

SYARAT TAMBAHAN  
PERAIHAN DANA MELALUI KOMPETISI

No	Jenis kontrak	No Kontrak	Tanggal	Jumlah dana, Rp
1	Kerja sama dengan industri PT Utama Karya	33.03.PP/HK-DSU/TOL.TTP/2022	11 Maret 2022	104.520.000
2	Kerja sama dengan industri Pabrik Genteng Ibukota	011/SPPP/IB/PENELITIAN/XII/2021	21 Desember 2021	50.000.000
3	Profesorship	023.17.2.677516/2021	23 November 2020	50.000.000



2. Kontrak borongan ini ditetapkan menggunakan mata uang Rupiah (Rp.)
3. Harga kontrak tersebut diatas adalah tetap dan mengikat, dan telah memperhitungkan semua risiko yang mungkin terjadi untuk penyelesaian Penelitian.
4. Jenis kontrak adalah **Lump Sum**.

**PASAL 4  
JANGKA WAKTU**

Jangka waktu pelaksanaan Penelitian sebagaimana dimaksud dalam pasal 2 perjanjian ini adalah selama 100 (Seratus) hari kalender atau terhitung sejak tanggal 02 Januari 2022 s/d 12 April 2022 dalam perjanjian pemborongan ini.

**PASAL 5  
LAIN-LAIN**

1. Apabila terdapat perubahan dalam perjanjian ini dikemudian hari, maka PARA PIHAK sepakat untuk menuangkan dalam suatu addendum yang merupakan satu kesatuan yang tak terpisahkan dengan perjanjian ini.
2. Perjanjian ini tunduk pada hukum Negara Republik Indonesia.
3. Perjanjian ini dibuat dalam rangkap 2 (dua) masing – masing bermeterai cukup dan mempunyai kekuatan hukum yang sama.

**PASAL 6  
RENCANA KERJA DAN JADWAL PELAKSANAAN (TIME SCHEDULE)**

1. **PIHAK KEDUA** wajib sudah memulai Penelitian dalam waktu 1 hari sejak ditandatanganinya Perjanjian ini.
2. **PARA PIHAK** sepakat jadwal pelaksanaan disesuaikan dengan Jadwal Pelaksanaan Induk pada Perjanjian Pemborongan antara **PIHAK PERTAMA** dan Pemilik Proyek termasuk jam kerja yang berlaku dilapangan.
3. **PIHAK KEDUA** wajib membuat rencana pelaksanaan Penelitian dan diserahkan kepada **PIHAK PERTAMA** dalam kurun waktu 1 hari sejak ditandatanganinya perjanjian ini.

**PASAL 7  
PEKERJAAN TAMBAH ATAU KURANG**

1. Yang dimaksud dengan Pekerjaan Tambah ialah pekerjaan yang diperintahkan secara tertulis oleh **PIHAK PERTAMA** kepada **PIHAK KEDUA** untuk dilaksanakan, yang sebelumnya tidak tercantum baik dalam Rencana Kerja dan Syarat-syarat yang terdapat dalam dokumen Perjanjian ini.
2. Yang dimaksud dengan Pekerjaan Kurang ialah pekerjaan yang diperintahkan secara tertulis oleh **PIHAK PERTAMA** kepada **PIHAK KEDUA** untuk tidak dilaksanakan, yang sebelumnya telah tercantum dalam Rencana Kerja dan Syarat-syarat yang terdapat dalam dokumen Perjanjian ini.
3. Pekerjaan Tambah atau Pekerjaan Kurang hanya dapat dilaksanakan oleh **PIHAK KEDUA** setelah mendapat perintah tertulis dari **PIHAK PERTAMA** dengan menyebutkan perincian pekerjaan secara jelas.
4. Perubahan Harga Kontrak akibat Pekerjaan Tambah atau Pekerjaan Kurang tersebut dihitung berdasarkan penambahan atau pengurangan kuantitas dari bagian yang diadakan perubahan saja dikalikan dengan Harga Satuan Pekerjaan yang terdapat dalam dokumen Perjanjian ini.
5. Pekerjaan Tambah atau Pekerjaan Kurang serta perubahan harga kontrak dan/ atau perpanjangan waktu pelaksanaan akibat Pekerjaan Tambah atau Pekerjaan Kurang, jika ada, akan dituangkan dalam Perjanjian Tambahan (*Addendum*) yang ditandatangani oleh kedua belah pihak dan merupakan satu kesatuan yang tidak terpisahkan dari Perjanjian ini.

