV.11.c})$$

Keterangan:

fc_{ni} = kuat tekan beton nonintrusi mikroorganisme (MPa)

fc_i = kuat tekan beton terintrusi mikroorganisme (MPa)

fc_{28} = kuat tekan beton pada umur 28 hari (MPa)

fc_0 = kuat tekan beton pada saat intrusi $t = 0$ (MPa)

t = umur atau lama intrusi (hari)

a, b = koefisien regresi

Hubungan antara kuat tekan beton dengan persentase bubuk *slag* nikel nonintrusi dan terintrusi mikroorganisme cenderung mengikuti bentuk persamaan polinomial berorde dua sebagai berikut:

$$fc_{ni} = fci = aX^2 + bX + c \quad (IV.12)$$

Notasi fc_{ni} dan fc_i masing-masing ialah kuat tekan nonintrusi dan terintrusi mikroorganisme dalam MPa dan X adalah persentase bubuk *slag* nikel. Koefisien a, b , dan c ditentukan berdasarkan analisis regresi linier.

Dengan meminimalisasi Persamaan IV.12.a sampai IV.13.c, persentase bubuk *slag* nikel pada waktu tertentu (umur dan lama intrusi) yang memberikan kuat tekan beton maksimum dapat ditentukan melalui persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\partial fc_{ni}}{\partial X} = 0 \text{ dan } \frac{\partial fc_i}{\partial X} = 0 \quad (IV.13.a)$$

$$X = -\frac{b}{2a} \quad (IV.13.b)$$

Dengan memasukkan harga x dari Persamaan IV.13.b ke dalam Persamaan IV.12, maka dapat kita peroleh persamaan kuat tekan beton maksimum sebagai berikut:

$$(fc_{ni} = fci)_{\max} = \frac{b^2}{4a} + c \quad (IV.14)$$

Selanjutnya dengan membuat hubungan antara persentase bubuk *slag* nikel (X) menurut Persamaan IV.13.b dan umur/lama intrusi, sebagaimana Gambar IV.42, maka diperoleh persamaan umum untuk persentase bubuk *slag* nikel dalam fungsi waktu (umur atau lama intrusi).

Melalui regresi linier, persamaan tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut:

(a) Beton nonintrusi mikroorganisme

- untuk $w/c = 0,57$

$$(X_{ni})_{0,57} = - 7 \times 10^{-5} t^2 + 0,0231 t + 11,529 \quad (IV.15.a)$$

- untuk $w/c = 0,40$

$$(X_{ni})_{0,40} = - 0,0002 t^2 + 0,0997 t + 8,5006 \quad (IV.15.b)$$

- untuk $w/c = 0,30$

$$(X_{ni})_{0,30} = - 2 \times 10^{-5} t^2 + 0,0157 t + 10,324 \quad (IV.15.c)$$

(b) Beton terintrusi mikroorganisme

- untuk $w/c = 0,57$

$$(X_i)_{0,57} = - 2 \times 10^{-5} t^2 + 0,0103 t + 14,728 \quad (IV.15.d)$$

- untuk $w/c = 0,40$

$$(X_i)_{0,40} = - 0,0001 t^2 + 0,0468 t + 12,036 \quad (IV.15.e)$$

- untuk $w/c = 0,30$

$$(X_i)_{0,30} = - 2 \times 10^{-5} t^2 + 0,0097 t + 12,892 \quad (IV.15.f)$$

Dengan meminimalisasi Persamaan IV.15 (a-f), maka diperoleh parameter waktu (umur/lama intrusi) dan persentase bubuk *slag* nikel maksimum sebagai berikut:

$$(a). \frac{d(X_{ni})_{0,57}}{dt} = 0 \Rightarrow (t_{ni})_{0,57} = 165 \text{ har} \quad (IV.16.a)$$

$$(X_{ni \max})_{0,57} = 13,43\%$$

$$(b). \frac{d(X_{ni})_{0,40}}{dt} = 0 \Rightarrow (t_{ni})_{0,40} = 249,25 \text{ hari} \quad (IV.16.b)$$

$$(X_{ni \max})_{0,40} = 20,93\%$$

$$(c). \frac{d(X_{ni})_{0,30}}{dt} = 0 \Rightarrow (t_{ni})_{0,30} = 392,5 \text{ hari} \quad (IV.16.c)$$

$$(X_{ni \max})_{0,30} = 13,41\%$$

$$(d). \frac{d(X_i)_{0,57}}{dt} = 0 \Rightarrow (t_i)_{0,57} = 257,5 \text{ hari} \quad (IV.16.d)$$

$$(X_{i \max})_{0,57} = 16,05\%$$

$$(e). \frac{d(X_i)_{0,40}}{dt} = 0 \Rightarrow (t_i)_{0,40} = 234 \text{ hari} \quad (IV.16.d)$$

$$(X_{i \max})_{0,40} = 17,51\%$$

$$(d). \frac{d(X_i)_{0,30}}{dt} = 0 \Rightarrow (t_i)_{0,30} = 242,5 \text{ hari} \quad (IV.16.d)$$

$$(X_{i \max})_{0,30} = 14,07\%$$

Maka dari itu, persentase bubuk *slag* nikel rata-rata maksimum pada kondisi nonintrusi dan terintrusi mikroorganisme, masing-masing adalah 15,92% dan 15,88% (dibulatkan menjadi 16%). Kontribusi dari 16% bubuk *slag* nikel terhadap kuat tekan beton yang tidak terkena dan terkena intrusi mikroorganisme dapat direpresentasikan dalam bentuk rasio kuat tekan (fc_{16}/fc_0), di mana fc_{16} adalah kuat tekan beton dengan 16% bubuk *slag* nikel, dan fc_0 adalah kuat tekan beton tanpa bubuk *slag* nikel. Rasio kuat tekan ini dalam fungsi waktu dapat dinyatakan melalui persamaan sebagai berikut:

(1). Beton nonintrusi mikroorganisme

$$- w/c = 0,57$$

$$\left(\frac{fc_{16}}{fc_0} \right)_{ni_{0,57}} = \frac{t}{1,389 + 0,935t} \quad (IV.17.a)$$

$$- w/c = 0,40$$

$$\left(\frac{fc_{16}}{fc_0} \right)_{ni_{0,40}} = \frac{t}{1,566 + 0,929t} \quad (IV.17.b)$$

$$- w/c = 0,30$$

$$\left(\frac{f_{c_{16}}}{f_{c_0}} \right)_{ni_{0,30}} = \frac{t}{0,233 + 0,973t} \quad (IV.17.c)$$

(2). Beton terintrusi mikroorganisme

$$- w/c = 0,57$$

$$\left(\frac{f_{c_{16}}}{f_{c_0}} \right)_{i_{0,57}} = \frac{t}{1,418 + 0,787t} \quad (IV.17.d)$$

$$- w/c = 0,40$$

$$\left(\frac{f_{c_{16}}}{f_{c_0}} \right)_{i_{0,40}} = \frac{t}{1,383 + 0,831t} \quad (IV.17.e)$$

$$- w/c = 0,30$$

$$\left(\frac{f_{c_{16}}}{f_{c_0}} \right)_{i_{0,30}} = \frac{t}{0,847 + 0,847t} \quad (IV.17.f)$$

Kemudian untuk hubungan antara kuat tekan beton terintrusi dan nonintrusi mikroorganisme, baik tanpa maupun dengan 16% bubuk *slag* nikel dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

- Beton tanpa bubuk *slag* nikel:

$$f_{c_{i0}} = 0,791 f_{c_{ni0}} \quad (IV.18.a)$$

- Beton dengan 16% bubuk *slag* nikel:

$$f_{c_{i16}} = 0,901 f_{c_{ni16}} \quad (IV.18.b)$$

Kuat Tarik Belah

Kontribusi bubuk *slag* nikel terhadap kuat tarik belah, baik pada beton yang tidak terkena intrusi maupun yang terkena intrusi mikroorganisme, menunjukkan bahwa kuat tarik belah tertinggi ditemukan

pada ketiga jenis rasio air-semen (w/c) dengan penggunaan 16% bubuk *slag* nikel. Kuat tarik belah dari beton dengan 16% bubuk *slag* nikel pada kondisi tidak terkena intrusi mikroorganisme lebih besar sebesar 7,72% untuk w/c = 0,57, 2,72% untuk w/c = 0,40, dan 1,64% untuk w/c = 0,30 dibandingkan dengan beton yang tidak terkena intrusi mikroorganisme. Hal yang sama terjadi pada beton yang terkena intrusi mikroorganisme, yaitu secara berturut-turut sebesar 20,35% untuk w/c = 0,57, 15,90% untuk w/c = 0,40, dan 7,00% untuk w/c = 0,30.

Kemudian terkait dengan reduksi kuat tarik belah setelah terkena intrusi mikroorganisme, kita berhasil mengonfirmasi bahwa beton tanpa bubuk *slag* nikel mengalami reduksi kuat tarik belah berturut-turut sebesar 14,97% untuk w/c=0,57, 11,80% untuk w/c=0,40, dan 5,87% untuk w/c=0,30. Hal yang sama terjadi pada beton yang menggunakan bubuk *slag* nikel, dengan reduksi terkecil sebesar 5,00% untuk w/c=0,57 pada 16% bubuk *slag* nikel, 0,77% untuk w/c=0,40 pada 14% bubuk *slag* nikel, dan 0,57% untuk w/c=0,30 pada 10% dan 12% bubuk *slag* nikel.

Hubungan antara kuat tarik belah dengan kuat tekan beton nonintrusi dan terintrusi mikroorganisme dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

- **Beton nonintrusi mikroorganisme**

$$T_i = 0,581 \sqrt{f_c} \quad (\text{IV.19.a})$$

- **Beton terintrusi mikroorganisme**

$$T_i = 0,570 \sqrt{f_c} \quad (\text{IV.19.b})$$

Kuat tarik belah pada kedua persamaan tersebut di atas, lebih kecil dari kuat tarik belah menurut ACI363R-92, tetapi lebih besar dari ACI318-02.

Hubungan antara kuat tarik belah beton yang terkena dan tidak terkena intrusi mikroorganisme, baik tanpa maupun dengan 16% bubuk *slag* nikel dapat dinyatakan melalui persamaan sebagai berikut:

- **Beton tanpa bubuk *slag* nikel:**

$$T_{i0} = 0,906 T_{ni0}. \quad (\text{IV.20.a})$$

- Beton dengan 16% bubuk *slag* nikel:

$$T_{i16} = 0,982 T_{ni16} \quad (IV.20.a)$$

Kuat Tarik Lentur

Kuat tarik lentur pada usia 28 hari merupakan nilai rata-rata dari tiga beton yang penulis gunakan. Dalam hal ini, persentase bubuk *slag* nikel yang memberikan kuat tarik lentur terbesar pada kedua kondisi beton tersebut adalah 16% untuk ketiga jenis rasio air-semen. Dengan persentase tersebut, kuat tarik lentur pada beton yang tidak terkena intrusi mikroorganisme lebih besar dibandingkan dengan beton tanpa bubuk *slag* nikel, yaitu masing-masing sebesar 5,26% untuk $w/c = 0,57$, 3,54% untuk $w/c = 0,40$, dan 1,81% untuk $w/c = 0,30$. Hal yang sama terjadi pada beton yang terkena intrusi mikroorganisme, yaitu sebesar 17,67% untuk $w/c=0,57$, 15,81% untuk $w/c=0,40$, dan 7,19% untuk $w/c=0,30$.

Reduksi kuat tarik lentur setelah terkena intrusi mikroorganisme dapat kita konfirmasi, bahwa beton tanpa bubuk *slag* nikel mengalami reduksi kuat tarik lentur yang relatif sama dengan reduksi kuat tarik belah, yaitu berturut-turut sebesar 14,91% untuk $w/c=0,57$, 11,78% untuk $w/c=0,40$, dan 5,87% untuk $w/c=0,30$. Demikian pula halnya dengan beton yang menggunakan bubuk *slag* nikel, reduksi terendah berturut-turut adalah sebesar 4,88% untuk $w/c=0,57$ pada 16% bubuk *slag* nikel, 0,76% untuk $w/c=0,40$ pada 14% bubuk *slag* nikel, dan 0,57% untuk $w/c=0,30$, masing-masing pada 10% dan 12% bubuk *slag* nikel.

Gambar IV.51 dan IV.52 menunjukkan hubungan antara kuat tarik lentur dengan kuat tekan beton nonintrusi dan terintrusi mikroorganisme yang dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

- Beton nonintrusi mikroorganisme

$$R_{ni} = 0,724 \sqrt{fc} \quad (IV.21.a)$$

atau

$$R_{ni} = 0,104 fc \quad (IV.21.b)$$

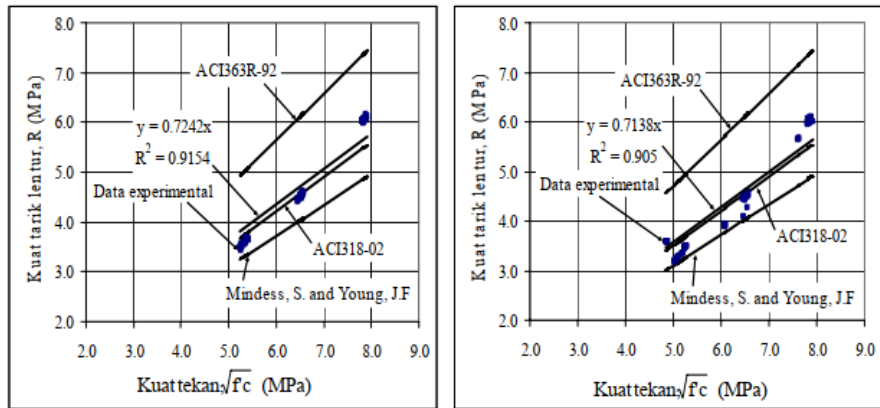
- Beton terintrusi mikroorganisme

$$R_{ni} = 0,714 \sqrt{fc} \quad (IV.21.c)$$

atau

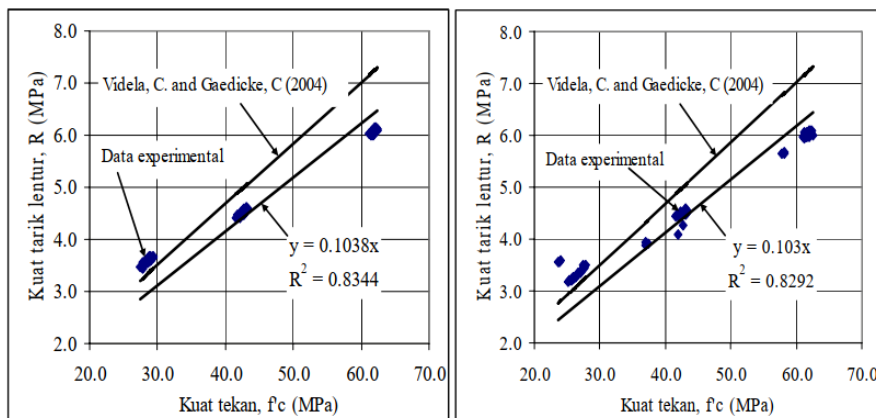
$$R_{ni} = 0,103 f_c \quad (IV.21.d)$$

Kuat tarik lentur pada Persamaan IV.21.a dan IV.21.c dinilai lebih kecil dari kuat tarik lentur menurut ACI363R-92, tetapi lebih besar dari kuat tarik lentur menurut ACI318-02 dan Mindess, dan Young. Sementara kuat tarik lentur menurut Persamaan IV.21.b dan IV.21.d, sedikit lebih kecil dibandingkan kuat tarik lentur menurut usulan Videla dan Gaedicke.



(a). Beton nonintrusi mikroorganisme (b). Beton terintrusi mikroorganisme

Gambar IV.10. Kurva hubungan antara kuat tarik lentur dengan kuat tekan beton nonintrusi dan terintrusi mikroorganisme dan perbandingannya dengan ACI363R-92, ACI318-02, dan Mindess dan Young (1981)



(a). Beton nonintrusi mikroorganisme (b). Beton terintrusi mikroorganisme

Gambar IV.11. Kurva hubungan antara kuat tarik lentur dengan kuat tekan beton nonintrusi dan terintrusi mikroorganisme dan perbandingannya dengan hasil penelitian Videla dan Gaedicke (2004)

Hubungan antara kuat tarik lentur beton terintrusi dan nonintrusi mikroorganisme, baik dengan 16% maupun tanpa bubuk *slag* nikel dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

- **Beton tanpa bubuk *slag* nikel**

$$R_{i0} = 0,908 R_{ni0} \quad (IV.22.a)$$

- **Beton dengan 16% bubuk *slag* nikel**

$$R_{i16} = 0,982 R_{ni16} \quad (IV.22.b)$$

Modulus Elastisitas dan *Poisson's Ratio*

Secara umum, beton yang menggunakan bubuk *slag* nikel memiliki nilai modulus elastisitas yang lebih besar daripada beton tanpa bubuk *slag* nikel, baik pada beton yang tidak terkena intrusi maupun yang terkena intrusi mikroorganisme. Seperti yang terlihat pada analisis hasil pemeriksaan sebelumnya, di mana persentase bubuk *slag* nikel yang memberikan nilai modulus elastisitas terbesar adalah 16%.

Dengan persentase bubuk *slag* nikel tersebut, nilai modulus elastisitas pada beton yang tidak terkena intrusi mikroorganisme lebih besar sebesar 35,69% untuk $w/c = 0,57$, 19,17% untuk $w/c = 0,40$, dan 17,73% untuk $w/c = 0,30$ dibandingkan dengan beton tanpa bubuk *slag* nikel. Demikian pula pada beton yang terkena intrusi mikroorganisme, yaitu secara berturut-turut; 51,42% untuk $w/c = 0,57$, 38,17% untuk $w/c = 0,40$, dan 25,30% untuk $w/c = 0,30$. Meskipun terjadi peningkatan, kita dapat menilai bahwa secara keseluruhan nilai modulus elastisitas beton setelah terintrusi mikroorganisme mengalami reduksi. Reduksi terendah sebesar 9,85% untuk $w/c = 0,57$ dan 4,01% untuk $w/c = 0,40$ masing-masing dengan 16% bubuk *slag* nikel serta 3,28% untuk $w/c = 0,30$ dengan 14% bubuk *slag* nikel.

Hubungan antara modulus elastisitas dengan kuat tekan beton dan perbandingannya dengan berbagai peraturan serta rekomendasi dari studi lainnya, dapat dinyatakan melalui persamaan sebagai berikut:

- **Beton nonintrusi mikroorganisme**

$$E_{c_{ni}} = 3256 \sqrt{f_c} \quad (IV.23.a)$$

- **Beton terintrusi mikroorganisme**

$$E_{c_{ni}} = 3070 \sqrt{f_c} \quad (IV.23.b)$$

Nilai modulus elastisitas yang diperoleh adalah lebih kecil dari nilai modulus elastisitas menurut usulan Videla dan Gaedicke (2004), Rapindrarajah, dkk. (2004), rekomendasi ACI363R-92, dan ACI318-95

Perubahan nilai modulus elastisitas di atas juga diikuti oleh perubahan angka Poisson. Angka Poisson beton nonintrusi mikroorganisme tanpa bubuk *slag* nikel adalah sebesar 0.202 untuk $w/c = 0.57$, 0.210 untuk $w/c = 0.40$, dan 0.235 untuk $w/c = 0.30$. Sementara pada beton terintrusi mikroorganisme berturut-turut adalah 0.195 untuk $w/c = 0.57$, 0.202 untuk $w/c = 0.40$, dan 0.216 untuk $w/c = 0.30$. Dengan penggunaan 16% bubuk *slag* nikel, angka Poisson pada beton nonintrusi mikroorganisme meningkat sebesar 10.039% untuk $w/c = 0.57$, 11.926% untuk $w/c = 0.40$, dan 13.228% untuk $w/c = 0.30$. Demikian pula pada beton terintrusi mikroorganisme, yaitu berturut-turut sebesar 8.168% untuk $w/c = 0.57$, 12.151% untuk $w/c = 0.40$, dan 13.188% untuk $w/c = 0.30$.

Hubungan antara modulus elastisitas beton terintrusi dan nonintrusi mikroorganisme, baik tanpa maupun dengan 16% bubuk *slag* nikel dapat dijelaskan melalui persamaan berikut:

- **Beton tanpa bubuk *slag* nikel**

$$E_{ci0} = 0,910 E_{cni0} \quad (IV.23.a)$$

- **Beton dengan 16% bubuk *slag* nikel**

$$E_{ci16} = 0,944 E_{cni16} \quad (IV.23.a)$$

Hal yang sama untuk angka Poisson juga ditunjukkan pada Gambar IV.58, di mana hubungan antara angka Poisson beton terintrusi dan nonintrusi mikroorganismenya dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

- **Beton tanpa bubuk *slag* nikel:**

$$\nu_{ci0} = 0,946 \nu_{cni0} \quad (IV.25.a)$$

- **Beton dengan 16% bubuk *slag* nikel:**

$$\nu_{ci16} = 0,943 \nu_{cni16} \quad (IV.25.b)$$

Hubungan Tegangan-Regangan

Hubungan tegangan-regangan pada beton tanpa bubuk *slag* nikel setelah terintrusi mikroorganisme menunjukkan perubahan perilaku yang signifikan, terutama pada rasio air-semen (w/c) 0.57 dan 0.40. Hal ini ditandai dengan rentang perilaku linier yang lebih pendek sebelum mencapai tegangan maksimum. Di sisi lain, pada beton yang menggunakan 16% bubuk *slag* nikel, perubahan perilaku tersebut relatif kecil.

Beton dengan 16% bubuk *slag* nikel, baik pada kondisi nonintrusi maupun terintrusi mikroorganisme, menunjukkan rentang perilaku linier yang lebih panjang daripada beton tanpa bubuk *slag* nikel. Artinya, bubuk *slag*, dengan sifat pozzolaniknya, mampu berkontribusi terhadap kekuatan mortar dan ikatan antara mortar dengan agregat (*interface*).

Model konstitutif hubungan tegangan-regangan dibuat melalui adopsi model-model konstitutif yang sudah ada, seperti model Hognestad dan Thorenfeldt. Kedua model konstitutif tersebut adalah sebagai berikut:

- Model Hognestad

$$f_c = \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \right)^2 \right] \quad (IV.26)$$

- Model Thorenfeldt

$$f_c = f'_c \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \right) \left(\frac{n}{n-1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \right)^{nk}} \right) \quad (IV.27)$$

di mana:

- f_c = tegangan tekan beton (MPa)
- f'_c = kuat tekan uniaksial beton (MPa)
- ε_c = regangan tekan beton
- ε'_c = regangan tekan beton pada tegangan f'_c
- $n = 1,0 + f'_c/17$
- $k = 1$ untuk $\varepsilon_c/\varepsilon'_c < 1$
- $= 0,67 + f'_c/62$ untuk $\varepsilon_c/\varepsilon'_c > 1$

Kita dalam hal ini mengadopsi model Thorenfeldt yang dimodifikasi dengan cara mengganti konstanta “n” dan “k” pada Persamaan IV.27 sedemikian sehingga model modifikasinya akan melalui seluruh titik-titik data eksperimental.

Nilai-nilai konstanta “n” dan “k” yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} n &= 1 + \frac{f_c}{10} \quad k = 1; \text{ untuk } \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} < 1 \\ k &= 0,67 + \frac{f_c}{68}; \text{ untuk } \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} > 1 \end{aligned} \quad (IV.28)$$

Dengan demikian model konstitutif yang digunakan sebagai hasil modifikasi dari model Thorenfeldt tersebut adalah sebagai berikut:

- Untuk $\varepsilon_c/\varepsilon'_c < 1$

$$f_c = f'_c \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \right) \left(\frac{1 + \frac{f'_c}{10}}{\left(\frac{f'_c}{10} \right) + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \right)^{\left(1 + \frac{f'_c}{10} \right) \left(0,67 + \frac{f'_c}{68} \right)}} \right) \quad (IV.29. a)$$

- Untuk $\varepsilon_c/\varepsilon'_c > 1$

$$f_c = f'_c \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \right) \left(\frac{1 + \frac{f'_c}{10}}{\left(\frac{f'_c}{10} \right) + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \right) \left(1 + \frac{f'_c}{10} \right) \left(0,67 + \frac{f'_c}{68} \right)} \right) \quad (IV.29.b)$$

Kurva-kurva yang dibentuk oleh Persamaan IV.29.a dan IV.29.b tersebut di atas, cukup representatif terhadap seluruh titik-titik data.

Degradasi Fisik dan Mekanik Beton Pasca-intrusi Kehilangan Berat

Intrusi mikroorganisme dapat mengubah sifat-sifat fisik dan mekanik beton secara merugikan, terutama karena senyawa kalsium hidroksida yang mudah larut oleh produk metabolik mikroorganisme. Proses pelarutan ini terjadi melalui mekanisme seperti yang dijelaskan dalam Persamaan II.4. Dengan terjadinya pelarutan ini, mikroorganisme dapat bertahan hidup dan melakukan aktivitas metabolik di dalam material beton, yang pada akhirnya memengaruhi perilaku fisik dan mekanik beton.

Terkait dengan hubungan antara kehilangan berat dan durasi intrusi pada beton dengan berbagai rasio air-semen, baik tanpa menggunakan bubuk *slag* nikel maupun dengan menggunakan bubuk *slag* nikel, kita melihat bahwa beton tanpa bubuk *slag* nikel mengalami kehilangan berat yang lebih serius dibandingkan dengan beton yang menggunakan bubuk *slag* nikel. Hal ini disebabkan oleh kandungan senyawa kalsium hidroksida yang lebih tinggi pada beton tanpa bubuk *slag* nikel, sehingga menjadi faktor pendukung bagi aktivitas mikroorganisme di dalam material beton. Dengan adanya senyawa silika oksida (SiO_2) dari bubuk *slag* nikel, kalsium hidroksida dapat diubah melalui reaksi kimia, membentuk kalsium silikat hidrat sekunder yang lebih sulit larut oleh produk mikroorganisme.

Kurva kehilangan berat pada beton tanpa bubuk *slag* nikel mengalami peningkatan secara eksponensial. Sementara itu, pada beton yang menggunakan bubuk *slag* nikel menunjukkan peningkatan kehilangan berat yang cenderung mengikuti bentuk persamaan laju pertumbuhan yang mencapai tingkat saturasi. Hal ini juga terlihat pada pertumbuhan mikroorganisme yang umumnya memasuki fase stasioner

dan fase kematian setelah intrusi berlangsung selama rata-rata 216 hari. Kurva-kurva tersebut dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

- **Beton tanpa bubuk *slag* nikel**

$$\Delta w_0 = e^a t^b \quad (IV.30.a)$$

- **Beton dengan bubuk *slag* nikel**

$$\Delta w_x = w_{t0} \left(\frac{t}{a+bt} \right) \quad (IV.30.b)$$

di mana:

Δw_0 = kehilangan berat beton tanpa bubuk *slag* nikel (%)

Δw_x = kehilangan berat beton dengan x % bubuk *slag* nikel (%)

w_{t0} = berat beton pada saat intrusi $t = 0$ (kg)

t = lama intrusi (hari)

a, b = koefisien regresi

Kehilangan berat pada beton tanpa dan dengan 16% bubuk *slag* nikel ternyata tampak relatif lebih kecil dibandingkan dengan pengurangan berat yang dilaporkan oleh Aviam, dkk. (2004), yakni masing-masing sebesar 5,77% dan 2,09% setelah terjadinya intrusi selama 39 hari.

Kehilangan berat ini merupakan hasil dari kerusakan akibat pelarutan senyawa kalsium hidroksida oleh asam asetat (CH_3COOH), produk metabolik mikroorganisme, yang berdampak pada penurunan kepadatan beton. Jenis kerusakan ini telah dijelaskan secara rinci oleh Edwards, dkk. (1997) dan Islander (1999), meskipun mikroorganismenya berbeda.

Pengaruh positif 16% bubuk *slag* nikel terhadap pengurangan kehilangan berat akibat intrusi mikroorganisme dapat diukur melalui rasio antara kehilangan berat beton dengan 16% bubuk *slag* nikel dibandingkan dengan kehilangan berat beton tanpa bubuk *slag*, sebagaimana persamaan berikut:

- **Untuk $w/c = 0,57$**

$$\left(\frac{\Delta w_{16}}{\Delta w_0} \right)_{0,57} = 0,0406 \ln(t) + 0,1794 \quad (IV.31.a)$$

- Untuk $w/c = 0,40$

$$\left(\frac{\Delta w_{16}}{\Delta w_0}\right)_{0,40} = 0,069 \ln(t) + 0,0808 \quad (IV.31.b)$$

- Untuk $w/c = 0,30$

$$\left(\frac{\Delta w_{16}}{\Delta w_0}\right)_{0,30} = 0,0457 \ln(t) + 0,2016 \quad (IV.31.c)$$

Peningkatan Porositas

Peningkatan porositas adalah dampak lanjutan dari kehilangan berat beton setelah terintrusi mikroorganisme. Sebelumnya kita sudah tahu bahwa reaksi antara senyawa silika oksida (SiO_2) dalam bubuk *slag* nikel dengan kalsium hidroksida, produk hidrasi trikalsium silikat, dan dikalsium silikat semen, menghasilkan efek pozzolanik yang dapat mengurangi peningkatan porositas beton akibat intrusi mikroorganisme. Selain itu, butiran bubuk *slag* nikel yang lebih halus dari butiran semen juga memberikan efek penyelimutan, menghambat penyusupan mikroorganisme ke dalam pori-pori beton. Efek-efek ini mencapai maksimalnya pada beton dengan 16% bubuk *slag* nikel.

Peningkatan porositas beton terintrusi mikroorganisme cenderung mengikuti pola yang sama dengan kehilangan berat, di mana porositas beton tanpa bubuk *slag* nikel meningkat secara geometris, sementara pada beton dengan bubuk *slag* nikel, peningkatan porositasnya lebih cenderung mengikuti persamaan fungsi laju pertumbuhan jenuh, sebagaimana pada persamaan berikut:

- Beton tanpa bubuk *slag* nikel

$$\Delta e_0 = e^a t^b \quad (IV.32.a)$$

- Beton dengan bubuk *slag* nikel

$$\Delta e_x = e_{t0} \left(\frac{t}{a+bt} \right) \quad (IV.32.b)$$

Keterangan:

Δe_0 = peningkatan porositas beton tanpa bubuk *slag* nikel (%)

Δe_x = peningkatan porositas beton dengan x % bubuk *slag* nikel (%)

- e_{t0} = porositas beton pada saat intrusi $t = 0$ (%)
 t = lama intrusi (hari)
 a, b = koefisien regresi

Kontribusi 16% bubuk *slag* nikel dalam mereduksi peningkatan porositas akibat intrusi mikroorganisme juga dapat dinyatakan sebagai rasio antara peningkatan porositas beton 16% bubuk *slag* nikel tersebut dengan peningkatan porositas beton tanpa bubuk *slag*. Hal ini dapat kita pelajari pada persamaan berikut:

- **Untuk $w/c = 0,57$**

$$\left(\frac{\Delta e_{16}}{\Delta e_0} \right)_{0,57} = -0,0789 \ln(t) + 0,7826 \quad (IV.33.a)$$

- **Untuk $w/c = 0,40$**

$$\left(\frac{\Delta e_{16}}{\Delta e_0} \right)_{0,40} = -0,0689 \ln(t) + 0,7742 \quad (IV.33.b)$$

- **Untuk $w/c = 0,30$**

$$\left(\frac{\Delta e_{16}}{\Delta e_0} \right)_{0,30} = -0,108 \ln(t) + 0,9713 \quad (IV.33.c)$$

Peningkatan Koefisien Permeabilitas

Pola peningkatan koefisien permeabilitas akibat intrusi mikroorganisme menunjukkan bentuk peningkatan yang mengikuti pola peningkatan porositas, baik pada beton yang menggunakan bubuk *slag* nikel maupun beton tanpa bubuk *slag* nikel. Beton dengan 16% bubuk *slag* nikel menunjukkan peningkatan koefisien permeabilitas yang paling rendah dibandingkan dengan beton tanpa bubuk *slag* nikel. Persamaan matematis untuk menggambarkan kurva peningkatan koefisien permeabilitas dapat dinyatakan melalui formula berikut:

- **Beton tanpa bubuk *slag* nikel**

$$\Delta k_0 = e^a t^b \quad (IV.34.a)$$

- **Beton dengan bubuk *slag* nikel**

$$\Delta k_x = k_{t0} \left(\frac{t}{a+bt} \right) \quad (IV.34.b)$$

Keterangan:

- Δk_0 = peningkatan koefisien permeabilitas tanpa bubuk *slag* nikel (%)
 Δk_x = peningkatan koefisien permeabilitas dengan x % bubuk *slag* nikel (%)
 k_{t0} = koefisien permeabilitas beton pada saat intrusi $t = 0$ (%)
 t = lama intrusi (hari)
 a, b = koefisien regresi

Rasio peningkatan koefisien permeabilitas pada beton dengan 16% bubuk *slag* nikel terhadap beton tanpa bubuk *slag* nikel dapat dijelaskan melalui persamaan berikut:

- Untuk $w/c = 0,57$

$$\left(\frac{\Delta k_{16}}{\Delta k_0} \right)_{0,57} = -0,1127 \ln(t) + 0,9633 \quad (IV.35.a)$$

- Untuk $w/c = 0,40$

$$\left(\frac{\Delta k_{16}}{\Delta k_0} \right)_{0,40} = -0,066 \ln(t) + 0,6856 \quad (IV.35.b)$$

- Untuk $w/c = 0,30$

$$\left(\frac{\Delta k_{16}}{\Delta k_0} \right)_{0,30} = -0,0945 \ln(t) + 0,8633 \quad (IV.35.c)$$

Penurunan Kuat Tekan

Penurunan kuat tekan yang terjadi akibat intrusi mikroorganisme menunjukkan peningkatan seiring dengan berjalannya waktu (lama intrusi), mengikuti pola peningkatan secara eksponensial seperti yang terlihat pada Gambar IV.77. Seperti yang sudah dibahas sebelumnya, beton tanpa bubuk *slag* nikel mengalami penurunan kuat tekan yang lebih signifikan dibandingkan dengan beton yang menggunakan bubuk *slag* nikel. Penurunan ini dipengaruhi oleh peningkatan porositas beton akibat intrusi mikroorganisme.

Penggunaan bubuk *slag* nikel dapat mengendalikan penurunan kuat tekan, dan penurunan terendah terjadi pada beton dengan 16% bubuk *slag* nikel. Pengurangan penurunan kuat tekan pada beton dengan bubuk *slag*

nikel merupakan hasil dari efek pozzolanik, di mana terjadi penambahan senyawa kalsium silikat hidrat melalui reaksi antara senyawa silika oksida (SiO) pada bubuk *slag* nikel dengan senyawa kalsium hidroksida yang dihasilkan dari reaksi hidrasi trikalsium silikat dan dikalsium silikat semen dengan air. Transformasi senyawa kalsium hidroksida menjadi kalsium silikat hidrat ini memiliki efek pengecilan pori, karena kalsium silikat hidrat lebih tahan terhadap dekomposisi oleh aktivitas metabolik mikroorganisme dibandingkan dengan kalsium hidroksida. Penurunan kuat tekan dapat dinyatakan melalui persamaan sebagai berikut:

- **Beton tanpa bubuk *slag* nikel**

$$\Delta f_c = e^a t^b \quad (IV.32.a)$$

- **Beton dengan bubuk *slag* nikel**

$$\Delta f_c = f_{c0} \left(\frac{t}{a+bt} \right) \quad (IV.32.b)$$

Keterangan:

Δf_c = penurunan kuat tekan beton terintrusi mikroorganisme (MPa)

Δf_{c0} = kuat tekan beton pada saat intrusi $t = 0$ hari (MPa)

t = lama intrusi (hari)

a, b = koefisien regresi

Penurunan kuat tekan pada beton tanpa menggunakan bubuk *slag* nikel tampaknya mengikuti pola yang serupa dengan penurunan kuat tekan yang telah dilaporkan oleh Tremper (1989). Kontribusi dari 16% bubuk *slag* nikel terhadap pengurangan penurunan kuat tekan akibat intrusi mikroorganisme dapat dijelaskan melalui rasio penurunan kuat tekan, yang membandingkan beton dengan 16% bubuk *slag* nikel dengan beton tanpa bubuk *slag* nikel. Melalui analisis regresi linier, rasio penurunan kuat tekan ini dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

- **Untuk $w/c = 0,57$**

$$\left(\frac{\Delta f_{c16}}{\Delta f_{c0}} \right)_{0,57} = -0,0682 \ln(t) + 0,8833 \quad (IV.35.a)$$

- **Untuk $w/c = 0,40$**

$$\left(\frac{\Delta f_{c16}}{\Delta f_{c0}} \right)_{0,40} = -0,0523 \ln(t) + 0,8505 \quad (IV.35.b)$$

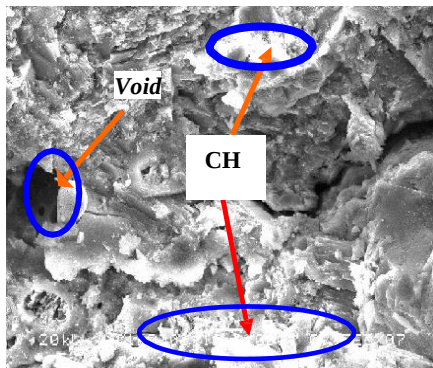
- Untuk $w/c = 0,30$

$$\left(\frac{\Delta f_{c_{16}}}{\Delta f_{c_0}}\right)_{0,30} = -0,0138 \ln(t) + 0,4377 \quad (IV.35. c)$$

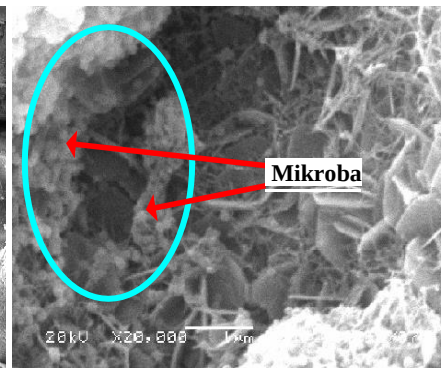
Mikrostruktur dengan *Scanning Electron Microscopy*

Mikroorganisme seperti jamur (*Aspergillus niger*) dan ragi (*Sacchromycodes ludwigi*) memiliki ciri pertumbuhan dalam bentuk koloni dengan diameter berkisar antara 0,05 μm hingga 0,5 μm . Karakteristik pertumbuhan koloni ini menunjukkan potensi untuk menyusup ke dalam pori-pori beton dan berkembang di dalamnya. Dua faktor utama yang mendukung potensi ini adalah ukuran pori beton yang melebihi 0,5 μm dan ketersediaan nutrisi, terutama senyawa kalsium hidroksida. Gambar IV.12 dan IV.13 dari hasil pemeriksaan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menggambarkan dengan jelas kedua faktor tersebut.

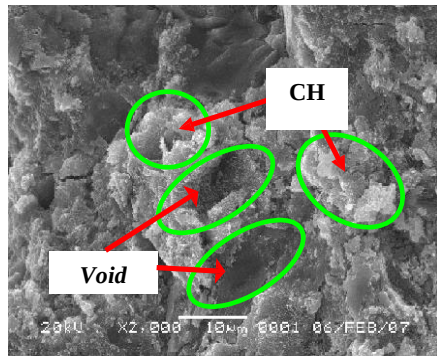
Beton tanpa penambahan bubuk *slag* nikel (BNI25-0, BNI40-0, dan BNI60-0), terlihat pada Gambar IV.12.a, c, dan e, menunjukkan ukuran pori yang relatif besar, mempermudah mikroorganisme untuk menyusup ke dalam pori-pori beton. Selain itu, beton tanpa penambahan bubuk *slag* nikel ini juga mengandung senyawa kalsium hidroksida yang mendukung aktivitas metabolik mikroorganisme, seperti yang dapat dilihat pada Gambar IV.12.b, d, dan f.