Paraf Pihak Pertama	Paraf Pihak Kedua
	Z

**PASAL 8**  
**HAK DAN KEWAJIBAN PARA PIHAK**

**A. Hak & Kewajiban PIHAK PERTAMA**

**A.1. PIHAK PERTAMA berhak untuk:**

1. Mengawasi dan memeriksa Penelitian yang dilaksanakan oleh **PIHAK KEDUA**.
2. Meminta laporan-laporan secara periodik mengenai pelaksanaan Penelitian yang dilakukan oleh **PIHAK KEDUA**.
3. Menginstruksikan secara tertulis kepada **PIHAK KEDUA** atas biaya **PIHAK KEDUA** sendiri untuk :
  - Melaksanakan pekerjaan yang sangat diperlukan untuk kelancaran proses pekerjaan.
  - Bila **PIHAK KEDUA** gagal melaksanakan, **PIHAK PERTAMA** dapat menunjuk pihak ketiga atau melaksanakannya sendiri dengan biaya **PIHAK KEDUA**.
4. Menangguhkan Penelitian **PIHAK KEDUA** apabila :
  - Mendapatkan instruksi dari pemilik proyek dan atau pihak berwenang;
  - **PIHAK KEDUA** tidak memenuhi persyaratan kerja sebagaimana diatur dalam kontrak;
5. Menghentikan Penelitian **PIHAK KEDUA**
6. Memotong setiap tagihan pihak kedua untuk denda dan atau hal-hal lain yang dipersyaratkan didalam perjanjian.
7. **PIHAK PERTAMA** berhak melakukan perubahan, penambahan atau pengurangan pekerjaan dengan instruksi tertulis.

**A.2. PIHAK PERTAMA berkewajiban untuk:**

1. Membayar Penelitian sesuai dengan ketentuan kontrak.
2. Memberikan dokumen pendukung yang dimiliki untuk pelaksanaan Penelitian.

**B. Hak Dan Kewajiban PIHAK KEDUA**

**B.1 Hak PIHAK KEDUA**

1. Menerima pembayaran sesuai dengan yang ditentukan dalam Kontrak .
2. Menerima dokumen pendukung untuk pelaksanaan Penelitian.
3. Menerima gambar rencana.

**B.2 Kewajiban PIHAK KEDUA**

1. **PIHAK KEDUA** wajib melaksanakan dan menyelesaikan Penelitian sesuai dengan syarat dan ketentuan yang berlaku dalam Kontrak beserta Lampiran-Lampirannya yang merupakan satu kesatuan yang tidak terpisahkan dari Kontrak.;
2. **PIHAK KEDUA** atas biaya sendiri wajib melaksanakan pekerjaan pendukung lainnya yang diperlukan untuk kelancaran Penelitian.

Paraf Pihak Pertama	Paraf Pihak Kedua

3. **PIHAK KEDUA** wajib menyediakan peralatan, personil, material dan barang serta jasa lainnya, baik untuk pekerjaan sementara / pendukung maupun pekerjaan permanen yang diperlukan untuk disain, pelaksanaan.
4. **PIHAK KEDUA** wajib memberikan keterangan-keterangan yang diperlukan oleh **PIHAK PERTAMA** untuk pemaparan hasil penelitian.
5. **PIHAK KEDUA** wajib menyampaikan detail rencana dan metoda yang diusulkan **PIHAK KEDUA** untuk digunakan dalam pelaksanaan Penelitian. Keterlambatan penyiapan dokumen diatas tidak dapat dipakai sebagai alasan perpanjangan waktu.
6. **PIHAK KEDUA** wajib menjaga kerahasiaan seluruh dokumen yang terkait dengan pelaksanaan Penelitian.
7. **PIHAK KEDUA** wajib bekerjasama dengan pihak lain yang ditunjuk oleh **PIHAK PERTAMA**.
8. **PIHAK KEDUA** wajib melindungi dan membebaskan **PIHAK PERTAMA** dari segala tuntutan dan/atau gugatan dari pihak ketiga yang disebabkan oleh penggunaan Hak Atas Kekayaan Intelektual (HAKI) yang ada dan dipergunakan oleh **PIHAK KEDUA** dalam pelaksanaan Penelitian ini.
9. **PIHAK KEDUA** wajib melindungi dan membebaskan **PIHAK PERTAMA** atas segala tuntutan pihak ketiga ataupun pihak yang dipekerjakan **PIHAK KEDUA** atau pihak yang dipekerjakan agen dari **PIHAK KEDUA**.
10. **PIHAK KEDUA** wajib mengizinkan pihak manapun yang diberi wewenang oleh **PIHAK PERTAMA**, untuk melakukan pemeriksaan / inspeksi.
11. **PIHAK KEDUA** dengan biaya sendiri dan tanpa perpanjangan waktu harus mampu mengantisipasi dan mengatasi kondisi tak terduga yang dapat menghambat pelaksanaan Penelitian, kecuali kondisi force majeure.
12. **PIHAK KEDUA** wajib melakukan pengujian pada akhir Penelitian.
13. **PIHAK KEDUA** wajib mengganti rugi kepada **PIHAK PERTAMA** ataupun pihak ketiga terhadap semua klaim, denda, kerugian dan pengeluaran berkenaan dengan pelaksanaan Penelitian **PIHAK KEDUA** yang berakibat pada luka/sakit, kerusakan/kehilangan harta benda.
14. **PIHAK KEDUA** wajib mengizinkan owner mengambil alih Penelitian berdasarkan kontrak dengan **PIHAK PERTAMA**.
15. **PIHAK KEDUA** tidak boleh mengambil tenaga kerja dari **PIHAK PERTAMA**, kecuali atas persetujuan **PIHAK PERTAMA**.
16. Perpanjangan waktu hanya dapat dilaksanakan atas persetujuan **PIHAK PERTAMA** sebagai akibat adanya pekerjaan tambah yang menurut perhitungan **PIHAK PERTAMA** memerlukan tambahan waktu.
17. **PIHAK KEDUA** wajib mempercepat pekerjaan jika terlambat baik dengan penambahan sumber daya, jam kerja ataupun perbaikan metode kerja dengan biaya sendiri.

Paraf Pihak Pertama	Paraf Pihak Kedua

**PASAL 9**  
**CARA PEMBAYARAN**

1. **PIHAK PERTAMA** memberikan dana untuk kegiatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 1 sebesar Rp 104.520.000,- (Seratus Empat Juta Lima Ratus Dua Puluh Ribu Rupiah).
2. Dana pelaksanaan penelitian sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dibayarkan oleh **PIHAK PERTAMA** kepada **PIHAK KEDUA** secara bertahap dengan ketentuan sebagai berikut :
  - a. Pembayaran tahap pertama sebesar 50% dari total dana kegiatan yaitu sebesar Rp. 52.260.000 (Lima Puluh Dua Juta Dua Ratus Enam Puluh Ribu Rupiah).
  - b. Pembayaran tahap kedua sebesar 50% dari total dana kegiatan yaitu sebesar Rp. 52.260.000 (Lima Puluh Dua Juta Dua Ratus Enam Puluh Ribu Rupiah) dibayarkan setelah **PIHAK KEDUA** selesai :
    1. Surat Pernyataan Laporan Kemajuan Pelaksanaan Penelitian
    2. Rekapitulasi Laporan Penggunaan Keuangan 50% yang telah dilaksanakan
    3. Berita Acara Serah Terima Laporan Pelaksanaan
    4. Berita Acara Serah Terima Penggunaan Keuangan 50%
3. Jumlah pembayaran sebagaimana ayat 2 pasal ini akan memperhitungkan potongan seperti PPh final 4% dan potongan lainnya (jika ada).
4. Semua pembayaran dilakukan melalui transfer antar Bank dan akan dilakukan pada:

Atas Nama : Ibu CH NIKEN DWI WAHYUNI  
Bank : BNI  
No. Rekening : 0071053040

**PIHAK PERTAMA**  
**PT. HUTAMA KARYA ( Persero )**  
**DIVISI SIPIL UMUM**



**ARI ASMOKO**  
Executive Vice President

**PIHAK KEDUA**

**Dr. Ir. CHATARINA NIKEN, M.T.**  
Peneliti

Paraf Pihak Pertama	Paraf Pihak Kedua
	<b>2</b>

## SURAT PEMBERITAHUAN

Sehubungan dengan dilaksanakannya pekerjaan Rigid Pavement, dengan ini menyatakan bahwa setelah melalui beberapa tahap seleksi dari manajemen dan sesuai pengalaman sebagai Dosen Teknik Struktur pada program studi Teknik Sipil S1, S2 di Universitas Lampung dan pengalaman sebagai peneliti di bidang beton, maka kami menunjuk Dr. Ir. Chatarina Niken M.T. selaku penerima tugas untuk mengkoordinir dan sebagai penanggung jawab pelaksanaan penelitian mengenai deformasi jalan beton.