(a). BNI25-0 (perbesaran 2.000 kali)



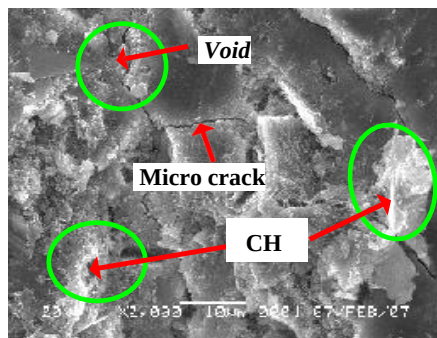
(b). BNI25-0 (perbesaran 20.000 kali)



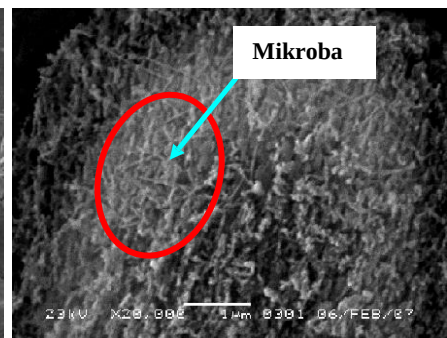
(c). BNI40-0 (perbesaran 2.000 kali)



(d). BI40-0 (perbesaran 20.000 kali)

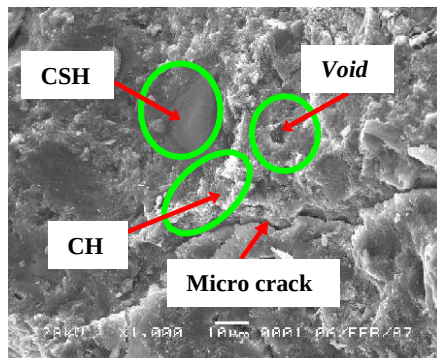


(e). BNI60-0 (perbesaran 2.000 kali)

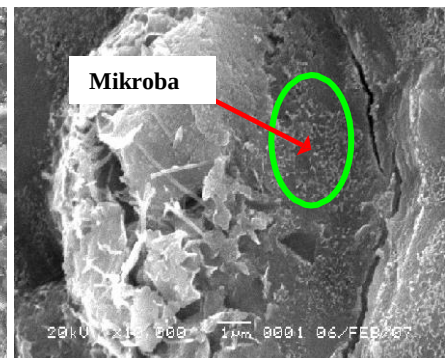


(f). BI60-0 (perbesaran 20.000 kali)

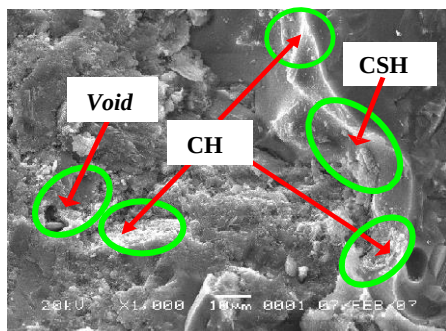
Gambar IV.12. Mikrostruktur dan pertumbuhan mikroorganisme pada beton tanpa bubuk *slag* nikel



(a). BNI25-16 (perbesaran 1.000 kali)



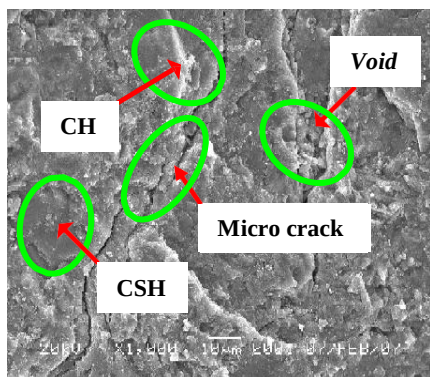
(b). BI25-16 (perbesaran 10.000 kali)



(c). BNI40-16 (perbesaran 1.000 kali)



(d). BI40-16 (perbesaran 10.000 kali)



(e). BNI60-16 (perbesaran 1.000 kali)



(f). BI60-16 (perbesaran 10.000 kali)

Gambar IV.13. Mikrostruktur dan pertumbuhan mikroorganisme pada beton dengan 16% bubuk nikel

Beton yang mengandung 16% bubuk *slag* nikel, seperti yang terlihat pada Gambar IV.13.a, c, dan e, menunjukkan efek pengurangan pori dan efek pozzolanik. Hal ini mengakibatkan berkurangnya penyusupan dan pertumbuhan mikroorganisme di dalam beton, dengan area pertumbuhan yang lebih kecil dibandingkan dengan beton tanpa bubuk *slag* nikel, sebagaimana terlihat pada Gambar IV.13.b, d, dan f. Selain itu, perilaku retakan pada beton ini juga cenderung lebih kuat dibandingkan dengan beton tanpa bubuk *slag* nikel.

Berdasarkan serangkaian pemeriksaan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dengan bantuan alat *Energy Dispersive Analysis X-ray* (EDAX), terdeteksi adanya kandungan unsur kimia utama pada beton yang

meliputi silika (Si), kalsium (Ca), dan oksigen (O). Unsur-unsur kimia minor mencakup aluminium (Al), besi (Fe), magnesium (Mg), natrium (Na), kalium (K), dan sulfur (S).

Unsur kimia silika (Si) dan sebagian besar unsur kalsium (Ca) dan oksigen (O) berasal dari kalsium silika hidrat (CSH). Sebagian unsur kalsium dan oksigen tersebut juga berasal dari kalsium hidroksida (CH) dan ettringite (CASH). Unsur kimia aluminium (Al) dan besi (Fe) berasal masing-masing dari ettringite (CASH) dan kalsium sulpho aluminat ferrit (CSAF). Sedangkan unsur kimia minor magnesium (Mg), natrium (Na), kalium (K), dan sulfur (S) berasal dari semen dan bubuk *slag* nikel yang tidak membentuk kristal (*amorphous*).

Dari hasil pengamatan EDAX kita melihat bahwa unsur silikon (Si) pada beton 16% bubuk *slag* nikel cenderung bertambah, baik pada kondisi nonintrusi maupun terintrusi mikroorganisme. Kondisi ini terjadi karena adanya reaksi antara senyawa kimia silika oksida (SiO_2) bubuk *slag* nikel dengan kalsium hidroksida (CH) hasil sampingan reaksi hidrasi trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S) semen dengan air yang membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (CSH) sekunder atau disebut sebagai reaksi pozzolanik. Kristal kalsium hidroksida (CH) yang terlihat pada Gambar IV.80 dan IV.81, jika dikaitkan dengan hasil *Energy Dispersive Analysis X-ray* (EDAX), kita melihat adanya unsur kalsium (Ca) pada beton tanpa bubuk *slag* nikel mengalami penurunan yang signifikan akibat intrusi mikroorganisme, dibandingkan dengan beton yang mengandung 16% bubuk *slag* nikel. Hal yang sama juga terjadi pada kristal kalsium silikat hidrat (CSH), di mana unsur kalsium (Ca) dan silikon (Si) berkurang akibat aktivitas metabolik mikroorganisme, meskipun pengurangannya relatif lebih kecil dibandingkan dengan kristal kalsium hidroksida (CH).

Analisis Senyawa Kimia dengan X-Ray Diffraction (XRD)

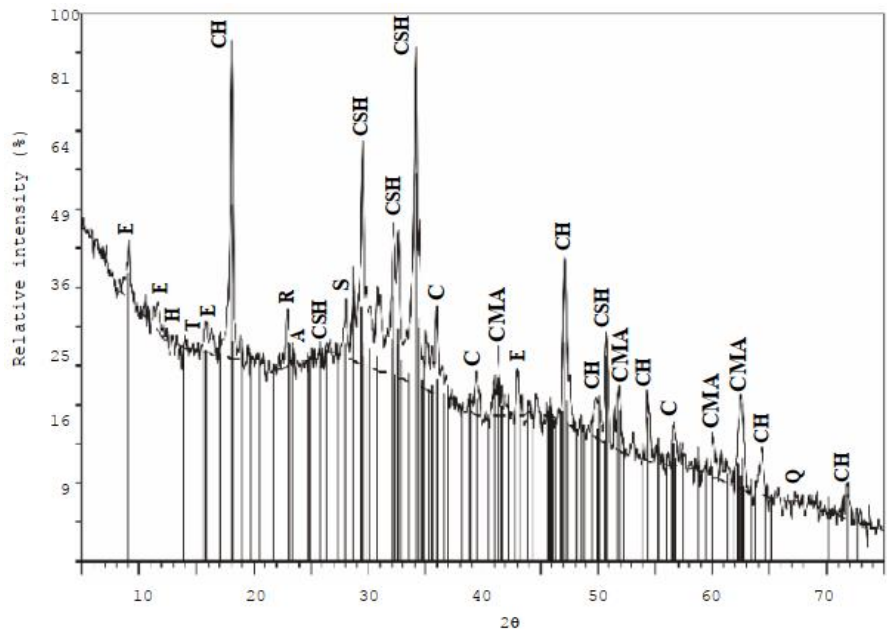
Pemeriksaan dengan melibatkan beton tanpa dan dengan 16% bubuk *slag* nikel, baik saat nonintrusi maupun terintrusi mikroorganisme, dengan kedalaman 0-25 mm, 25-50 mm, dan 50-75 mm, menunjukkan bahwa kristal-kristal yang terbentuk pada material beton mengandung berbagai senyawa kimia, termasuk kalsium hidroksida, kalsium silikat

hidrat, ettringite, kalsium karbonat (calcite), rankinite, kalsium magnesium aluminium silikon oksida, quartz, anorhite, tilleyite, hauyne, dan silikon oksida. Dua senyawa pertama menjadi senyawa dominan, sedangkan yang lainnya merupakan senyawa minor yang umumnya ditemukan pada beton terintrusi mikroorganisme.

Komposisi senyawa-senyawa kimia di atas dihitung berdasarkan perbandingan luas bidang puncak dari masing-masing senyawa kimia kristalin terhadap luas total bidang puncak yang dihasilkan dari hasil observasi XRD. Senyawa-senyawa kimia ini terdeteksi pada sudut difraksi (2θ) yang berbeda-beda, sebagaimana terlihat pada Tabel IV.2.

Tabel IV.2. Sudut difraksi senyawa-senyawa kimia hasil identifikasi XRD

No.	Senyawa kimia	Kode	Sudut difraksi (2θ)
1	Kalsium hidroksida	CH	18.2, 47.3, 50.9, 54.5, dan 71.8
2	Kalsium silikat hidrat	CSH	26.6, 29.4, 32.2, 34.5, dan 50.7
3	Ettringite	E	9.1, 12.3, 15.8, dan 42.3
4	Kalsium karbonat (calcite)	C	36.5, 39.5, dan 56.6
5	Rankinite	R	22.9
6	Kalsium magnesium aluminat	CMA	41.2, 51.8, 60.1, dan 62.6
7	Quartz	Q	67.8
8	Anorhite	A	22.9
9	Tilleyite	T	14.77
10	Hauyne	H	13.87
11	Silikon oksida	S	27.97



Portlandite, $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Calcium Silicate Hydrate, CSH

Ettringite, CASH

Calcite, CaCO_3

Rankinite, $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$

Calcium Magnesium Aluminium Silicon Oxide, $\text{Ca}_{5.4}\text{Mg Al}_2 \text{Si}_{16}\text{O}_{90}$

Quartz, SiO_2

Anorthite, $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_8$

Tilleyite, $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7(\text{CO}_3)_2$

Hauyne, $(\text{Na}, \text{Ca})_8(\text{Si}, \text{Al})_{12} \text{O}_{24}$

Silicon oxide, SiO

Gambar IV.14. Hasil identifikasi senyawa-senyawa kimia pada beton nonintrusi dan terintrusi mikroorganisme dengan *X-Ray Diffraction* (XRD)

Perubahan Senyawa Kalsium Hidroksida (CH)

Perubahan dalam senyawa kalsium hidroksida juga terdeteksi seiring berjalannya waktu atau lama intrusi pada beton tanpa dan dengan 16% bubuk *slag* nikel, baik pada kondisi nonintrusi maupun terintrusi mikroorganisme. Pada kondisi nonintrusi mikroorganisme, kalsium hidroksida pada ketiga rasio air-semen (0,57, 0,40, dan 0,30) tersebut mengalami peningkatan. Sebaliknya, pada kondisi terintrusi mikroorganisme, kandungan senyawa kalsium hidroksida tersebut mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya lama intrusi. Pertambahan ini terjadi karena dampak reaksi dari trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S) semen dengan air. Sementara pengurangan terjadi karena aktivitas metabolik mikroorganisme, di mana kalsium hidroksida terdekomposisikan atau larut akibat zat organik berupa asam asetat (CH_3COOH) sebagai produk metaboliknya.

Di sisi lain, kita melihat adanya pengurangan senyawa kalsium hidroksida akibat penggunaan 16% bubuk *slag* nikel. Namun, pengurangan ini tidak memberikan dampak merugikan; bahkan, kontribusinya bersifat positif karena menyebabkan pembentukan kalsium silikat hidrat (CSH) sekunder melalui reaksi antara silika oksida (SiO_2) bubuk *slag* nikel dan kalsium hidroksida. Terbentuknya kalsium silikat hidrat tersebut mengganggu aktivitas metabolik mikroorganisme di dalam beton karena ketersediaan nutrisi dari kalsium hidroksida berkurang akibat reaksi tersebut.

Dengan menggunakan regresi linier, perubahan senyawa kalsium hidroksida dapat dijelaskan dengan persamaan sebagai berikut:

- **Beton non intrusi mikroorganisme**

$$CH_{ni} = CH_{28} \left(\frac{t}{a+bt} \right) \quad (IV.38.a)$$

- **Beton terintrusi mikroorganisme**

$$CH_i = at^{-b} \quad (IV.38.b)$$

di mana:

CH_{ni} = kalsium hidroksida nonintrusi mikroorganisme (%)

CH_i = kalsium hidroksida terintrusi mikroorganisme (%)

CH_{28} = kalsium hidroksida nonintrusi mikroorganisme 28 hari (%)

t = umur atau lama intrusi (hari)
a, b = koefisien regresi

Perubahan kalsium hidroksida pada beton, baik saat nonintrusi maupun terintrusi mikroorganisme, yang dijelaskan melalui Persamaan IV.38.a dan IV.38.b di atas, menggambarkan adanya pengurangan kalsium hidroksida akibat intrusi mikroorganisme. Pengurangan ini, baik pada beton tanpa maupun dengan 16% bubuk *slag* nikel, menunjukkan bentuk kurva yang cenderung mengikuti pola persamaan logaritmik sebagai berikut:

$$\Delta CH = a \ln(t) - b \quad (IV.39)$$

Notasi t artinya lama intrusi dalam hari, a dan b adalah koefisien regresi. Bentuk persamaan reduksi kalsium hidroksida (Persamaan IV.39) tersebut di atas berbeda dengan bentuk Persamaan II.8 sebagaimana yang diusulkan oleh Tremper (1989). Kontribusi 16% bubuk *slag* nikel terhadap pengurangan kalsium hidroksida, baik dalam kondisi nonintrusi maupun terintrusi mikroorganisme, dapat kita lihat melalui rasio CH_{16} terhadap CH_0 . Dalam hal ini, CH_{16} adalah kalsium hidroksida pada beton dengan 16% bubuk *slag* nikel, dan CH_0 adalah kalsium hidroksida pada beton tanpa bubuk *slag* nikel. Bentuk rasio kalsium hidroksida tersebut untuk beton nonintrusi dan terintrusi mikroorganisme dapat dijelaskan melalui persamaan berikut:

$$\frac{CH_{16}}{CH_0} = at^b \quad (IV.40)$$

Keterangan:

a dan b = koefisien regresi
t = umur atau lama intrusi (hari)

Hubungan antara kalsium hidroksida beton nonintrusi dan terintrusi mikroorganisme dapat dinyatakan melalui persamaan sebagai berikut:

- **Tanpa bubuk *slag* nikel**

$$CH_{10} = 0,602 CH_0 \quad (IV.41.a)$$

- **16% bubuk *slag* nikel**

$$CH_{i16} = 0,559 CH_{i16} \quad (IV.41.b)$$

Perubahan Senyawa Kalsium Silikat Hidrat (CSH)

Perubahan pada senyawa kalsium silikat hidrat (CSH) terjadi seiring dengan berjalannya waktu dan intrusi mikroorganisme pada beton tanpa dan dengan 16% bubuk *slag* nikel, dengan variasi rasio air-semen 0,57, 0,40, dan 0,30. Berbeda dengan perubahan pada senyawa kalsium hidroksida (CH), terutama pada kondisi terintrusi mikroorganisme. Dalam hal ini, perubahan pada senyawa kalsium silikat hidrat (CSH) cenderung mengikuti pola yang sama dengan kondisi nonintrusi mikroorganisme.

Pola perubahan tersebut menggambarkan, bahwa senyawa kalsium silikat hidrat (CSH) memiliki ketahanan yang lebih baik daripada senyawa kalsium hidroksida (CH). Hal ini menunjukkan bahwa reaksi antara zat organik berupa asam asetat (CH_3COOH), produk metabolik mikroorganisme, dengan kalsium silikat hidrat (CSH) tidak mengakibatkan pelarutan pada senyawa kalsium silikat hidrat tersebut. Meskipun kekuatan dan kekakuan beton mengalami penurunan, seperti yang dijelaskan sebelumnya, ketahanan senyawa kalsium silikat hidrat terhadap intrusi mikroorganisme merupakan sifat khusus dari gel silika yang tidak mudah terdekomposisi oleh zat organik, sesuai dengan konsep yang telah diuraikan pada Persamaan II.5.

Dengan menggunakan 16% bubuk *slag* nikel, ketahanan beton pada kondisi terintrusi mikroorganisme meningkat akibat persentase senyawa kalsium silikat hidrat yang meningkat. Pertambahan ini merupakan bentuk kontribusi dari efek pozzolanik yang diberikan melalui reaksi antara silika oksida (SiO_2) bubuk *slag* nikel dengan kalsium hidroksida (CH) produk hidrasi trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S) semen dengan air.

Perubahan kalsium silikat hidrat cenderung mengikuti bentuk persamaan laju pertumbuhan jenuh (*saturation growth-rate equation*) dengan persamaan sebagai berikut:

- **Beton non intrusi mikroorganisme**

$$CSH_{ni} = CSH_{28} \left(\frac{t}{a+bt} \right) \quad (\text{IV.42.a})$$

- **Beton terintrusi mikroorganisme**

$$CSH_i = CSH_0 \left(\frac{t}{a+bt} \right) \quad (\text{IV.42.b})$$

di mana:

CSH_{ni} = kalsium silikat hidrat nonintrusi mikroorganisme (%)

CSH_i = kalsium silikat hidrat terintrusi mikroorganisme (%)

CSH_{28} = kalsium silikat hidrat nonintrusi mikroorganisme 28 hari (%)

CSH_0 = kalsium silikat hidrat pada saat intrusi $t = 0$ (%)

t = umur atau lama intrusi (hari)

a, b = koefisien regresi

Persamaan-persamaan di atas dapat kita gunakan sebagai panduan dalam menganalisis sejauh mana kalsium silikat hidrat dapat berkurang akibat intrusi mikroorganisme. Ketahanan senyawa kalsium silikat hidrat terhadap intrusi mikroorganisme sendiri dapat kita evaluasi melalui pola penurunannya. Penurunan kalsium silikat hidrat, baik pada beton tanpa maupun dengan 16% bubuk *slag* nikel, keduanya mencapai puncak penurunan pada titik tertentu dengan pola penurunan yang mirip dengan persamaan polinomial orde dua (parabola). Penurunan ini dapat dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$\Delta CSH = a t^2 + b \quad (IV.43)$$

Di mana t adalah lama intrusi dalam hari, sedangkan a dan b adalah koefisien regresi.