Demikian pemberitahuan ini dibuat dengan sesungguhnya dan dengan sebenar benarnya.

Jakarta, 11 Maret 2022



**ARI ASMOKO**  
Executive Vice President

**LAPORAN PENELITIAN  
KERJASAMA DENGAN  
PT. HUTAMA KARYA**



**JUDUL PENELITIAN :**

**DEFORMASI JALAN BETON PADA DAERAH TROPIS LEMBAB  
Dengan PELAT SKALA PENUH sebagai MODEL**

Disusun oleh:

**Dr. Ir. Chatarina Niken, M.T. NIDN 0013065811**

**JURUSAN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
2022**

HALAMAN PENGESAHAN  
PENELITIAN UNIVERSITAS LAMPUNG

Judul Laporan: Deformasi Jalan Beton pada Daerah Tropis Lembab dengan Pelat Skala Penuh sebagai Model

Jenis Kegiatan :  Penelitian  Pengabdian

Tim Peneliti:

No	Nama Lengkap	NIDN	Jabatan Fungsional	Jurusan	No HP
1	Dr. Ir. Chatarina Niken DWSBU, M.T	0013065811	Dosen	Teknik Sipil	081329055304

Lokasi Penelitian : Universitas Indonesia  
Lama Penelitian : 2 Januari 2022 – 12 April 2022  
Biaya Penelitian : Rp 104.520.000,00  
Sumber Dana : PT Hutama Karya  
Luaran wajib : Laporan Akhir

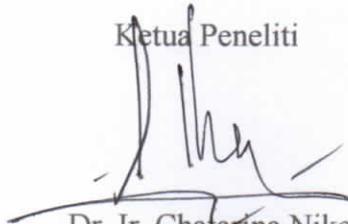
Bandar Lampung, 15 April 2022

Mengetahui,  
Ketua Jurusan Teknik Sipil FT Unila



Ir. Laksmi Irianti, MT.  
NIP. 196204081989032001

Ketua Peneliti



Dr. Ir. Chatarina Niken, M.T.  
NIP. 195806131984032003

Mengetahui,  
Ketua LPPM Unila



Dr. Ir. Helmy Fitriawan, D.E.A  
NIP. 196505101993032008

Menyetujui,  
Dekan Fakultas Teknik Unila



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.  
NIP. 1975092820011210021

## DAFTAR ISI

	Hal
Halaman Judul	
Halaman Pengesahan	
Daftar Isi	i
Daftar Gambar	ii
Daftar Tabel	ii
Identitas dan Uraian Umum	1
Ringkasan	2
I. Pendahuluan	4
II. Material dan Metode	4
III. Hasil dan Pembahasan	9
3.1. Hasil	9
3.2. Pembahasan	11
3.2.1. Model refleksi SRH	11
3.2.2. Konsep dasar	12
3.2.3. Kelembaban bagian dalam, ekspansi dan kontraksi	13
3.2.4. Model deformasi	14
3.2.5. Perbedaan antara observasi dan model	15
IV. Kesimpulan	16
Daftar Pustaka	

## DAFTAR GAMBAR

		Hal
Gambar 1	Lingkungan di Indonesia	5
Gambar 2	Hubungan susut dan kelembaban relative	6
Gambar 3	Skema penempatan vibrating wire embedded strain gauge	7
Gambar 4	Deformasi keempat stain gauge	9
Gambar 5	Deformasi merupakan refleksi kelembaban relative	9
Gambar 6	Deformasi dan pemodelannya	10
Gambar 7	Selisih antara observasi dan model	11
Gambar 8	Penyusutan HSC di Malaysia (Omar dkk, 2008) dan pemodelannya (penulis)	11
Gambar 9	Ilustrasi skematik pori kapiler	12
Gambar 10	Distribusi kelembaban	13

## DAFTAR TABEL

Tabel 1	Faktor koreksi “F” dan “C”	10
---------	----------------------------	----

## IDENTITAS DAN URAIAN UMUM

---

1. Judul Proposal : Penelitian Deformasi Jalan Beton pada Daerah Tropis Lembab dengan Pelat Skala Penuh sebagai Model
2. Jenis : Kerjasama dengan Industri
3. Tim Peneliti

No	Nama	Jabatan	Bidang Keahlian	Program Studi	Alokasi waktu (jam/mg)
1	Dr. Ir. Chatarina Niken	Ketua	Struktur	Teknik Sipil	30

4. Obyek Penelitian: Pelat Beton Skala Penuh
5. Masa Pelaksanaan  
Mulai. : bulan Januari tahun 2022  
Berakhir: bulan Juni 2022
6. Biaya: Rp 104.520.000,00
7. Lokasi Penelitian: Universitas Indonesia
8. Kontribusi mendasar pada bidang ilmu: menemukan perilaku deformasi jalan beton

## LAPORAN PENELITIAN

### DEFORMASI JANGKA PENDEK PADA PELAT BETON SEBAGAI MODEL JALAN BETON

Dr. Chatarina Niken

#### RINGKASAN

Penelitian ini dilakukan di Indonesia, negara dengan cuaca tropis lembab dengan kondisi kelembaban tinggi. Rata-rata suhu dan kelembaban di Indonesia berturut-turut 27°C dan 72%. Perilaku beton berbeda dengan di daerah empat musim dimana ACI disusun. Peraturan beton Indonesia mengacu pada ACI yang tentu perlu penyesuaian. Fluktuasi kelembaban tinggi dan rendah dapat mencapai 25%. Kelembaban beton ada yang lebih dan ada kurang dari 80%. Hal ini membuat deformasi bergantian berbalik dan tidak berbalik. Dengan fluktuasi yang besar membuat kondisi deformasi beton mengembang dan menyusut terjadi setiap hari. Beton adalah material porus, sehingga suhu dan kelembaban sekeliling mudah masuk dan mempengaruhi deformasi. Hal ini membuat perilaku beton di daerah tropis lembab berbeda dengan daerah empat musim. Penelitian dilakukan secara eksperimental satu pelat beton skala penuh berukuran 3,00m × 1,60m × 0,15m dengan kuat tekan 60MPa di mana pelat beton diletakkan pada beberapa tumpuan sebagai model jalan beton. Pemilihan mutu beton yang tinggi, karena lebih peka terhadap deformasi. Pembebanan dilakukan pada umur 14 hari. Perilaku pelat beton diperoleh dengan menggunakan empat *vibrating wire embedded strain gauge*. Spesimen diamati antara 7 sampai 97 hari periode. Hasil penelitian menunjukkan deformasi terbesar selama 97 hari pengamatan terjadi di bagian sudut. 0-18 jam menyusut dengan laju tinggi dan 18-32 jam memuai. Oleh sebab itu dalam periode ini, penguapan air yang terjadi karena tidak ditutup harus benar-benar dihindari, agar susut dan muai beton masih dalam keadaan elastis. Deformasi berhubungan erat dengan kelembaban sekitar. Diperoleh model deformasi mirip dengan model refleksi kelembaban relatif di sekitarnya. Hasil penelitian Omar dkk., 2008 di Malaysia juga menunjukkan kemiripan dengan model refleksi kelembaban relatif (SRH) sekitar. Model deformasi atau susut untuk pelat beton kinerja tinggi adalah  $t = -SRH_t \cdot 10^{-5} + SRH_{initial} \cdot 10^{-5} \cdot f + C$ . "f" adalah faktor kelembaban relatif awal di sekitarnya, C adalah faktor yang berhubungan dengan posisi, dan luas permukaan. Sedangkan rata-rata error pada posisi

deformasi maksimum sebesar 26,8%. Perbedaan yang besar menunjukkan bahwa tingkat kesulitan kelembaban masuk ke dalam jaringan pori.

Kata kunci: beton, deformasi, jalan beton, lembab, susut, tropis

## I. PENDAHULUAN

Perilaku beton (susut dan muai) merupakan faktor penting dalam perancangan jalan beton. Penyusutan pada beton dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti suhu, kelembaban, waktu, desain campuran, karakteristik material, proses perawatan, dan geometri spesimen (Dey dkk., 2021; Pecker, 2020). Indonesia, negara dengan cuaca tropis lembab dengan kondisi kelembaban tinggi. Rata-rata suhu dan kelembaban di Indonesia berturut-turut 27°C dan 72%. Perilaku beton berbeda dengan di daerah empat musim dimana ACI disusun. Peraturan beton Indonesia mengacu pada ACI yang tentu perlu penyesuaian.