Rasio antara kalsium silikat hidrat pada beton dengan 16% bubuk *slag* nikel dan beton tanpa bubuk *slag* nikel (CSH_{16}/CSH_0) dalam hal ini menjelaskan adanya kontribusi bubuk *slag* nikel terhadap senyawa kalsium silikat hidrat. Kontribusi ini tampak lebih signifikan pada kondisi terintrusi mikroorganisme dibandingkan saat nonintrusi mikroorganisme, terutama pada beton dengan perbandingan air-semen (w/c) = 0,57. Rasio kalsium silikat hidrat ini, baik pada beton yang tidak terintrusi maupun yang terintrusi mikroorganisme, dapat dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$\frac{CSH_{16}}{CSH_0} = at^b \quad (IV.44)$$

Di mana:

a dan b = koefisien regresi

t = umur atau lama intrusi (hari)

Hubungan antara kalsium silikat hidrat nonintrusi dan terintrusi mikroorganisme pada beton tanpa maupun dengan 16% bubuk *slag* nikel pada intinya dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

- **Tanpa bubuk *slag* nikel**

$$CSH_{i0} = 0,961 CSH_{ni0} \quad (IV.45.a)$$

- **16% bubuk *slag* nikel**

$$CSH_{i16} = 0,987 CSH_{ni16} \quad (IV.45.b)$$

Senyawa-Senyawa Kimia Minor

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, dari hasil analisis *X-Ray Diffraction* (XRD) kita melihat adanya beberapa senyawa kimia minor, seperti ettringite, kalsium karbonat, rankinite, kalsium magnesium aluminium silikon oksida, kuarsa (quartz), anorhite, tilleyite, hauyne, dan silikon oksida. Senyawa-senyawa tersebut ditemukan pada beton, baik dalam kondisi nonintrusi maupun terintrusi mikroorganisme. Khusus untuk senyawa kimia rankinite, hanya terdeteksi pada beton yang terintrusi mikroorganisme. Sementara itu, senyawa-senyawa seperti kuarsa, anorhite, tilleyite, hauyne, dan silikon oksida tidak konsisten, baik pada kondisi nonintrusi maupun terintrusi mikroorganisme.

(1). Ettringite ($Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}$)

Kristal ettringite di sini terbentuk melalui reaksi hidrasi antara trikalsium aluminat (C3A) dalam semen, gipsum, dan air. Pada beton tanpa bubuk *slag* nikel, kandungan ettringite cenderung meningkat seiring dengan lamanya intrusi mikroorganisme, sementara pada kondisi nonintrusi, kandungannya mengalami penurunan sejalan dengan bertambahnya umur beton. Namun, pada beton yang menggunakan 16% bubuk *slag* nikel, baik dalam kondisi terintrusi maupun nonintrusi mikroorganisme, keduanya justru menunjukkan penurunan kandungan ettringite. Pembentukan senyawa ini, baik pada beton tanpa maupun dengan 16% bubuk *slag* nikel, dapat kita jelaskan melalui persamaan berikut:

- **Nonintrusi mikroorganisme**

$$Et_{ni} = a t^b \quad (IV.46.a)$$

- **Terintrusi mikroorganisme**

$$Et_i = Et_0 \left(\frac{t}{a+bt} \right) \quad (IV.46.b)$$

di mana:

Et_{ni} = ettringite pada beton nonintrusi mikroorganisme (%)

Et_i = ettringite pada beton terintrusi mikroorganisme (%)

Et_0 = ettringite pada saat intrusi $t = 0$ (%)

t = umur atau lama intrusi (hari)

a dan b = koefisien regresi

Hubungan linier antara ettringite nonintrusi dan terintrusi mikroorganisme, baik tanpa maupun dengan 16% bubuk *slag* nikel dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

- **Tanpa bubuk *slag* nikel**

$$Et_{i0} = -0,104 Et_{ni0} + 12,881 \quad (IV.47.a)$$

- **16% bubuk *slag* nikel**

$$Et_{i16} = 0.402 Et_{ni16} + 6,283 \quad (IV.47.b)$$

(2). **Calcite ($CaCO_3$)**

Senyawa kalsium karbonat (calcite) terbentuk melalui reaksi antara kalsium hidroksida dengan gas karbon dioksida. Formasi senyawa ini sangat mungkin terjadi pada beton yang terintrusi oleh mikroorganisme karena gas karbon dioksida (CO_2) merupakan salah satu produk metabolik mikroorganisme. Kehadiran senyawa kalsium karbonat dipengaruhi oleh jumlah kalsium hidroksida dan gas karbon dioksida, serta faktor fisik beton seperti porositas. Semakin tinggi porositas beton, semakin besar potensi pembentukan kalsium karbonat.

Beton yang mengandung 16% bubuk *slag* nikel, baik dalam kondisi terintrusi maupun nonintrusi mikroorganisme, mengandung kalsium karbonat yang lebih rendah dibandingkan dengan beton tanpa bubuk *slag*

nikel. Kondisi ini terjadi karena hasil kontribusi dari bubuk *slag* nikel, yang juga melibatkan efek pozzolanik dan efek pengecilan pori secara bersamaan. Kedua efek ini mampu mengurangi jumlah kalsium hidroksida dan porositas beton, sehingga peluang mikroorganisme untuk menembus material beton juga berkurang. Pembentukan ettringite di sini dapat dijelaskan melalui persamaan sebagai berikut:

- **Nonintrusi mikroorganisme**

$$CaCO_{3ni} = a t^b \quad (IV.48.a)$$

- **Terintrusi mikroorganisme**

$$CaCO_{3i} = CaCO_{30} \left(\frac{t}{a+bt} \right) \quad (IV.48.b)$$

di mana:

$CaCO_{3ni}$ = kalsium karbonat beton nonintrusi mikroorganisme (%)

$CaCO_{3i}$ = kalsium karbonat beton terintrusi mikroorganisme (%)

$CaCO_{30}$ = kalsium karbonat pada saat intrusi $t = 0$ (%)

t = umur atau lama intrusi (hari)

a dan b = koefisien regresi

Hubungan linier antara kalsium karbonat beton nonintrusi dan terintrusi mikroorganisme, baik tanpa maupun dengan 16% bubuk *slag* nikel dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

- **Tanpa bubuk *slag* nikel**

$$CaCO_{3i0} = -0,094CaCO_{3ni0} + 6,466 \quad (IV.49.a)$$

- **16% bubuk *slag* nikel**

$$CaCO_{3i16} = -0,115CaCO_{3ni16} + 5,572 \quad (IV.49.b)$$

(3). Kalsium Magnesium Aluminium Silikon Oksida ($Ca_{54} Mg Al_2 Si_{16} O_{90}$)

Saat kondisi nonintrusi mikroorganisme, senyawa kimia $Ca_{54}MgAl_2Si_{16}O_{90}$ terbentuk karena sebagian unsur-unsur kimia, baik yang ada pada trikalsium silikat (C_3S), dikalsium silikat (C_2S), dan trikalsium aluminat (C_3A) belum berhasil membentuk kristal kalsium silikat hidrat

(CSH), kalsium hidroksida (CH), dan ettringite. Senyawa kimia ini berkurang pada kondisi tersebut seiring dengan bertambahnya umur beton. Sementara pada kondisi terintrusi mikroorganisme, senyawa kimia ini cenderung meningkat seiring dengan waktu intrusi yang meningkat, meskipun peningkatannya tidak secara signifikan. Peningkatan senyawa kimia $\text{Ca}_{54}\text{MgAl}_2\text{Si}_{16}\text{O}_{90}$ pada kondisi terintrusi mikroorganisme dipicu oleh aktivitas metabolik mikroorganisme saat membongkar senyawa-senyawa kimia yang mengandung unsur kalsium sebagai nutriennya. Efek pozzolanik dan efek pengecilan pori dari bubuk *slag* nikel juga ditunjukkan sebagaimana pada pembentukan senyawa-senyawa kimia sebelumnya, di mana dengan 16% bubuk *slag* nikel tersebut, senyawa kimia $\text{Ca}_{54}\text{MgAl}_2\text{Si}_{16}\text{O}_{90}$ di dalam material berkurang secara signifikan.

Sebagaimana pembentukan ettringite maupun kalsium karbonat, pembentukan senyawa $\text{Ca}_{54}\text{MgAl}_2\text{Si}_{16}\text{O}_{90}$ juga memiliki pola yang sama dengan persamaan sebagai berikut:

- **Nonintrusi mikroorganisme**

$$\text{CMASO}_{\text{ni}} = a t^b \quad (\text{IV.50.a})$$

- **Terintrusi mikroorganisme**

$$\text{CMASO}_i = \text{CMASO}_0 \left(\frac{t}{a+bt} \right) \quad (\text{IV.50.b})$$

di mana:

CMASO_{ni} = kalsium magnesium aluminium silikon oksida pada beton nonintrusi mikroorganisme (%)

CMASO_i = kalsium magnesium aluminium silikon oksida pada beton terintrusi mikroorganisme (%)

CMASO_0 = kalsium magnesium aluminium silikon oksida pada saat intrusi $t = 0$ (%)

t = umur atau lama intrusi (hari)

a dan b = koefisien regresi

Hubungan linier senyawa kimia $\text{Ca}_{54}\text{MgAl}_2\text{Si}_{16}\text{O}_{90}$ antara beton nonintrusi dan terintrusi mikroorganisme, dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

- Tanpa bubuk *slag* nikel

$$\text{CMASO}_{10} = -0,141\text{CMASO}_{\text{ni}0} + 9,385 \quad (\text{IV.51.a})$$

- Tanpa bubuk *slag* nikel

$$\text{CMASO}_{116} = -0,083\text{CMASO}_{\text{ni}16} + 7,064 \quad (\text{IV.51.b})$$

(4). Rankinite ($\text{Ca}_3 \text{Si}_2 \text{O}_7$)

Seperti yang sudah kita ketahui, senyawa kimia rankinite hanya ditemukan pada beton yang terintrusi oleh mikroorganisme. Kondisi ini merupakan indikasi bahwa senyawa kimia rankinite terbentuk sebagai hasil dari aktivitas metabolik mikroorganisme. Unsur kalsium, yang dilepaskan sebagai produk metabolisme mikroorganisme, berinteraksi dengan silika oksida, baik yang berasal dari semen maupun bubuk *slag* nikel.

Peningkatan senyawa rankinite terjadi seiring dengan peningkatan lama intrusi yang lebih kecil pada beton dengan rasio air-semen yang rendah, sebagaimana dapat dinyatakan melalui persamaan sebagai berikut:

$$\text{Rankinite}(\text{Ca}_3 \text{Si}_2 \text{O}_7) = a t^b \quad (\text{IV.52})$$

Dalam persamaan tersebut, rankinite memiliki satuan dalam persen, t adalah lama intrusi yang dinyatakan dalam hari, sedangkan a dan b adalah koefisien regresi.

Sebagaimana pada pembentukan senyawa-senyawa kimia sebelumnya, rankinite pada beton yang menggunakan 16% bubuk *slag* nikel, juga berkurang secara signifikan karena efek pozzolanik dan efek pengecilan pori dari bubuk *slag* nikel tersebut. Pengurangan tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk rasio, seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$\left(\frac{(\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7)_{16}}{(\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7)_0} \right) = R_{t14} \left(\frac{t}{a+bt} \right) \quad (\text{IV.53})$$

di mana:

$(\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7)_{16}$ = rankinite pada beton 16% bubuk *slag* nikel (%)

$(\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7)_0$ = rankinite pada beton tanpa bubuk *slag* nikel (%)

R_{t14} = rasio rankinite pada saat intrusi $t = 14$ hari

t = lama intrusi (hari)
a dan b = koefisien regresi

Hubungan antara Parameter

Peningkatan Porositas dan Total Koloni Mikroorganisme

Intrusi mikroorganisme seperti yang kita ketahui merupakan pemicu meningkatnya porositas dan koefisien permeabilitas. Peningkatan yang terjadi selalu bertambah seiring meningkatnya total koloni mikroorganisme di dalam material beton. Peningkatan porositas sebagai fungsi total koloni mikroorganisme pada beton 16% bubuk *slag* nikel, dalam hal ini relatif lebih kecil dibandingkan beton tanpa bubuk *slag* nikel. Kita juga melihat bahwa semakin tinggi mutu beton, peningkatan porositasnya justru semakin rendah. Bentuk peningkatan yang terjadi cenderung mengikuti bentuk persamaan fungsi geometri. Semua peningkatan ini dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

(a). Beton w/c = 0,57

- Tanpa bubuk *slag* nikel: $\Delta e_0 = 6,994 C^{0,163}$ (IV.54.a)
- 16% bubuk *slag* nikel: $\Delta e_{16} = 7,022 C^{0,082}$ (IV.54.a)

(b). Beton w/c = 0,40

- Tanpa bubuk *slag* nikel: $\Delta e_0 = 7,516 C^{0,147}$ (IV.54.c)
- 16% bubuk *slag* nikel: $\Delta e_{16} = 8,542 C^{0,054}$ (IV.54.d)

(c). Beton w/c = 0,30

- Tanpa bubuk *slag* nikel: $\Delta e_0 = 6,469 C^{0,157}$ (IV.54.e)
- 16% bubuk *slag* nikel: $\Delta e_{16} = 7,523 C^{0,058}$ (IV.54.f)

Dalam persamaan di atas, Δe_0 dan Δe_{16} adalah persentase peningkatan porositas masing-masing pada beton tanpa dan dengan 16% bubuk *slag* nikel dan C adalah total koloni mikroorganisme yang dinyatakan dalam cfu/gr.

Peningkatan Porositas dan Reduksi Kalsium Hidroksida

Mikroorganisme dalam aktivitas metabolisme memiliki pengaruh terhadap senyawa kalsium hidroksida dalam bahan beton. Semakin lama

rentang waktu intrusi, reduksi senyawa kalsium hidroksida menjadi lebih signifikan. Ruang hampa yang terbentuk akibat reduksi senyawa kimia ini akan meningkatkan porositas beton. Sejauh ini kita sudah dapat menilai bahwa semakin besar reduksi senyawa kalsium hidroksida, maka porositas beton juga semakin meningkat. Kurva peningkatan porositas pada beton tanpa bubuk *slag* nikel cenderung mengikuti bentuk fungsi linier, sedangkan pada beton 16% bubuk *slag* nikel, peningkatannya cenderung mengikuti fungsi geometri. Hubungan antara peningkatan porositas dan reduksi kalsium hidroksida dapat dinyatakan melalui persamaan berikut:

(a). Beton w/c = 0,57

- Tanpa bubuk *slag* nikel: $\Delta e_0 = 2,009 \Delta CH$ (IV.55.a)
- 16% bubuk *slag* nikel: $\Delta e_{16} = 3,881(\Delta CH)^{0,549}$ (IV.55.b)

(b). Beton w/c = 0,40

- Tanpa bubuk *slag* nikel: $\Delta e_0 = 1,613 \Delta CH$ (IV.55.c)
- 16% bubuk *slag* nikel: $\Delta e_{16} = 2,036(\Delta CH)^{0,733}$ (IV.55.d)

(c). Beton w/c = 0,30

- Tanpa bubuk *slag* nikel: $\Delta e_0 = 1,465 \Delta CH$ (IV.55.e)
- 16% bubuk *slag* nikel: $\Delta e_{16} = 1,391(\Delta CH)^{0,834}$ (IV.55.f)

Pada persamaan di atas, notasi Δe_0 dan Δe_{16} adalah persentase peningkatan porositas masing-masing pada beton tanpa dan dengan 16% bubuk *slag* nikel dan ΔCH adalah persentase reduksi kalsium hidroksida.

Peningkatan Porositas dan Reduksi Kalsium Silikat Hidrat

Aktivitas metabolik pada mikroorganisme juga berdampak pada senyawa kalsium silikat hidrat yang tereduksi di dalam beton. Reduksi ini berpengaruh juga terhadap meningkatnya porositas beton dengan pola mengikuti bentuk persamaan fungsi polinomial berorde dua (parabola). Dalam hal ini, senyawa kalsium silikat hidrat tidak mudah didekomposisikan oleh aktivitas metabolik mikroorganisme karena gel silika (Si(OH)_4) tidak mudah larut oleh zat-zat organik termasuk asam asetat (CH_3COOH). Semua itu dapat dinyatakan dengan persamaan

sebagai berikut:

(a). Beton w/c = 0,57

- Tanpa bubuk *slag* nikel:

$$\Delta e_0 = -5,343(\Delta CSH)^2 + 16,551\Delta CSH \quad (IV.56.a)$$

- 16% bubuk *slag* nikel:

$$\Delta e_{16} = -2,393(\Delta CSH)^2 + 17,499\Delta CSH \quad (IV.56.b)$$

(b). Beton w/c = 0,40

- Tanpa bubuk *slag* nikel:

$$\Delta e_0 = -11,424(\Delta CSH)^2 + 22,875\Delta CSH \quad (IV.56.c)$$

- 16% bubuk *slag* nikel:

$$\Delta e_{16} = -3,578(\Delta CSH)^2 + 19,079\Delta CSH \quad (IV.56.d)$$

(c). Beton w/c = 0,30

- Tanpa bubuk *slag* nikel:

$$\Delta e_0 = -13,760(\Delta CSH)^2 + 23,155\Delta CSH \quad (IV.56.e)$$

- 16% bubuk *slag* nikel:

$$\Delta e_{16} = -27,367(\Delta CSH)^2 + 52,68\Delta CSH \quad (IV.56.f)$$

Peningkatan Koefisien Permeabilitas dan Total Koloni Mikroorganisme

Hubungan antara peningkatan koefisien permeabilitas dan total koloni mikroorganisme juga kita lihat cenderung mengikuti pola yang sama seperti hubungan antara peningkatan porositas dan total koloni mikroorganisme. Peningkatan koefisien permeabilitas pada beton dengan 16% bubuk *slag* nikel di sini juga relatif lebih kecil dibandingkan dengan beton tanpa bubuk *slag* nikel. Sama halnya dengan kualitas beton, semakin tinggi kualitas beton, peningkatan koefisien permeabilitasnya akan semakin rendah. Lebih jelasnya dapat kita lihat dari persamaan berikut:

(a). Beton w/c = 0,57

- Tanpa bubuk *slag* nikel: $\Delta k_0 = 5,238 C^{0,189}$ (IV.57.a)
- 16% bubuk *slag* nikel: $\Delta k_{16} = 6,959 C^{0,080}$ (IV.57.b)

(b). Beton w/c = 0,40

- Tanpa bubuk *slag* nikel: $\Delta k_0 = 7,807 C^{0,142}$ IV.57.c)
- 16% bubuk *slag* nikel: $\Delta k_{16} = 7,330 C^{0,048}$ (IV.57.d)

(c). Beton w/c = 0,30

- Tanpa bubuk *slag* nikel: $\Delta k_0 = 6,025 C^{0,163}$ (IV.57.e)
- 16% bubuk *slag* nikel: $\Delta k_{16} = 6,456 C^{0,060}$ (IV.57.f)

Pada persamaan di atas, Δk_0 dan Δk_{16} adalah persentase peningkatan koefisien permeabilitas masing-masing pada beton tanpa dan dengan 16% bubuk *slag* nikel dan C adalah total koloni mikroorganisme yang dinyatakan dalam cfu/gr.

Peningkatan Koefisien Permeabilitas dan Reduksi Kalsium Hidroksida

Reduksi kalsium hidroksida akibat aktivitas metabolik mikroorganisme dapat kita konfirmasi menjadi pemicu meningkatnya koefisien permeabilitas beton. Bentuk kurva peningkatan tersebut pada beton tanpa bubuk *slag* nikel mengikuti bentuk persamaan fungsi linier, sementara pada beton dengan 16% bubuk *slag* nikel cenderung mengikuti bentuk persamaan fungsi geometri. Bentuk fungsi peningkatan di sini sama seperti bentuk fungsi pada peningkatan porositas versus reduksi kalsium hidroksida. Lebih jelasnya dapat kita lihat dari persamaan sebagai berikut:

(a). Beton w/c = 0,57

- Tanpa bubuk *slag* nikel: $\Delta k_0 = 1,868 \Delta CH$ (IV.58.a)
- 16% bubuk *slag* nikel: $\Delta k_{16} = 4,088(\Delta CH)^{0,506}$ IV.58.b)

(b). Beton w/c = 0,40

- Tanpa bubuk *slag* nikel: $\Delta k_0 = 1,564 \Delta CH$ (IV.58.c)
- 16% bubuk *slag* nikel: $\Delta k_{16} = 2,670(\Delta CH)^{0,527}$ IV.58.d)

(c). Beton w/c = 0,30

- Tanpa bubuk *slag* nikel: $\Delta k_0 = 1,396 \Delta CH$ (IV.58.e)
- 16% bubuk *slag* nikel: $\Delta k_{16} = 1,465(\Delta CH)^{0,740}$ (IV.58.f)

Pada persamaan di atas, notasi Δk_0 dan Δk_{16} masing-masing adalah persentase peningkatan koefisien permeabilitas pada beton tanpa dan dengan 16% bubuk *slag* nikel, sedangkan ΔCH adalah persentase reduksi kalsium hidroksida.