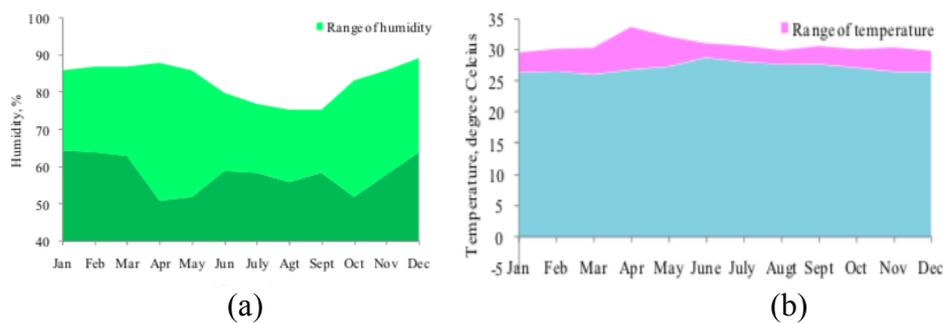
Beberapa peneliti telah memberikan perhatian pada deformasi beton. Curing basah memungkinkan penghapusan total penyusutan dalam 28 hari pertama (Szlachetka dkk., 2021). Migrasi kelembaban menyebabkan pengeringan-penyusutan merupakan masalah utama dalam bahan semen dan dapat menyebabkan kemungkinan retak yang tinggi, yang mengakibatkan penurunan kinerja jangka panjang (Tran dkk., 2021). Perilaku beton terhadap perubahan volume mutlak masih dihadapkan pada ketidakpastian dalam hal reaksi kimia dan fisika pada berbagai tahap rentang hidupnya yang dimulai dari awal proses hidrasi, dan tergantung pada berbagai faktor termasuk kondisi lingkungan sekitarnya (Elzokra dkk., 2020; Lentzkow, 2018). Temperatur yang lebih tinggi, kecepatan angin, dan kelembaban yang lebih rendah mempengaruhi sifat interlayer beton secara negatif (Niu dkk., 2020). Terjadi degradasi material akibat kadar air dan temperatur (Latief, 2019). Penyusutan dan *creep* akan berkurang seiring dengan meningkatnya kelembaban lingkungan, dan kelembaban relatif akan berdampak lebih besar pada *creep* awal (Li dkk., 2019).

Selama 30 tahun terakhir, beberapa model telah diusulkan untuk prediksi susut pengeringan, rangkai, dan regangan total di bawah beban. Metode terbaik untuk memodelkan deformasi beton adalah dengan melibatkan proses interaksi antara elemen material dan lingkungannya. Proses yang terjadi pada penambahan *fly ash* pada semen adalah proses hidrasi dan reaksi pozzolan yang keduanya dipengaruhi oleh kelembaban relatif sekeliling (*surrounding relative humidity*/SRH). SRH selalu berubah. Di daerah dengan cuaca tropis lembab perubahan SRH merupakan siklus kering-basah harian. Siklus kering-basah harian menambah kesulitan dalam pemodelan deformasi. Jalan beton harus mampu mengakomodasi perubahan tersebut. Sebuah model dipilih sebagai kompromi antara akurasi dan kemudahan penggunaan.

Beton adalah bahan yang berpori, akibatnya kelembaban lingkungan mudah masuk; demikian, kelembaban relatif sekitar mempengaruhi perilaku beton dari pengecoran, sebelum dan selama

beban diterapkan dan mempengaruhi kualitasnya. Pemahaman akan deformasi jalan beton membuat para pelaku konstruksi dapat membuat jalan beton tanpa retak.

Fluktuasi kelembaban di Indonesia rata-rata 25% terjadi sepanjang tahun (Gambar 1). Gambar 1a dan 1b diperoleh dengan menyelidiki suhu dan kelembaban pada pagi dan sore hari yang menggambarkan siklus kelembaban kering-basah per hari. Penelitian dilaksanakan pada bulan November 2009 sampai Desember 2011, di Universitas Indonesia, Jakarta, Indonesia (iklim tropis lembab).