Peningkatan Koefisien Permeabilitas dan Reduksi Kalsium Silikat Hidrat

Reduksi kalsium silikat hidrat yang dipicu oleh aktivitas metabolik mikroorganisme tidak hanya meningkatkan porositas beton, tetapi juga koefisien permeabilitas. Hubungan antara peningkatan koefisien permeabilitas dan reduksi kalsium silikat hidrat mengikuti pola yang sama dengan hubungan antara peningkatan porositas dan reduksi kalsium silikat hidrat. Peningkatan koefisien permeabilitas dan reduksi kalsium silikat hidrat dapat direpresentasikan dalam bentuk persamaan berikut:

(a). Beton w/c = 0,57

- Tanpa bubuk *slag* nikel:
 $\Delta k_0 = -5,465(\Delta CSH)^2 + 16,413\Delta CSH$ (IV.59.a)
- 16% bubuk *slag* nikel:
 $\Delta e_{16} = -2,30(\Delta CSH)^2 + 16,556\Delta CSH$ (IV.59.b)

(b). Beton w/c = 0,40

- Tanpa bubuk *slag* nikel:
 $\Delta e_0 = -11,061(\Delta CSH)^2 + 20,161\Delta CSH$ (IV.59.c)
- 16% bubuk *slag* nikel:
 $\Delta e_{16} = -4,549(\Delta CSH)^2 + 20,458\Delta CSH$ (IV.59.d)

(c). Beton w/c = 0,30

- Tanpa bubuk *slag* nikel:

$$\Delta e_0 = -27,215(\Delta CSH)^2 + 51,856\Delta CSH \quad (IV.59.e)$$

- 16% bubuk *slag* nikel:

$$\Delta e_{16} = -12,571(\Delta CH)^2 + 20,431\Delta CSH \quad (IV.59.f)$$

Penurunan Kuat Tekan dan Total Koloni Mikroorganisme

Ketahanan material beton terhadap intrusi mikroorganisme dapat diukur melalui hubungan antara penurunan kuat tekan dan total koloni mikroorganisme. Pengukuran dalam hal ini menunjukkan adanya penurunan yang meningkat seiring bertambahnya total koloni mikroorganisme dalam beton. Peningkatan tersebut cenderung mengikuti pola fungsi geometri, dengan persamaan sebagai berikut:

(a). Beton w/c = 0,57

- Tanpa bubuk *slag* nikel: $\Delta f_{c_0} = 15,120 C^{0,072} \quad (IV.60.a)$

- 16% bubuk *slag* nikel: $\Delta f_{c_{16}} = 13,846 C^{0,023} \quad (IV.60.b)$

(b). Beton w/c = 0,40

- Tanpa bubuk *slag* nikel: $\Delta f_{c_0} = 13,805 C^{0,061} \quad (IV.60.c)$

- 16% bubuk *slag* nikel: $\Delta f_{c_{16}} = 12,429 C^{0,020} \quad (IV.60.d)$

(c). Beton w/c = 0,30

- Tanpa bubuk *slag* nikel: $\Delta f_{c_0} = 11,811 C^{0,056} \quad (IV.60.e)$

- 16% bubuk *slag* nikel: $\Delta f_{c_{16}} = 5,641 C^{0,034} \quad (IV.60.f)$

Pada persamaan di atas, Δf_{c_0} dan $\Delta f_{c_{16}}$ masing-masing adalah persentase penurunan kuat tekan pada beton tanpa dan dengan 16% bubuk *slag* nikel, sedangkan C adalah total koloni mikroorganisme yang dinyatakan dalam satuan cfu/gr.

Penurunan Kuat Tekan dan Reduksi Kalsium Hidroksida

Reduksi senyawa kalsium hidroksida akibat aktivitas metabolik mikroorganisme dalam material beton memicu turunnya nilai kuat tekan

beton. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa penurunan kuat tekan di sini cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya reduksi senyawa kalsium hidroksida. Peningkatan ini juga cenderung mengikuti pola fungsi geometri, dengan persamaan sebagai berikut:

(a). Beton w/c = 0,57

- Tanpa bubuk *slag* nikel: $\Delta f_{c_0} = 12,629(\Delta CH)^{0,289}$ (IV.61.a)

- 16% bubuk *slag* nikel: $\Delta f_{c_{16}} = 12,256(\Delta CH)^{0,126}$ (IV.61.b)

(b). Beton w/c = 0,40

- Tanpa bubuk *slag* nikel: $\Delta f_{c_0} = 7,752(\Delta CH)^{0,383}$ (IV.61.c)

- 16% bubuk *slag* nikel: $\Delta f_{c_{16}} = 9,816(\Delta CH)^{0,130}$ (IV.61.d)

(c). Beton w/c = 0,30

- Tanpa bubuk *slag* nikel: $\Delta f_{c_0} = 7,791(\Delta CH)^{0,307}$ (IV.61.e)

- 16% bubuk *slag* nikel: $\Delta f_{c_{16}} = 5,291(\Delta CH)^{0,057}$ (IV.61.f)

Pada persamaan di atas, Δf_{c_0} dan $\Delta f_{c_{16}}$ masing-masing adalah persentase penurunan kuat tekan pada beton tanpa dan dengan 16% bubuk *slag* nikel, sedangkan ΔCH adalah persentase reduksi senyawa kalsium hidroksida.

Penurunan Kuat Tekan dan Reduksi Kalsium Silikat Hidrat

Aktivitas metabolik mikroorganisme dalam material beton dapat menyebabkan senyawa kalsium silikat hidrat menjadi tereduksi sehingga nilai kuat tekan beton menjadi menurun. Hubungan antara penurunan kuat tekan dan reduksi senyawa kalsium silikat tersebut cenderung mengikuti bentuk persamaan fungsi polinom berorde dua (parabola), sebagaimana dapat kita nyatakan melalui persamaan berikut:

(a). Beton w/c = 0,57

- Tanpa bubuk *slag* nikel:

$$\Delta f_{c_0} = -9,311(\Delta CSH)^2 + 25,564\Delta CSH \quad (IV.62.a)$$

- 16% bubuk *slag* nikel:

$$\Delta f_{c_{16}} = -1,586(\Delta CSH)^2 + 13,34\Delta CSH \quad (IV.62.b)$$

(b). Beton w/c = 0,40

- Tanpa bubuk *slag* nikel:

$$\Delta f_{c_0} = -17,151(\Delta CSH)^2 + 30,768\Delta CSH \quad (IV.62.c)$$

- 16% bubuk *slag* nikel:

$$\Delta f_{c_{16}} = -5,849(\Delta CSH)^2 + 22,555\Delta CSH \quad (IV.62.d)$$

(c). Beton w/c = 0,30

- Tanpa bubuk *slag* nikel:

$$\Delta f_{c_0} = -9,133(\Delta CSH)^2 + 15,323\Delta CSH \quad (IV.62.e)$$

- 16% bubuk *slag* nikel:

$$\Delta f_{c_{16}} = -15,985(\Delta CH)^2 + 35,191\Delta CSH \quad (IV.62.f)$$

Pada persamaan di atas, Δf_{c_0} dan $\Delta f_{c_{16}}$ masing-masing adalah persentase penurunan kuat tekan pada beton tanpa dan dengan 16% bubuk *slag* nikel, sedangkan ΔCSH adalah persentase reduksi senyawa kalsium silikat hidrat.

Penurunan Kuat Tekan dan Peningkatan Porositas

Peningkatan porositas dan penurunan kuat tekan sebagai akibat aktivitas metabolik mikroorganisme dalam material beton merupakan dua parameter yang mencerminkan tingkat ketahanan material beton terhadap intrusi mikroorganisme. Hubungan keduanya cenderung mengikuti bentuk persamaan fungsi geometri, yang dapat kita nyatakan melalui persamaan berikut:

(a). Beton w/c = 0,57

- Tanpa bubuk *slag* nikel: $\Delta f_{c_0} = 7,622(\Delta e)^{0,391} \quad (IV.63.a)$

- 16% bubuk *slag* nikel: $\Delta f_{c_{16}} = 13,171(\Delta e)^{0,087} \quad (IV.63.b)$

(b). Beton w/c = 0,40

- Tanpa bubuk *slag* nikel: $\Delta f_{c_0} = 6,653(\Delta e)^{0,383} \quad (IV.63.c)$

- 16% bubuk *slag* nikel: $\Delta f_{c_{16}} = 12,579(\Delta e)^{0,053} \quad IV.63.d)$

(c). Beton w/c = 0,30

- Tanpa bubuk *slag* nikel: $\Delta f_{c0} = 6,389(\Delta e)^{0,339}$ (IV.63.e)

- 16% bubuk *slag* nikel: $\Delta f_{c16} = 5,807(\Delta e)^{0,086}$ (IV.63.f)

Pada persamaan di atas, Δf_{c0} dan Δf_{c16} masing-masing adalah persentase penurunan kuat tekan pada beton tanpa dan dengan 16% bubuk *slag* nikel, sedangkan Δe adalah persentase peningkatan porositas.

Normalisasi Total Koloni Mikroorganisme terhadap Material Binder

Pengukuran total koloni mikroorganisme dilakukan dengan cara menghitung jumlah satuan koloni mikroorganisme per satuan berat beton. Agar lebih akurat, hasil pengukuran sebaiknya dinormalisasi terhadap satuan berat bahan pengikat. Dengan menggunakan data komposisi material dari desain campuran beton, hubungan antara total koloni mikroorganisme dalam material pengikat terhadap waktu intrusi pada beton tanpa dan dengan 16% bubuk *slag* nikel dapat kita nyatakan melalui Persamaan IV.63.a dan IV.63.b.

(a). Beton tanpa bubuk *slag* nikel

$$\log(C) = a \log(t) \quad (IV.64.a)$$

(b). Beton dengan bubuk *slag* nikel

$$\log(C) = a(\log t)^2 + B \log(t) + c \quad (IV.64.b)$$

Dalam hal ini kita melihat adanya hubungan antara total koloni mikroorganisme maksimum dengan persentase bubuk *slag* nikel pada berbagai kedalaman intrusi. Terbukti juga bahwa total koloni mikroorganisme di dalam material binder dapat diminimalisasi oleh penggunaan bubuk *slag* nikel. Pada kedalaman intrusi 0-25 mm, kita juga sudah bisa mengonfirmasi bahwa persentase terbaik dari bubuk *slag* nikel untuk ketiga jenis mutu beton (w/c = 0,57, 0,40, dan 0,30) adalah sebesar 16%. Sementara pada kedalaman intrusi 25-50 mm dan 50-75 mm, masing-masing adalah sebesar 14% untuk beton dengan rasio air-semen (w/c = 0,57) dan 16% untuk beton dengan rasio air-semen (w/c = 0,40 dan 0,30).

BAGIAN V

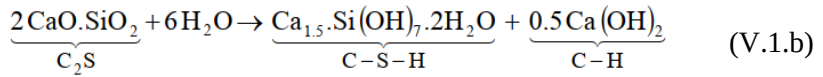
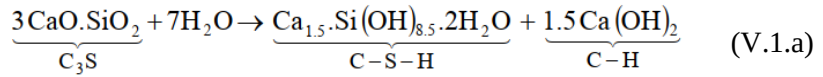
Bagaimana Mengoptimasi Bubuk *Slag* Nikel dalam Sistem Ternary C-A-S?

Pada bagian ini kita akan bersama-sama membahas tentang bagaimana optimasi bubuk *slag* nikel dalam sistem ternary C-A-S ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) melalui persamaan keseimbangan reaksi kimiawi. Persamaan di sini meliputi tiga fase utama yaitu fase terbentuknya kalsium silika hidrat (CSH) hasil reaksi trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S) semen dengan air (H_2O), fase terbentuknya kalsium silika hidrat sekunder akibat reaksi pozzolanik bubuk *slag* nikel dengan kalsium hidroksida produk reaksi fase pertama, dan fase hidrogarnet sebagai produk reaksi kimiawi antara ion aluminium bubuk *slag* nikel dengan kalsium hidroksida produk reaksi fase pertama.

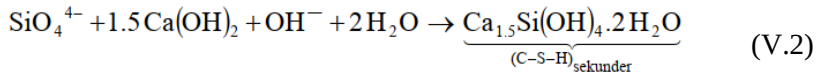
Persamaan Keseimbangan Reaksi Kimiawi

(1). Fase utama produk kalsium silikat hidrat (CSH-primer)

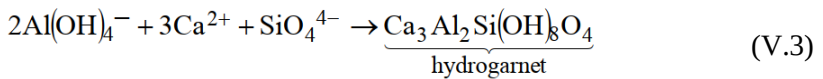
Reaksi antara trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S) semen dengan air (H_2O) akan membentuk gel kalsium silika hidrat (CSH) dan kalsium hidroksida (CH), sebagaimana pada Persamaan II.14 dan II.15. Harga x pada kedua persamaan tersebut ditentukan berdasarkan hasil pemeriksaan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) yaitu sebesar 1.5.



(2). Fase sekunder produk kalsium silikat hidrat (CSH-sekunder)



(3). Fase hydrogarnet



Dari Persamaan V.1 hingga V.3 di atas, kita melihat bahwa produk reaksi yang dihasilkan terdiri atas tiga komponen utama yaitu kalsium silikat hidrat (CSH), kalsium hidroksida (CH) dan hydrogarnet (CASH). Ketiganya merupakan dasar untuk membangun persamaan keseimbangan gabungan mineral dalam sistem ternary C-A-S ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$).

Pada komponen kalsium silikat hidrat (CSH), rasio CaO/SiO_2 (C/S) adalah 1,50, sementara pada komponen hydrogarnet, $\text{C/S} = 3,0$ dan rasio $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ (A/S) adalah 1,0. Kemudian pada komponen kalsium hidroksida (CH), rasio C/S dan A/S adalah nol. Dari rasio-rasio tersebut, jumlah senyawa-senyawa kimia CaO , Al_2O_3 , dan SiO_2 di dalam komponen-komponen masing-masing dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\text{C} = 1,5 \text{ S}_{\text{CSH}} + 3,0 \text{ S}_{\text{Hydrogarnet}} + 0 \text{ S}_{\text{CH}} \quad (\text{V.4.a})$$

$$\text{A} = 0 \text{ S}_{\text{CSH}} + 1,0 \text{ S}_{\text{Hydrogarnet}} + 0 \text{ S}_{\text{CH}} \quad (\text{V.4.b})$$

$$\text{S} = 1,0 \text{ S}_{\text{CSH}} + 1,0 \text{ S}_{\text{Hydrogarnet}} + 0 \text{ S}_{\text{CH}} \quad (\text{V.4.c})$$

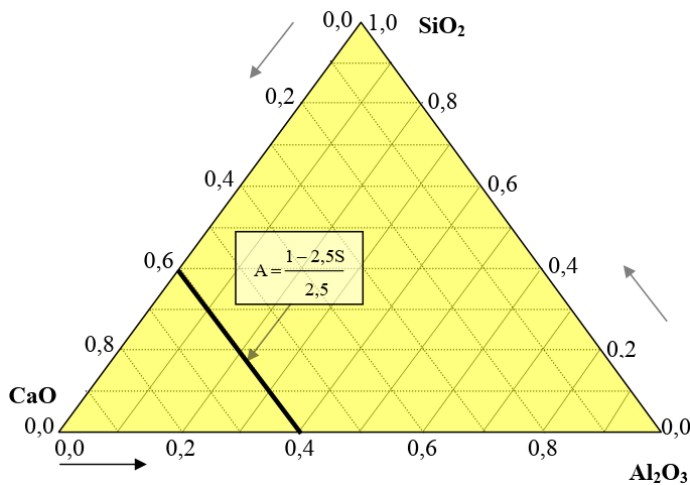
Dalam sistem ternary C-A-S ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$), jumlah senyawa-senyawa pada Persamaan V.4.a hingga V.4.c di atas adalah sebagai berikut:

$$\text{C} + \text{S} + \text{A} = 1 \quad (\text{V.5})$$

Dengan memasukkan Persamaan V.4.a, V.4.b, dan V.4.c ke Persamaan V.5, persamaan keseimbangan gabungan mineral yang diperoleh adalah sebagai berikut:

$$A = \frac{(1 - 2,5S)}{2,5} \quad (V.6)$$

Persamaan keseimbangan gabungan mineral di atas digambarkan dalam diagram sistem ternary C-A-S ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$), sebagaimana Gambar V.1.



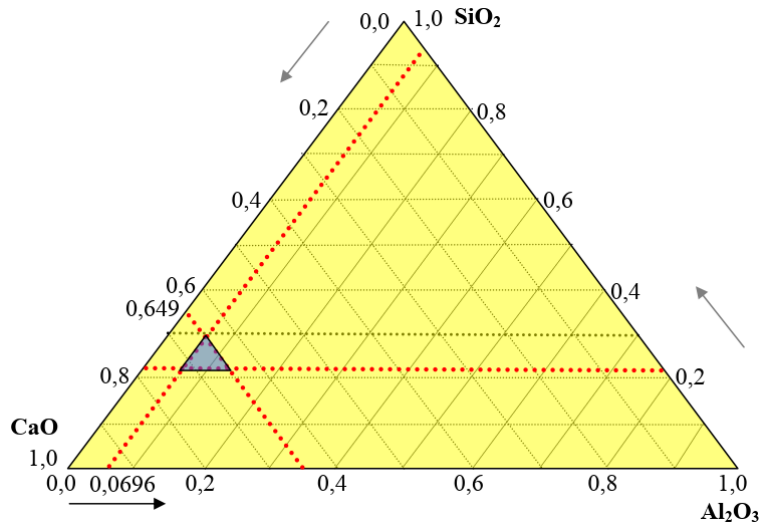
Gambar V.1. Posisi garis keseimbangan gabungan mineral C-A-S

Pembuatan Garis Pencampuran Material Semen dan Bubuk *Slag* Nikel

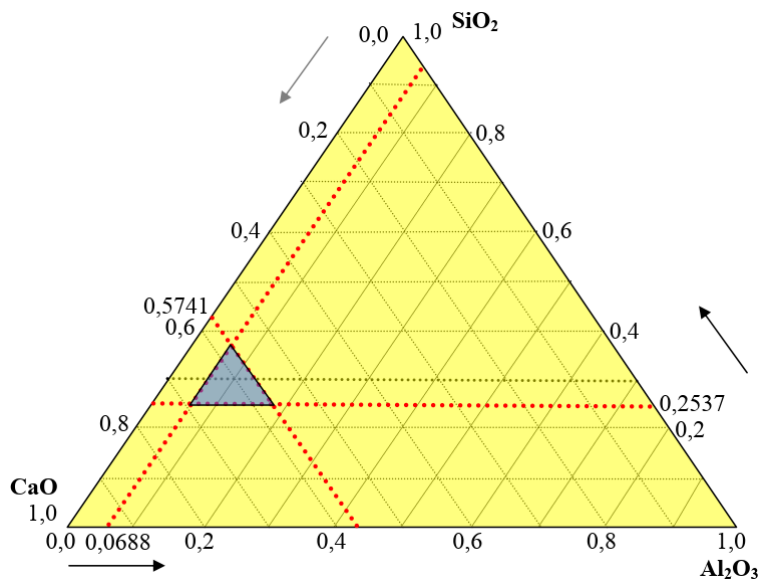
Agar dapat diperoleh garis pencampuran antara material semen dan bubuk *slag* nikel, maka kita perlu data masukan berupa persentase senyawa-senyawa kimia; CaO , Al_2O_3 , dan SiO_2 (C-A-S) dari kedua bahan tersebut. Senyawa-senyawa ini di berbagai komposisi pencampurannya dapat kita lihat nilai-nilai detailnya pada Tabel V.1. Nilai-nilai ini selanjutnya diplotkan ke dalam diagram fase sistem ternary C-A-S sebagaimana pada Gambar V.2 hingga V.9.