Gambar 1. Lingkungan di Indonesia: (a) Kelembaban relative, (b) Suhu

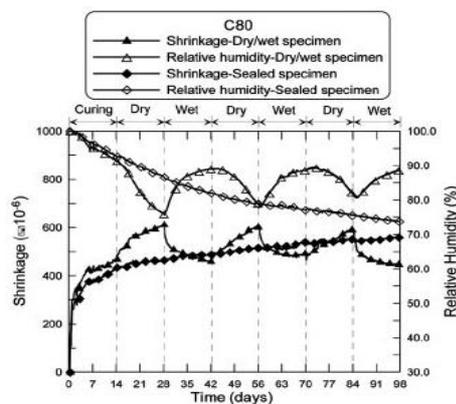
Regangan susut tidak berbalik terjadi ketika spesimen dikeringkan hingga kurang dari 80% kelembaban relatif (RH), sementara percobaan sebelumnya lainnya dalam literatur menunjukkan bahwa regangan susut antara 40% RH dan 11% RH dapat berbalik (Maruyama dkk., 2021). Indonesia tidak mencapai kelembaban relatif 80% hanya selama 3 bulan dalam setahun (Gambar 1a). Artinya selama 3 bulan di Indonesia telah terjadi penyusutan yang dapat berbalik, 9 bulan deformasi tidak berbalik. Kelembaban relatif sama atau lebih rendah dari 55% dapat menyebabkan indeks kerusakan yang relatif besar dan risiko retak yang tinggi pada beton (Gao dkk., 2020). Gambar 1 menunjukkan bahwa Indonesia mengalami kelembaban terendah kurang dari 55% selama 4 bulan. Semua hal tersebut menyebabkan deformasi beton di Indonesia yang tidak stabil dan risiko retak juga perlu diwaspadai.

Baik regangan mulur dan defleksi spesimen di bawah kondisi kelembaban siklik menunjukkan kecenderungan linier yang lebih kecil daripada spesimen yang hanya terpapar udara alami. Selama siklus pembasahan tertentu, laju deformasi menjadi lebih lambat dan regangan mulur bahkan pulih dengan peningkatan kelembaban, terutama untuk siklus pembasahan-pengeringan yang lebih pendek. Temuan termasuk kesalahan yang agak besar antara hasil prediksi dan data eksperimen ketika kelembaban relatif rata-rata diadopsi dalam model analitik (Li & He, 2018).

Kelembaban relatif, suhu beton dan kecepatan angin menentukan tingkat penguapan (Lentzkow, 2018). Penguapan ini mengakibatkan perubahan volume atau penyusutan (Namita, 2020). Perbedaan kelembaban antara lapisan atas, tengah dan bawah pelat, dapat menyebabkan tegangan lengkung. Untuk menekan tegangan lentur karena kelembaban ini, perawatan internal dengan polimer penyerap super telah diselidiki pada pelat perkerasan (Yu dkk., 2020; Yang dkk., 2019). Deformasi atau pergerakan total jangka panjang pada beton sangat bergantung pada waktu, kelembaban dan temperatur (Mohammad, 2018). Efek kelembaban relatif dianggap lebih penting dalam perubahan volume daripada suhu (ACI 209R, 1992).

Hubungan antara penyusutan dan kelembaban relatif telah dipelajari oleh Zhang dkk., 2012 (Gambar 2). Perubahan kelembaban relatif dilakukan dengan pembasahan dan pengeringan. Sampel yang digunakan adalah 60 x 100 x 350 mm untuk beton mutu 30 dan 50 MPa dan 40 x 100 x 350 mm untuk mutu beton 80 MPa.

Penyusutan pada kondisi siklus basah dan kering merupakan cerminan dari siklus kelembaban relatif. Kisaran kelembaban adalah 70-90%, dengan demikian; dapat dikatakan bahwa benda uji berada pada lingkungan yang lembab (Gambar 2). Dari penelitian ini dapat dikatakan bahwa terdapat hubungan yang erat antara kelembaban relatif sekitar dengan deformasi.



Gambar 2. Hubungan susut dan kelembaban relative (Zhang dkk, 2012)

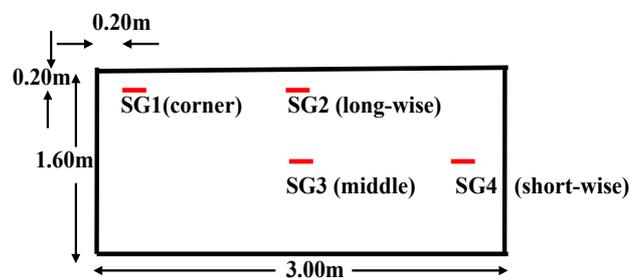
Mengingat aplikasi di lapangan, korelasi seperti itu sangat penting dalam memprediksi dan melakukan pencegahan retak akibat susut dalam struktur beton di bawah siklus kering-basah. Sangat sedikit referensi yang ditemukan dalam literatur tentang studi kinerja susut beton selama siklus kering-basah (Zhang dkk, 2012).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui hubungan antara deformasi beton dengan kelembaban relatif sekitar (SRH) pada kondisi aktual atau kondisi kering-basah.