Tabel V.1 Komposisi senyawa kimia CaO, Al₂O₃, SiO₂ campuran antara semen dan bubuk *slag* nikel

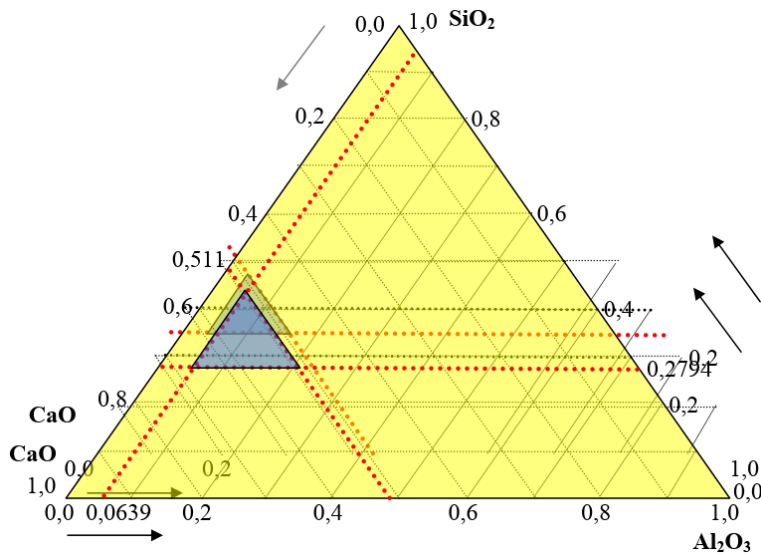
Kode	Komposisi C-A-S (%)		
	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
C100-0	64,90	6,96	21,20
C90-10	57,41	6,86	25,37
C85-15	51,10	6,39	27,94
C80-20	46,58	6,06	29,12
C70-30	40,06	5,79	31,34
C60-40	32,12	5,42	34,78
C50-50	25,23	5,03	37,26
C0-100	6,86	3,67	42,57



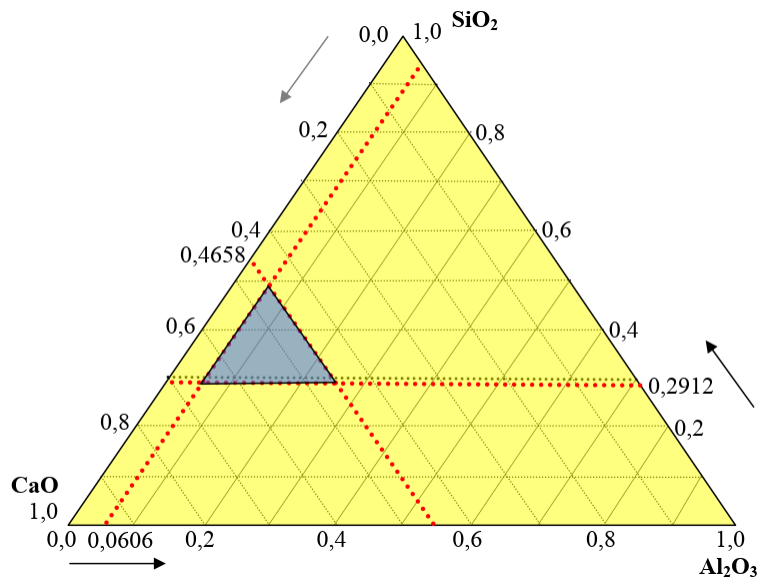
Gambar V.2. Posisi C100-0 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S



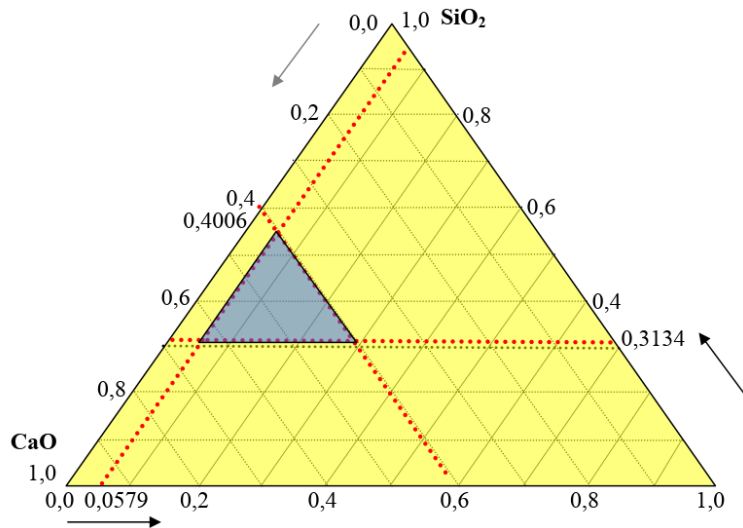
Gambar V.3. Posisi C90-10 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S



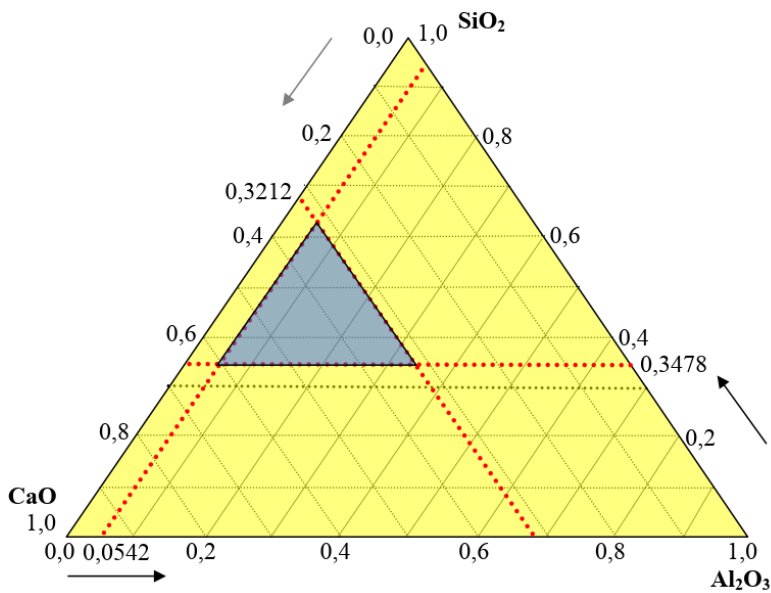
Gambar V.4. Posisi C85-15 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S



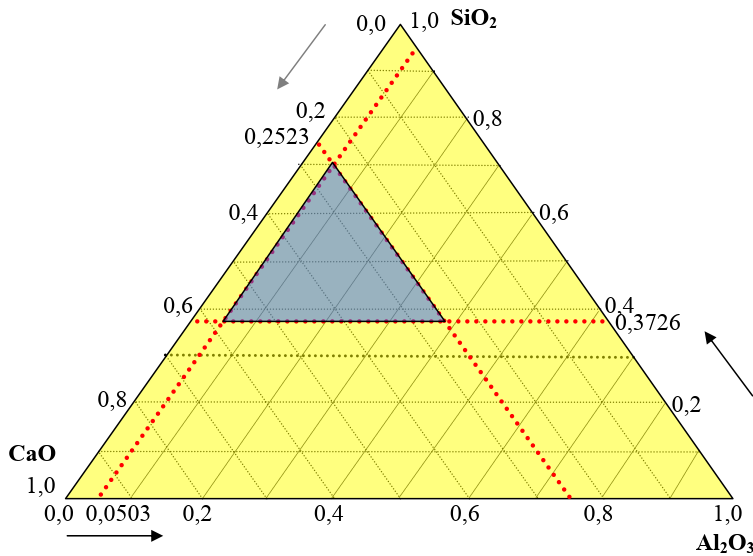
Gambar V.5. Posisi C80-20 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S



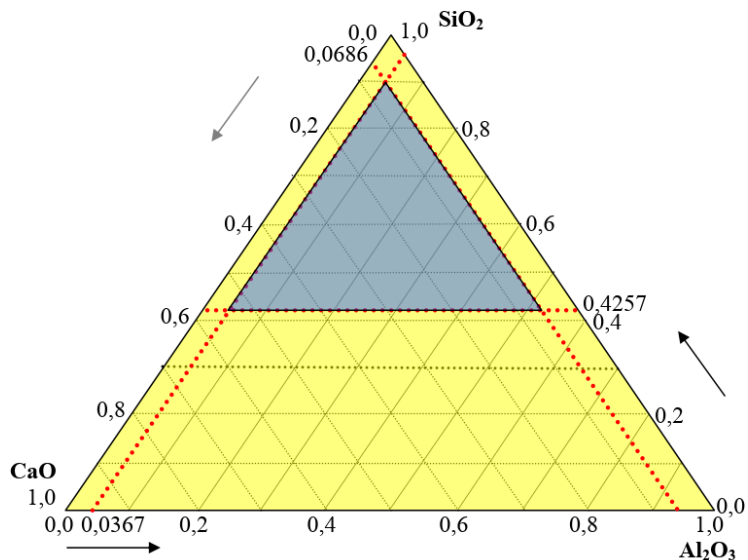
Gambar V.6. Posisi C70-30 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S



Gambar V.7. Posisi C60-40 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S



Gambar V.8. Posisi C50-50 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S



Gambar V.9. Posisi C0-100 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S

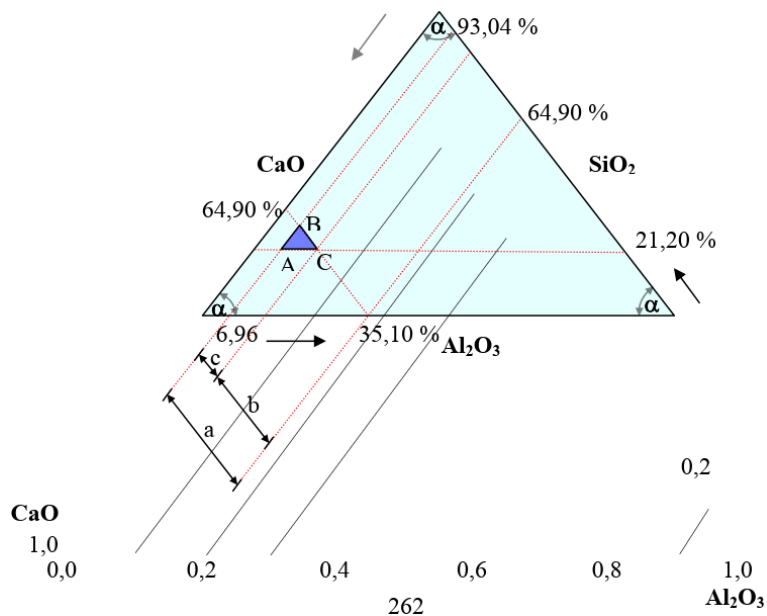
Posisi pencampuran bahan sebagaimana pada Gambar V.2 hingga V.9 berbentuk area. Untuk membuat garis pencampurannya, perlu dilakukan modifikasi untuk merepresentasikan area tersebut. Modifikasi ini dilakukan dengan menentukan titik-titik pusat area dan mengekspresikannya dalam koordinat sistem ternary C-A-S (CaO-Al₂O₃-SiO₂).

Untuk menjelaskan metode modifikasi ini, berikut kita pelajari salah satu contoh campuran bahan yaitu C100-0. Gambar V.10 menunjukkan posisi area bahan C100-0, di mana dengan senyawa kimia; CaO = 64,90%, Al₂O₃ = 6,96% dan SiO₂ = 21,20%, diperoleh:

$$\begin{aligned} a &= (100 - \text{Al}_2\text{O}_3) - [100 - (100 - \text{CaO})] \\ &= (100 - \text{Al}_2\text{O}_3) - \text{CaO} = 100 - (\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3) \end{aligned} \quad (\text{V.7})$$

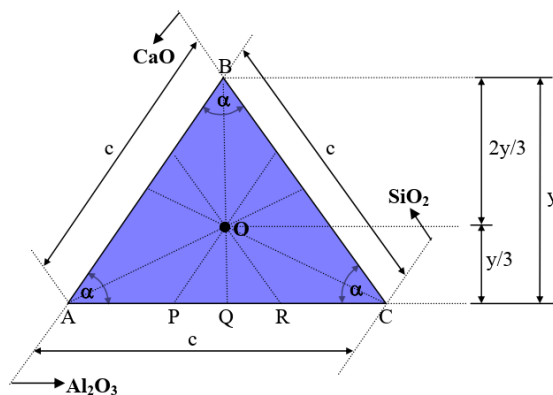
$$b = \text{SiO}_2 \quad (\text{V.8})$$

$$\begin{aligned} c &= a - b \\ &= 100 - (\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2) \end{aligned} \quad (\text{V.9})$$



Gambar V.10. Detail koordinat CaO , Al_2O_3 , SiO_2 bahan C100-0

Karena sisi-sisi segitiga diagram ternary sama besar, maka sepanjang sisi (c) area segitiga bahan C100-0 tersebut juga sama besar dengan sudut α sebesar 60° . Detail dan posisi koordinat area bahan ditunjukkan sebagaimana Gambar V.11.



Gambar V.11. Detail dan posisi koordinat C100-0 dalam sistem C-A-S

Dengan melihat Gambar V.11, maka kita dapat peroleh persamaan:

$$y = c \sin \alpha \quad (V.10)$$

Memasukkan Persamaan (V.9) ke dalam Persamaan (V.10), sehingga:

$$y = [100 - (CaO + Al_2O_3 + SiO_2)] \sin \alpha \quad (V.11)$$

Kemudian dengan memperhatikan segitiga OPQ dan OQR, maka:

$$\begin{aligned} PQ &= \frac{y/3}{\tan \alpha} \\ &= 1/3 [100 - (CaO + Al_2O_3 + SiO_2)] \cos \alpha \end{aligned} \quad (V.12)$$

$$QR = PQ \quad (V.13)$$

$$\begin{aligned} OP &= OR = 1/3(y/\sin \alpha) \\ &= 1/3 [100 - (CaO + Al_2O_3 + SiO_2)] \end{aligned} \quad (V.14)$$

Sehingga:

$$\begin{aligned} AP &= \frac{c}{2} - PQ \\ &= \frac{[100 - (CaO + Al_2O_3 + SiO_2)]}{2} - \frac{[100 - (CaO + Al_2O_3 + SiO_2)] \cos \alpha}{3} \end{aligned}$$

Dengan $\alpha = 60^\circ$, maka:

$$AP = \frac{1}{3} [100 - (CaO + Al_2O_3 + SiO_2)] \quad (V.15)$$

$$\begin{aligned} CR &= \frac{c}{2} - QR = AP \\ &= \frac{1}{3} [100 - (CaO + Al_2O_3 + SiO_2)] \end{aligned} \quad (V.16)$$

Dengan demikian, koordinat bahan C100-0 dalam sistem ternary CaO, Al_2O_3 , SiO_2 (C-A-S) adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} C &= CaO_{\text{bahan}} + CR \\ &= CaO_{\text{bahan}} + \frac{[100 - (CaO + Al_2O_3 + SiO_2)]}{3} \end{aligned} \quad (V.17)$$

$$\begin{aligned}
 A &= Al_2O_{3\text{bahan}} + AP \\
 &= Al_2O_{3\text{ bahan}} + \frac{[100-(CaO+Al_2O_3+SiO_2)]}{3}
 \end{aligned}
 \tag{V.18}$$

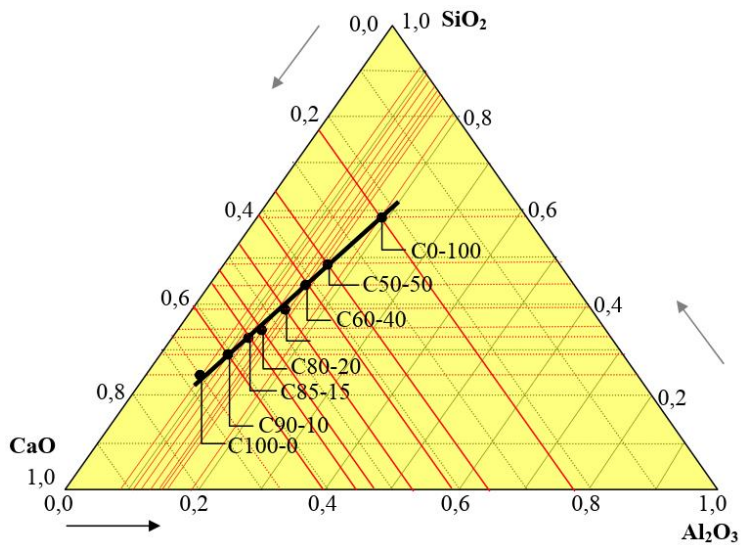
$$\begin{aligned}
 S &= SiO_{2\text{bahan}} + OR \\
 &= SiO_{2\text{bahan}} + \frac{[100-(CaO+Al_2O_3+SiO_2)]}{3}
 \end{aligned}
 \tag{V.19}$$

Dengan memasukkan data komposisi senyawa kimia yang ada pada Tabel V.1 ke dalam Persamaan V.17, V.18, dan V.19, maka koordinat setiap campuran bahan dapat ditentukan sebagaimana Tabel V.2.

Tabel V.2. Data koordinat campuran bahan dalam sistem ternary C-A-S

No.	Kode	Koordinat C-A-S (%)			Jumlah
		C = CaO	A = Al ₂ O ₃	S = SiO ₂	
1	C100-0	67,21	9,27	23,51	100
2	C90-10	60,86	10,31	28,82	100
3	C85-15	55,96	11,25	32,80	100
4	C80-20	52,66	12,14	35,20	100
5	C70-30	47,66	13,39	38,94	100
6	C60-40	41,35	14,65	44,01	100
7	C50-50	36,06	15,86	48,09	100
8	C0-100	22,49	19,30	58,20	100

Titik-titik koordinat dalam Tabel V.2 di atas dapat kita gambarkan dalam diagram C-A-S (CaO-Al₂O₃-SiO₂), sehingga membentuk garis lurus sebagai garis pencampuran bahan dengan titik awal C100-0 (100% semen) dan titik akhir C0-100 (100% bubuk *slag* nikel), sebagaimana Gambar V.12.



Gambar V.12. Posisi garis pencampuran bahan semen dan bubuk *slag* nikel dalam sistem ternary C-A-S ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$)

Melalui regresi linier, maka garis pencampuran pada Gambar V.12 di atas, dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$A = 0,2925 S + 0,0195 \quad (\text{V.20})$$

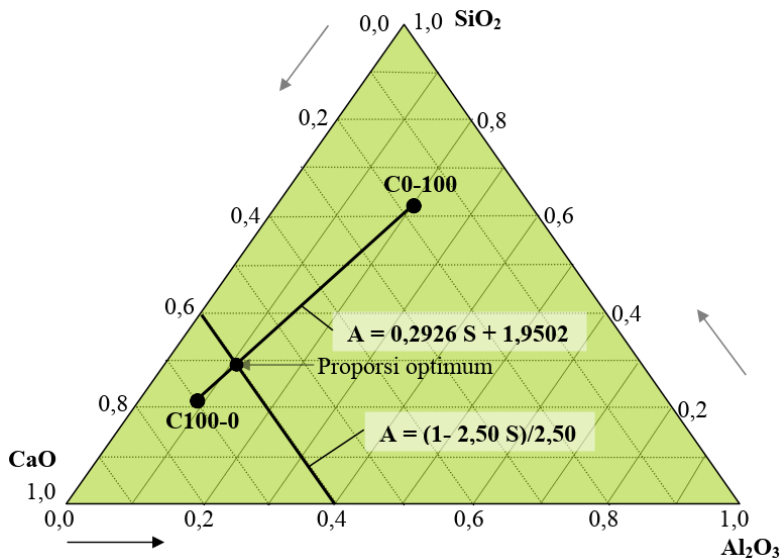
di mana:

A = senyawa kimia Al_2O_3 (%)

S = senyawa kimia SiO_2 (%)

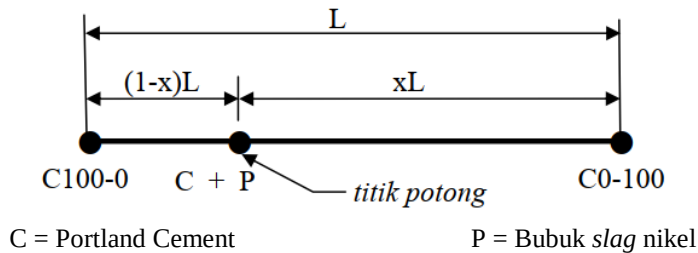
Proporsi Optimum Campuran Semen dan Bubuk *Slag* Nikel

Proporsi campuran antara semen dan bubuk *slag* nikel dapat kita tentukan dengan menggambar dua garis yang sudah ditetapkan, yaitu garis keseimbangan gabungan mineral sesuai Persamaan V.6 dan garis pencampuran bahan menurut Persamaan V.20. Posisi kedua garis ini dapat dilihat pada Gambar V.13.



Gambar V.13. Proporsi optimum campuran semen dan bubuk *slag* nikel dalam sistem ternary C-A-S (CaO-Al₂O₃-SiO₂)

Perpotongan kedua garis tersebut yang diperlihatkan dalam Gambar V.13 tersebut merupakan titik optimum pencampuran antara bahan semen dan bubuk *slag* nikel.



Gambar V.14. Diagram proporsi campuran semen dan bubuk *slag* nikel

Proporsi optimum campuran semen dan bubuk *slag* nikel dapat ditentukan dengan membandingkan panjang garis yang diukur dari titik C100-0 ke titik perpotongan terhadap total panjang garis dari titik C100-0 ke titik C0-100, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar V.14.

Selain itu, posisi titik perpotongan kedua garis tersebut dalam Gambar V.13 dapat dihitung secara matematis dengan menyamakan Persamaan V.6 dan V.20. Dengan metode ini, titik perpotongannya dapat ditemukan pada posisi senyawa kimia S (SiO_2) sebesar 0,3234 atau 32,34%.

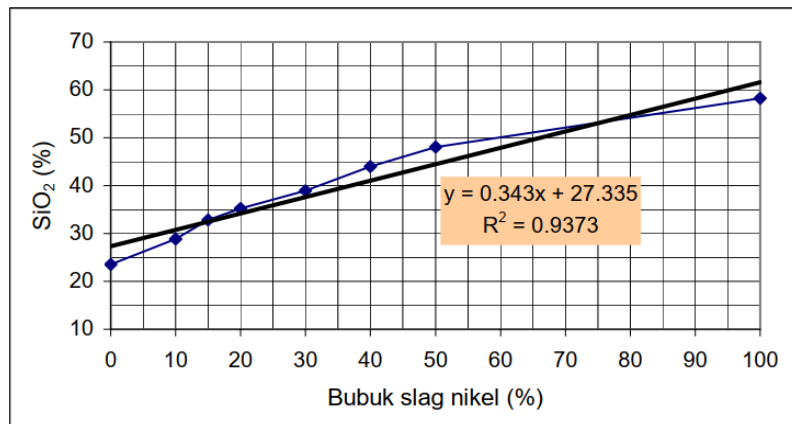
Selanjutnya, kita perlu mengidentifikasi hubungan antara kandungan senyawa SiO_2 dengan persentase bubuk *slag* nikel melalui hasil pemeriksaan sesuai Tabel V.2. Hubungan ini dinyatakan dalam Gambar V.15 dengan bentuk persamaan regresi linier sebagai berikut:

$$Y = 0,343 X + 27,335 \quad (\text{V.20})$$

Di mana y adalah kandungan senyawa SiO_2 dan x adalah persentase bubuk *slag* nikel.

Dengan memasukkan harga Y atau SiO_2 ke dalam Persamaan (V.20), maka kita dapat memperoleh persentase bubuk *slag* nikel sebagai berikut:

$$X = \frac{32,34 - 27,335}{0,343} = 14,59\% \quad (\text{V.20})$$



Gambar V.15. Grafik hubungan antara senyawa silika oksida (SiO_2) versus persentase bubuk *slag* nikel

Dengan demikian, proporsi optimum campuran semen dan bubuk *slag* nikel yang dapat kita peroleh ialah 85,41% semen dan 14,59% bubuk

slag nikel. persentase ini sedikit lebih kecil dibandingkan persentase optimum dari produk kuat tekan beton maksimum dan total koloni mikroorganisme minimum.

Penutup

Upaya identifikasi ketahanan material beton terhadap intrusi mikroorganisme dapat dilakukan menggunakan air kelapa sebagai media intrusi. Air kelapa dipilih sebagai media karena dianggap merepresentasikan kerusakan yang umum terjadi pada bangunan pasar tradisional, khususnya di area penjualan bahan-bahan seperti kelapa dan sayuran. Sampah-sampah basah yang dihasilkan di tempat ini menjadi sumber potensial bagi pertumbuhan dan perkembangan mikroorganisme. Selama proses metabolisme mikroorganisme, mereka menghasilkan zat organik yang dapat memengaruhi kondisi lingkungan sekitarnya. Struktur beton yang terintrusi oleh mikroorganisme dapat mengalami perubahan dalam perilaku fisik dan mekaniknya, yang pada akhirnya dapat berdampak pada masa layan keseluruhan struktur. Perubahan perilaku ini terjadi melalui mekanisme reaksi kimiawi antara zat organik produk metabolik mikroorganisme dengan senyawa kalsium hidroksida dan kalsium silikat hidrat produk reaksi hidrasi trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S) semen dengan air.

Kita berhasil mengonfirmasi beberapa hal penting seperti golongan mikroorganisme yang tumbuh pada media air kelapa, dan kemampuan perkembangbiakannya, serta dampak negatif yang ditimbulkan terhadap sifat-sifat fisik dan mekanik beton serta degradasinya. Selain itu, kita juga berhasil mengidentifikasi penggunaan bubuk *slag* nikel sebagai alternatif meminimalkan dampak negatif tersebut serta menganalisis perubahan-perubahan yang terjadi pada senyawa kimia kalsium hidroksida dan kalsium silikat hidrat.

Mikroorganisme yang tumbuh pada media air kelapa diidentifikasi sebagai jamur (*Aspergillus niger*) dan ragi (*Sacchromyces ludwigi*). Kedua jenis mikroorganisme ini membentuk koloni dengan diameter berkisar antara 0,05 hingga 0,5 μm .

Air kelapa, sebagai substrat utama mikroorganisme, mengandung karbohidrat (gula) yang mudah dioksidasi oleh aktivitas metabolik kedua

golongan mikroorganisme tersebut, menghasilkan alkohol sebagai substrat baru. Melalui sistem pernapasan aerob, mikroorganisme tersebut menguraikan substrat baru (alkohol) sehingga menghasilkan energi dan zat organik. Hasil pemeriksaan menggunakan metode *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC) menunjukkan bahwa zat organik yang dihasilkan dari proses ini adalah asam asetat (CH_3COOH).

Dugaan bahwa mikroorganisme dapat hidup dan berkembang di dalam material beton ternyata terbukti. Kedua golongan mikroorganisme ini dapat hidup dan berkembang di dalam material beton karena ketersediaan nutrisi dari kalsium hidroksida produk sampingan reaksi hidrasi trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S) semen dengan air.

Aktivitas metabolik kedua mikroorganisme ini juga mengakibatkan reduksi senyawa kimia kalsium hidroksida meningkat seiring dengan bertambahnya lama intrusi. Pola peningkatannya cenderung mengikuti persamaan fungsi logaritmik, sehingga sifat alkalinitas beton menjadi berkurang sehingga berdampak negatif pada sifat-sifat fisik dan mekanik beton.

Penggunaan bubuk *slag* nikel dikonfirmasi mampu mereduksi dampak intrusi mikroorganisme melalui efek pengecilan pori dan efek pozzolanik. Efek pengecilan pori terjadi karena butiran bubuk *slag* nikel yang lebih halus daripada butiran semen dan sifat konsistensi pastanya yang memudahkan dalam pengerjaan beton (*workability*) yang bersifat *impermeable*. Efek pozzolanik diperoleh melalui reaksi kimiawi antara senyawa silika oksida (SiO_2) bubuk *slag* nikel dengan senyawa kalsium hidroksida yang membentuk senyawa kalsium silikat hidrat sekunder. Efek pengecilan ini memicu penyusutan total koloni mikroorganisme ke dalam pori-pori beton yang menurun, sedangkan efek pozzolanik berdampak pada berkurangnya kesempatan hidup mikroorganisme di dalam material beton. Hal ini terjadi karena nutrisi dari senyawa kalsium hidroksida sebagian besar berubah akibat reaksi pozzolanik tersebut.

Kita juga berhasil mengonfirmasi persentase bubuk *slag* nikel yang memberikan ketahanan terbaik pada beton akibat intrusi mikroorganisme, yakni sebesar 16%. persentase ini sedikit lebih besar daripada persentase dari analisis optimasi sistem ternary C-A-S ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) yaitu sebesar 14,59%.

Sifat-sifat fisik dan mekanik beton, seperti kehilangan berat, peningkatan porositas, koefisien permeabilitas, dan penurunan kuat tekan, akan terus meningkat seiring dengan berlalunya waktu intrusi. Pada beton tanpa bubuk *slag* nikel, peningkatan yang terjadi secara umum mengikuti pola pertumbuhan geometris. Di sisi lain, pada beton yang mengandung 16% bubuk *slag* nikel, kecenderungan pertumbuhannya lebih sesuai dengan persamaan fungsi laju pertumbuhan jenuh.

Peningkatan porositas, koefisien permeabilitas, dan penurunan massa beton, terutama pada beton tanpa bubuk *slag* nikel, mencerminkan dampak akumulasi pelarutan senyawa kalsium hidroksida. Pelarutan ini tidak hanya meninggalkan pori-pori, tetapi juga berpotensi melemahkan ikatan antara matriks dan agregat, mengakibatkan berkurangnya soliditas beton. Kemudian terkait rasio kehilangan berat, rasio peningkatan porositas dan koefisien permeabilitas, serta rasio penurunan kuat tekan antara beton yang mengandung 16% bubuk *slag* nikel dan beton tanpa bubuk *slag* nikel, juga cenderung mengikuti pola pertumbuhan logaritmik.

Peningkatan jumlah total koloni mikroorganisme sendiri di dalam material binder terjadi seiring dengan peningkatan waktu intrusi. Pola pertumbuhannya lebih linier pada beton tanpa bubuk *slag* nikel. Sebaliknya, pada beton dengan 16% bubuk *slag* nikel, pola pertumbuhannya cenderung mengikuti persamaan fungsi polinomial berorde dua (parabolik).

Jika degradasi sifat-sifat fisik dan mekanik beton dibatasi sebesar 20%, maka total koloni mikroorganisme maksimum yang diizinkan pada material beton adalah sebagai berikut:

(a). Beton tanpa bubuk *slag* nikel

- $w/c = 0,57$: $C_{\max} = 6,3 \times 10^2$ cfu/gr material binder
- $w/c = 0,40$: $C_{\max} = 7,8 \times 10^2$ cfu/gr material binder
- $w/c = 0,30$: $C_{\max} = 1,3 \times 10^3$ cfu/gr material binder

(b). Beton dengan 16% bubuk *slag* nikel

- $w/c = 0,57$: $C_{\max} = 3,5 \times 10^5$ cfu/gr material binder
- $w/c = 0,40$: $C_{\max} = 7,0 \times 10^6$ cfu/gr material binder
- $w/c = 0,30$: $C_{\max} = 2,1 \times 10^7$ cfu/gr material binder

Kita juga melihat, bahwa kurva pembentukan senyawa kalsium hidroksida (CH) pada beton nonintrusi mikroorganisme umumnya mengikuti pola pertumbuhan yang sesuai dengan persamaan fungsi laju pertumbuhan jenuh (*saturation growth-rate equation*). Namun, pada beton terintrusi mikroorganisme, terjadi penurunan senyawa kalsium hidroksida seiring dengan penambahan lama intrusi. Pengurangan ini cenderung mengikuti bentuk persamaan fungsi logaritmik. Dalam beton yang mengandung 16% bubuk *slag* nikel, penurunan senyawa kalsium hidroksida tidak hanya disebabkan oleh pelarutan melalui aktivitas metabolik mikroorganisme, tetapi juga oleh efek pozzolanik dari bubuk *slag* nikel yang membentuk gel kalsium silikat hidrat sekunder. Kontribusi 16% bubuk *slag* nikel terhadap reduksi ini dinyatakan dalam bentuk rasio CH_{16}/CH_0 , yang cenderung mengikuti bentuk persamaan fungsi geometri.

Pembentukan senyawa kalsium silikat hidrat (CSH) sendiri pada beton nonintrusi dan terintrusi mikroorganisme sama-sama memiliki bentuk kurva yang cenderung mengikuti persamaan fungsi laju pertumbuhan jenuh (*saturation growth-rate equation*). Kesamaan terjadi karena sifat gel silika ($Si(OH)_4$) yang tidak mudah terdekomposisikan oleh zat organik seperti asam asetat (CH_3COOH) produk metabolik mikroorganisme.

Dari banyaknya kondisi yang sudah kita konfirmasi di atas, terutama terkait dengan ketahanan material beton dari aktivitas mikroorganisme, buku ini mencoba menyajikan beberapa rekomendasi untuk mendukung munculnya literasi serupa yang lebih holistik lagi. Pertama adalah terkait dengan pengaruh kehalusan bubuk *slag* nikel terhadap tingkat ketahanan akibat intrusi mikroorganisme yang perlu diperkaya lagi pembahasannya. Selain itu juga perlu dibahas lebih lanjut tentang efek korosifitas tulangan, pengaruh rasio luas permukaan terhadap volume beton terserang mikroorganisme, serta perilaku komponen struktur dalam kondisi terintrusi mikroorganisme. Rekomendasi lainnya ialah tentang perlunya kajian terkait alternatif penentuan kadar bubuk *slag* nikel dari hubungan senyawa kalsium hidroksida versus waktu berdasarkan hasil analisis *X-Ray Diffraction* (XRD), yang dapat didukung dengan peningkatan variasi mikroorganisme lain, seperti bakteri, alga, protozoa, dan sebagainya.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI 233R-95 (1995) : Ground Granulated Blast Furnace Slag as a Cementitious in Concrete, Michigan, Detroit.
- ACI Committee 211.4R-95 (1995) : Guide for Selecting Proportional for High- Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash (ACI-211), *ACI Journal*, Detroit, Michigan, 1993.
- ACI Committee 211.4R-93 (1996) : Guide for Selecting Proportional for High- Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash, Michigan, Detroit.
- ACI Committee 363R (1996) : State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete, Michigan, Detroit.
- ACI Committee 225R-99 (1999) : Guide to the Selection and Use of Hydraulic Cements, Michigan, Detroit.
- ACI Education Bulletin E3-01 (2001) : Cementitious Materials For Concrete, Michigan, Detroit, **E3-21 pp.**
- ACI Education Bulletin E3-01 (2001) : Cementitious Materials For Concrete, Michigan, Detroit, **E3-21 pp.**
- ACI Committee 318-02 (2002) : Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Michigan, Detroit.
- ACI Committee 233R-03 (2003) : Slag Cement in Concrete and Mortar, Michigan, Detroit.
- ASTM, 1993, "Cement; Lime; Gypsum", Vol. 04.01, Easton, MID, U.S.A.
- ASTM, 1993, "Concrete and Aggregates", Vol. 04.02, Easton, MID, U.S.A.
- Ashad, H., (1998) : *Kontribusi Nickel Slag-Cement Terhadap Kekuatan dan Durabilitas Beton Kinerja Tinggi*, Tesis Magister, Program Pascasarjana, Institut Teknologi Bandung.
- Ashad, H., Nasution, A., Imran, I., Soegiri, S., (2006) : Degradasi Kekuatan Beton Akibat Intrusi Mikroorganisme, *Jurnal Teknik Sipil*, Institut Teknologi Bandung, Volume 13, No. 3, Juli, 151-158.
- Belie, N.D., Debruyckere, M., Nieuwenburg, D.V., and Blaere, B.D.,

- (1997) : Concrete Attack by Feed Acid : Accelerated Test to Compare Different Concrete Composition and Technologies, *ACI Materials Journal*, **No. 94- M62, November-December**, pp. 546-554.
- Besari, M.S., Munaf, D.R., and Hanafiah (1992) : The Effect of Fly Ash and Strength of Coarse Aggregate to the Mechanical Properties of High Strength Concrete, *17th Conference on Our Word in Concrete & Structures*, 25-27 August., Singapore, 25-32.
- Bhanja, S. (2001) : *Influence of Microsilica on the Characteristics of High Strength Concrete at Different Water-Cementitious Material Ratios and on Different Types of Samples*, PhD Dissertation, Jadavpur University, Kolkata, India.
- Bhanja, S. and Sengupta, B. (2003) : Optimum Silica Fume Content and Its Mode of Action on Concrete, *ACI Materials Journal*, **No. 100-M46, Sept-Oct.**, pp. 407-412.
- Bijen, J. (1996) : *Blast Furnace Slag Cement*, Cip Royal Library Den Haag, Netherlands.
- Bilgrami, K.S. and Verma, R.N. (1994) : *Physiology of Fungi*, 2nd ed., Vikas Publishing House PVT Ltd., Delhi, pp. 507.
- Brandt, A.M. (1995) : *Cement-Based Composites : Materials, Mechanical Properties and Performance*, E & FN Spon, London.
- Buchea, L., Khatri, R.P., and Sirivivatnanon, V. (2004) : Performance Based Specification For Sulphate Resisting Concrete, *The First International Conference of Asian Concrete Federation (AFC)*, 28-29 October, Chiang May, Thailand.
- Bye, G.C. (1983) : *Portland Cement : Composition, Production and Properties*, The Institute of Ceramic, Pergamon Press, New York.
- Carlile, M.J. and Watkinson, S.C. (1994) : *The Fungi*, Academic Press, London, pp. 482.
- Cramer, S., and Sippel, C. (2005) : Effects of Ground Granulated Blast Furnace Slag in Portland Cement Concrete, Wisconsin Highway Research Program, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison, Final Report, WHRP 05-04, #0092-02-14a..

- Desai, C.S., and Siriwardane, H.J. (1984) : *Constitutive Laws For Engineering Materials With Emphasis on Geologic Materials*, Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Freeman, R.B., and Carrasquillo, R.L. (1995) : Production of Sulfate Resistant Concrete Containing High Calcium Fly Ash and Sodium Sulfate Admixture, *Proc., 5th International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Wisconsin, **pp. 154-176.**
- Gandjar, I., Syamsuridzal, W., dan Oetari, A. (2006) : *Mikologi Dasar dan Terapan*, Yayasan Obor Indonesia, Jakarta.
- George, C. M., (1997) : Durability of Calcium Aluminate Cement Concrete : Understanding the Evidence, *Mechanism of Chemical Degradation of Cement-Based Systems*, edited by Scrivener, K.L and Young, J.F, E & FN Spon, London, pp. 254-263.
- Ghosh, S.N., Sarkar, S.L., and Harsh, S. (1993) : *Mineral Admixtures in Cement and Concrete*, Volume-4, Akademia Books International, New Delhi.
- Ginting, P. (2007) : *Sistem Pengelolaan Lingkungan dan Limbah Industri*, Yrama Widya, Bandung.
- Hall, G.R. (1989) : Control of Microbiologically Induced Corrosion of Concrete in Waste-Water Collection and Treatment Systems, *Materials Performance*, **Vol. 28, No. 10, pp. 45-49.**
- Howsam, P. (1990) : *Microbiology in Civil Engineering*, E. & F.N. Spon, Melbourne, Australia.
- Imran, I., Budiono, B., Munaf, D.R., and Moestopo, M. (1999) : *On the Mechanical Behaviour of Concrete Structures and Materials (Experimental and Analytical Studies)*, Final Report, Urge Project, Chapter 2.
- Kearns, J.R., and Little, B.J. (1994) : *Microbiologically Influenced Corrosion Testing*, ASTM, PCN. 04-012320-27, STP. 1232, Philadelphia, U.S.A.
- Khedr, S.A. and Abou-Zeid, M.N. (1994) : Characteristics of Silica-Fume Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **ASCE, V.6, No. 3, pp. 357-375.**

- Khosama, L. K., (1997) : *Penggunaan Terak nikel Sebagai Agregat Pada Beton Mutu Tinggi*, ", Tesis Magister, Program Pascasarjana, Institut Teknologi Bandung.
- Khunthongkeaw, J. dan Tangtermsirikul, S. (2004) : Model for Simulating Carbonation of Fly Ash Concrete, *The First International Conference of Asian Concrete Federation (AFC)*, 28-29 October, Chiang May, Thailand.
- Kulpa, C. F. and Baker, C. J. (1990) : Involvement of Sulfur-Oxidizing Bacteria in Concrete Deterioration, *Proceedings, Paul Klieger, Symposium on Performance of Concrete*, ed. D. Whiting, ACI SP-122, pp.313-322.
- Lane, D.A., and Ozyildirim, C. (1999), Combination of Pozzolans and Ground Granulated Blast Furnace Slag for Durable Hydraulic Cement Concrete, Final Report, Virginia Transportation Research Council (A Cooperative Organization Sponsored Jointly by the Virginia Department of Transportation and the University of Virginia), VTRC 00-R1.
- Louis, (2003) : *Penggunaan Terak Nikel Sebagai Agregat Beton Pemberat Pipa Gas Lepas Pantai*, Tesis Magister, Program Pascasarjana, Institut Teknologi Bandung.
- Madigan, M.T., Martinko, J.M., and Parker, J. (2002) : *Brock Biology of Microorganisms*, 10th ed., Prentice Hall International Inc., Englewood Cliff.
- Malhorta, V.M, 1986, "Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete", *Proceedings Second International Conference*, Madrid, Spain.
- Maso, J.C. (1996) : *Interfacial Transition Zone in Concrete*, Rilem Report 11, E & FN Spon, London.
- Mehta, P.K. (1986) : *Concrete Structure, Properties, and Materials*, Prentice-Hall, New Jesdey.
- Mehta, P.K. (1991) : *Concrete in the Marine Environment*, Elsevier Science Publisher Ltd, England.
- Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M. (2001) : *Concrete Microstructure, Properties and Materials.* ", Prentice-Hall, New Jesdey

- Meklin, T. (2002) : *Microbial Exposure and Health in Schools Effects of Moisture Damage and Renovation, Dissertation*, Department of Environmental Sciences, University of Kuopio, Finland. 13-18.
- Mindess, S., and Young, J. F. (1981) : *Concrete*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. 07632, New Jersey.
- Munaf, D.R. (1992) : *Pembuatan dan Penyelidikan Perilaku Beton Mutu Tinggi Serta Bahan Pembentuknya*, Laporan Penelitian, Institut Teknologi Bandung.
- Nagai, K., K. Suzuki, G. Okada (1998) : Studies on the Distribution of Alkalophilic and Alkali-Tolerant Soil Fungi II : Fungal Flora in Two Limestone Caves in Japan, *Mycoscience* **39** : 293-298.
- Naik, T.R., Ramme, B.W., Kraus, R.N., and Siddique, R. (2003) : Long-Term Performance of High-Volume Fly Ash Concrete Pavements, *ACI Materials Journal*, **Vol.100, No.2, March-April**, pp.150-155.
- Neville, A.M., 1996, "Properties of Concrete", John Wiley and Sons Inc., New York.
- Oluokun, F.A. (1994) : Fly Ash Concrete Mix Design and the Water-Cement Ratio Law, *ACI Materials Journal*, **V. 91, No. 4, July-Aug., pp. 362-371**.
- Pedersen, K. (2001) : Microbial Features, Event and Processes in the Swedish Final Repository for Low-and Intermediate-Level Radiactive Waste, *SKB Rapport R-01-05*, Göteborg University, Sweden.
- Rapindrarajah, R.S., Pathmasiri, M., and Khan, A.S. (2004) : Binder Type on High-Strength Concrete Properties, *The First International Conference of Asian Concrete Federation (AFC)*, 28-29 October, Chiang May, Thailand.
- Robson, T.D., (1992) : High Alumina Cement and Concrete, *Contractor's Record Limited*, Wiley, New York, **pp. 145-159**.
- Said, I. (1996) : Mechanical Properties of High Performance Concrete, *ACI Materials Journal*, **Vol. 93, No. 5**, pp. 416-425.
- Scrivener, K.L., Cabiron, J.L., and Letourneux, R. (1999) : High Performance Concretes from Calcium Aluminat Cement, *Cement and Concrete Research*, **Vol. 29, No. 8**, **pp. 1215-1223**.

- Siddique, R. (2000) : *Special Structural Concretes*, Galgotia Publications Pvt. Ltd., New Delhi.
- Soegiri, S., Munaf, D.R., and Khosama, L.L. (1997) : Mechanical Properties of High Performance Nickel Slag Concrete, 22nd Conference on Our Word Concrete and Structures, 25-27 August, Singapore.
- Soegiri, S. (2000) : Durability of High Performance Nickel Slag Concrete, *Second Asia/Pacific Conference on Durability of Building System, Harmonized Standards and Evaluation*, 10-12 July, Bandung, Indonesia.
- Suhud, R., Imran, I., Darmawan, S., dan Tanujaya, H. (1999) : *Perilaku Mekanik Beton Kinerja Tinggi dengan Gradasi Butiran Bercelah (Gap Grading Concrete)*, Laporan Penelitian Hibah Bersaing VI Perguruan Tinggi, Depdikbud.
- Taylor, H.F.W. (1997) : *Cement Chemistry*, 2nd Edition, Thomas Telford, London. Tazawa, E.I., Morinaga, T., and Kawai, K., (1998) : Deterioration of Concrete Derived from Metabolites of Microorganisms, Proceedings, Paul Klieger, Symposium on Performance of Concrete, ed. D. Whiting, ACI SP145-59, pp.1087-1097.
- Tikalaky, P.J., and Carrasquillo, R.L. (1993) : Fly Ash Evaluation and Selection for Use in Sulfate Resistant Concrete, *ACI Materials Journal*, **90(6)**, pp. 545-551.
- Tremper, B., (1989) : The Effect of Acid Waters on Concrete, *Journal of American Concrete Institute- Proceedings*, pp. 1-32.
- Uchikawa, H., and Okamura, T. (1993) : Binary and Ternary Components Blended Cement, *Progerss in Cement and Concrete*, Vol. 4, pp. 1-83, Akademia Books International, New Delhi, India.
- Videla, C., Covarrubias, J.P., and Masana, C. (2004) : Updating Concrete Drying- Shrinkage Prediction Models for Local Materials, *ACI Material Materials Journal*, **No. 101-M21, May-June**, pp. 187-198.
- Videla, C., and Gaedicke, C. (2004) : Modeling Portland Blast-Furnace Slag Cement High-Performance Concrete, *ACI Material Materials Journal*, **No. 101-M41, Sept.-Oct.**, pp. 365-375.

- Voet, D., and Voet, J. (1995) : *Biochemistry*, 2nd ed., John Wiley & Sons. Inc., New York, pp. 1361.
- Waluyo, L. (2005) : *Mikrobiologi Umum*, UMM Press, Malang, 95-120.
- Yogendran, V., Langan, B.W., and Ward, M.A. (1991) : Hydration of Cement and Silica Fume Paste, *Cement and Concrete Research*, **V. 21, No. 5, pp. 691- 708.**

Pustaka dari situs:

- ACPA Update (2003) : Slag Cement and Concrete Pavements, Concrete Pavement Research and Technology, American Concrete Pavement Association, No. 4.03, March, <http://www.pavement.com>., download pada tanggal 24 Agustus 2006.
- Anderson, M. dan Dover, M. D. (2004) : Bonded Fly Ash : A Low-Energy Replacement for Portland Cement Concrete to Improve Resistance to Chem-Bio Intrusion, [http://www.natick.army.mil/soldier/jocotas/ ColPro_ Papers/Anderson.pdf](http://www.natick.army.mil/soldier/jocotas/ColPro_Papers/Anderson.pdf)., download pada tanggal 26 Agustus 2006.
- Aviam, O., Bar_Nes, G., Zeiri, Y., dan Sivan, A. (2004) : Accelerated Biodegradation of Cement by Sulfur-Oxidizing Bacteria as a Bioassay for Evaluating Immobilization of Low-Level Radiactive Waste, *Journal of Applied and Environmental Microbioligy*, **V.70(10), Oct.**, 6031-6036, <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6927/cr-6927.pdf>., download pada tanggal 12 September 2006.
- Berndt, M.L. (2001) : Protection of Concrete in Cooling Towers From Microbilogically Influenced Corrosion, *Geothermal Resources Council Transactions*, **Vol. 25**, 3-7, Sandiego, [http://www.gov/est/files/pdf/ micgrc01.pdf](http://www.gov/est/files/pdf/micgrc01.pdf)., download pada tanggal 07 Juli 2006.
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., dan Polder, R. P. (2004) : Properties of Cementitious Materials, WILEY VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, Weinheim, <http://doi.wiley.com/10.1002/3527603379.ch19>., download pada tanggal 07 Desember 2006.

- Bullard, J.W. (2003) : The Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory Consortium, Annual Report 2002, NISTIR 6962, National Institute of Standards and Technology, <http://www.fire.rust.gov/bfrlpubs/build03/PDF/b03004.pdf>, download pada tanggal 15 Oktober 2006.
- Fontes, C.M.A., Barbosa, M.C., Toledo Filho, R.D., dan Goncalves, J.P (2004) : Potentiality of Seage Sludge Ash as Mineral Additive in Cement Mortar and High Performance Concrete, <http://congress.cimne.upc.cs/rilem04/admin/filePaper/p343.pdf>, download pada tanggal 10 September 2006.
- Hamada, H., Yamaji, T., Mohammed, T.U., dan Torii, K. (2005) : Unexpected Expansion of Concrete Made With Laumontite Containing Aggregates Under Seawater Condition, *Asean Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, **Vol. 6, No. 5, pp. 361-372**, <http://www.icic.gov.ir/Publication/AJCE/PDF/vol6-No5/Hamada-1.pdf>, download pada tanggal 26 Januari 2007.
- Hendrik, G. van Oss (2001) : Cement-2000, *Cement in the 20th Century*, <http://mineralsusgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/170400.pdf>, download pada tanggal 07 Oktober 2006.
- Hernandez, M., Marchand, E.A., Roberts, D., dan Peccia, J. (2002) : In Situ Assessment of Active Thiobacillus Species in Corroding Concrete Sewers Using Fluorescent RNA Probes, *International Biodeterioration & Biodegradation*, **49**, 271-276, <http://www.elsevier.com/locate/ibiod>, download pada tanggal 10 Juni 2006.
- Hooton, R.D., Pun, P., Kujondic, T., dan Fidjestol, P. (2005) : Influence of Silica Fume on Chloride Resistance of Concrete, <http://www.silicafume.org/pdf/reprints-hooton97.pdf>, download pada tanggal 23 September 2006.
- Jian-xiong, C., Han-bin, C., Pei, X., dan Lan-fang, Z. (2002) : A Study Complex Alkali-Slag Environmental Concrete, *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, pp. 299-307, <http://www.cptechcenter.org/publications/sustainable/chenslag.pdf>, download pada tanggal 03 Januari 2007.

- Jooss, M. (2001) : Leaching of Concrete Under Thermal Influence, *Otto-Graf Journal*, **Vol. 12**, http://www.mpa.uni-stuttgart.de/publikationen/otto_graf_journal/ogj_2001/beitrag_jooss.pdf., download pada tanggal 27 April 2005.
- Kim, A.G. (1999) : Environmental Remediation With Products of Fluidized Bed Combustion, *Proceedings of the 15th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, Paper **No. FBC99-0030**, Savannah, Georgia, <http://www.mcrcc.osmre.gov/PDF/Forum/CCB2/P2.pdf>., download pada tanggal 15 Nopember 2005.
- Lange, D.A., Jennis, H.M., dan Shah, S.P. (1994) : Image Analysis Techniques For Characterization of Pore Structure of Cement-Based Materials, *Cement and Concrete Research*, **Vol. 24, No. 5**, pp. 841-853, <http://cee.uiuc.edu/research/dlange/Publications/journal.html>., download pada tanggal 28 April 2005.
- Li, Z., Ding, Z., dan Zang, Y. (2004) : Development of Sustainable Cementitious Materials, *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, pp. 55-76, <http://www.cptechcenter.org/publications/sustainable/lisustainable.pdf>., download pada tanggal 09 Januari 2007.
- Ling, W., Pei, T., dan Yan, Y. (2004) : Application of Ground Granulated Blast Furnace Slag in High Performance Concrete in China, *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, pp. 309- 317, <http://www.ctre.iastate.edu/pubs/sustainable/wangslag.pdf>., download pada tanggal 19 Maret 2006.
- Livingston, R.A. dan Bumrongaroen, W. (2005) : Optimization of Silica Fume, Fly Ash and Cement Mixes for High Preformance Concrete, <http://www.flyash.info/2005/79liv.pdf>., download pada tanggal 13 Pebruari 2007.
- Meschke, G. dan Grasberger, S. (2003) : Numerical Modeling of Coupled Hygromechanical Degradation of Cementitious Materials, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **Vol. 129, No. 4, April**, 1-10, <http://link.aip.org/link/?QEM/129/383/Mesche>., download pada tanggal 26 Mei 2006.

- Mobasher, B., Devaguptapu, R. dan Arino, A.M. (1996) : Effect of Copper Slag on the Hydration of Blended Cementitious Mixtures, *Proceedings, ASCE, Materials Engineering Conference, Materials for the New Millenium*, ed. K. Chong, pp. 677-1686, <http://enpub.fulton.asu.edu/cement/papers/asce6.pdf>., download pada tanggal 22 Juni 2005.
- Morton, G. (2003) : Things That Go Rot in The Night a Review of Biodeterioration, *Microbiology Today*, **Vol. 30, Aug., pp. 103-106**, <http://www.uclan.ac.uk/facs/science/forensic/research/morton.htm>. download pada tanggal 04 Juli 2006.
- Nemati, K.M. (2005) : Strength of Concrete, *CM 425, Concrete Technology, University of Washington*, <http://www.nemati.com/pub.htm>., download pada tanggal 19 April 2006.
- Neuwald, A.D. (2004) : Supplementary Cementitious Materials, http://www.Precast.org/publications/mc/2004_sepoct/cementitious_materials.htm., download pada tanggal 25 Maret 2006.
- Nixon, R. (2003) : Evaluating Concrete Deterioration, *Root Cause, M & M Engineering*, Austin, Texas, www.mmengineering.com., download pada tanggal 17 Juli 2006.
- Sanchez, N.M., Cutright, T.J., dan Qiao, P. (2003) : Simultaneous Evaluation Composite Biodeterioration and Changes in the Physicochemical and Biological Water Characteristics, *International Biodeterioration & Biodegradation*, No. 52, pp.187-196, <http://www.eng.auburn.edu/users/mendenc/Paper%201.pdf>., download pada tanggal 18 September 2006.
- Sand, W. (2004) : Microbial Life in Geothermal Waters, http://mainlymartian.blogs.com/semijournal/2004/03/methane_and_thu.html., download pada tanggal 22 Oktober 2006.
- Shirakawa, M.A., Tapper, R., Cincotto, M.A., Beech, I. dan Gambale, W. (2004) : Fungal Growth Measurement by ESEM in Four Different Mortars and Proposal of a Biodeterioration Mechanism, <http://www.sci.port.ac.uk/ec/SHIRAKAW.PDF>., download pada tanggal 14 Maret 2006.

- Slag Cement Associaton (2002) : Reducing Permeability, SCA, No. 16, <http://www.slagcement.org.>, download pada tanggal 16 April 2006.
- Slag Cement Associaton (2005) : Effect of Slag Cement on Shrinkage in Concrete, SCA, No. 27, <http://www.slagcement.org.>, download pada tanggal 09 Maret 2006.
- Schmidt, R., dan Feldmann, T. (2003) : Accurate Quantitative Phase Analysis of Sulphates and Calcite in Portland cement, *Bruker Advanced X-Ray Solutions*, Germany, www.bruker.axs.de., download pada tanggal 05 Mei 2006.
- Sutter, L.L., dan Dam, T.V. (2003) : Preliminary Investigation of the Role of Bacteria in Concrete Degradation, [http://www.tech.mtu.edu/~ltsutter/pdf/BUGSsum.pdf.](http://www.tech.mtu.edu/~ltsutter/pdf/BUGSsum.pdf), download pada tanggal 18 Mei 2006.
- Thomas, M.D.A., Hopkins, D.S., Girn, R., Munro, R., dan Muhl, E. (2004) : The Use of High Volume Fly Ash in Concrete, [http://www.hvfacprojectindia.com/resources/other-documents/CBRIFINAL.pdf.](http://www.hvfacprojectindia.com/resources/other-documents/CBRIFINAL.pdf), download pada tanggal 02 Januari 2007.
- Wang, G., dan Emery, J. (2004) : Technology of Slag Utilization in Highway Constrction, *John Emery Geotechnical Engineering Limited*, Toronto, Ontairo, Canada, [http://www.worldbank.org/servlet/WDSContentServer/WDSPIB/1999/09/14/000009265_3970716150148.](http://www.worldbank.org/servlet/WDSContentServer?WDSPIB/1999/09/14/000009265_3970716150148.), download pada tanggal 10 April 2006.
- Zayed, A. (2003) : Cement Composition and Structural Durability in Florida, Final Report, Florida Department of Transportation, State Project Number BC353-29, Department of Civil and Environmental Engineering, University of South Florida, [http://www.dot.state.fl.us/research-center/Completed_Proj/Summary_SMO/FDOT_BC353_29_rpt.pdf.](http://www.dot.state.fl.us/research-center/Completed_Proj/Summary_SMO/FDOT_BC353_29_rpt.pdf), download pada tanggal 16 Juni 2006.

Dampak Intrusi Mikroorganisme

terhadap **Material Beton** dan Cara Penanggulangannya

Pencemaran lingkungan dapat terjadi karena aktivitas sehari-hari manusia, terutama di daerah kumuh semacam pasar tradisional. Di tempat seperti ini, limbah air kotor dan penanganan sampah basah sering kali belum diatasi dengan baik sehingga berpotensi menjadi penyebab pertumbuhan mikroorganisme. Struktur beton dalam kondisi lingkungan demikian cukup rentan terhadap kerusakan, terutama jika produk sampingan dari aktivitas mikroorganisme memiliki tingkat keagresifan yang tinggi. Mikroorganisme akan mengisi ruang atau pori-pori beton dan mempengaruhi unsur kimia produk hidrasi semen.

Penulis melalui buku ini akan membahas lebih dalam tentang ketahanan material beton terhadap intrusi mikroorganisme. Dan kali ini, penulis akan menyajikan tentang bagaimana limbah nikel dapat dijadikan sebagai bahan substitusi parsial semen. Buku ini memiliki 5 bagian utama yang terdiri dari garis besar perkembangbiakan mikroorganisme di dalam material beton, hubungan intrusi mikroorganisme dan ketahanan beton serta tinjauan holistiknya dengan melibatkan bubuk slag nikel, kemudian ada prosedur membuktikan ketahanan beton secara praktis, dan juga optimasi bubuk slag nikel dalam sistem ternary. Penulis berharap buku ini dapat menjadi referensi untuk mempertimbangkan solusi bagi kesinambungan fungsi bangunan, terutama pada kondisi lingkungan yang agresif, seperti pasar-pasar tradisional, bangunan bawah tanah (*basement*), dan lain-lain.

Penerbit Deepublish (CV BUDI UTAMA)

Jl. Kaliurang Km 9,3 Yogyakarta 55581

Telp/Fax : (0274) 4533427

Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

✉ cs@deepublish.co.id

🌐 Penerbit Deepublish

📧 @penerbitbuku_deepublish

🌐 www.penerbitdeepublish.com



Kategori : Teknik

ISBN 978-623-02-8048-1



9 786230 280481