## II. MATERIAL DAN METODE

Penelitian ini dilakukan di Jakarta, Indonesia, dengan cuaca tropis lembab. Penelitian dilakukan dengan cara eksperimen menggunakan satu benda uji dengan dimensi  $3,00\text{m} \times 1,60\text{m} \times 0,15\text{m}$ . Empat *vibrating wire embedded strain gauge* tertanam (SG) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. SRH dan suhu dipantau dengan termo-higrometer.

Beton dengan target kuat tekan 60 MPa dan diameter aliran slump  $35 \pm 2$  cm diaplikasikan (Gambar 3). Pelat dicor pada pukul 22.10 waktu setempat dengan suhu sekitar 25,4 derajat Celcius dan SRH 94%. Pelat diletakkan pada beberapa tumpuan silinder beton berdiameter 0,15 m dengan posisi mendatar pada jarak 0,30m, sehingga mencerminkan pelat di atas tumpuan elastis seperti jalan beton.



Gambar 3. Skema penempatan *vibrating wire embedded strain gauge*

### 2.1. Material

Mix design dilakukan dengan batasan kadar semen  $500 \text{ kg/m}^3$  untuk memenuhi faktor susut bahan yang paling mendekati 1 (ACI 209R, 1992). Semen Portland Biasa (OPC) yang diproduksi oleh Indocement Ltd digunakan. Kondisi agregat adalah SSD. Komposisi campurannya adalah OPC  $500 \text{ kg/m}^3$ , silika fume  $40 \text{ kg/m}^3$ , air  $142,6 \text{ kg/m}^3$ , pasir  $800 \text{ kg/m}^3$ , agregat kasar  $935 \text{ kg/m}^3$ , dan HRWR  $7.6 \text{ kg/m}^3$ .

### 2.2. Metode

Penyusutan diukur sebagai perubahan regangan terhadap waktu dengan memasang empat *vibrating wire embedded strain gauge* (SG) tertanam dalam spesimen (Gambar 3). Pengamatan diakhiri saat beton berumur 97 hari. Spesimen *dicuring* setelah cetakan beton dilepaskan (satu hari setelah pengecoran) dengan cara menutupi benda uji dengan karung basah hingga berumur 7 hari. Setelah perlakuan ini, spesimen dibiarkan bersentuhan langsung dengan kelembaban dan suhu relatif di sekitarnya tetapi dengan perlindungan terhadap tetesan air hujan.

Pengamatan dilakukan segera setelah penuangan dengan menggunakan pembacaan sebagai berikut: hari ke 7 - 10, setiap 2 jam; hari 10 - 14, satu kali sehari. Dua balok berukuran  $3,00\text{m} \times 1,60\text{m} \times 0,20\text{m}$  dicor menumpang pada pelat pada umur 14 hari. Creep kemudian terjadi di pelat. Empat belas hari adalah pendekatan yang paling dekat dengan penerapan beban nyata pada perkerasan kaku di Indonesia. Pengamatan dilakukan tepat setelah pembebanan sebagai berikut: umur benda uji hari 14 - 16 setiap 15 menit; hari 16 - 17, setiap 60 menit dan hari 17 - 22, setiap 2 jam; hari 22 - 97, setiap  $\pm 35$  jam. Kelembaban relatif dan suhu di sekitarnya dicatat pada saat yang bersamaan.

### 2.3. Analisis data

Data dari masing-masing SG diproses secara terpisah karena mekanisme penetrasi SRH pada setiap posisi di pelat berbeda (Niken dkk., 2018), oleh karena itu; empat nilai deformasi tidak diambil sebagai nilai statistik. Meskipun berdasarkan satu data pada setiap posisi, nilai ini dapat diandalkan karena diambil dari sampel skala penuh dengan alat yang dikalibrasi.

Pengambilan data SRH dilakukan satu kali pada siang hari dan satu kali pada sore hari yang menunjukkan siklus kering-basah. Data kelembaban ini diperiksa kebenarannya dengan memeriksa adanya kelembaban pada kisaran sesuai Gambar 1 yang diperoleh berdasarkan pengamatan selama 2 tahun di lokasi yang sama.

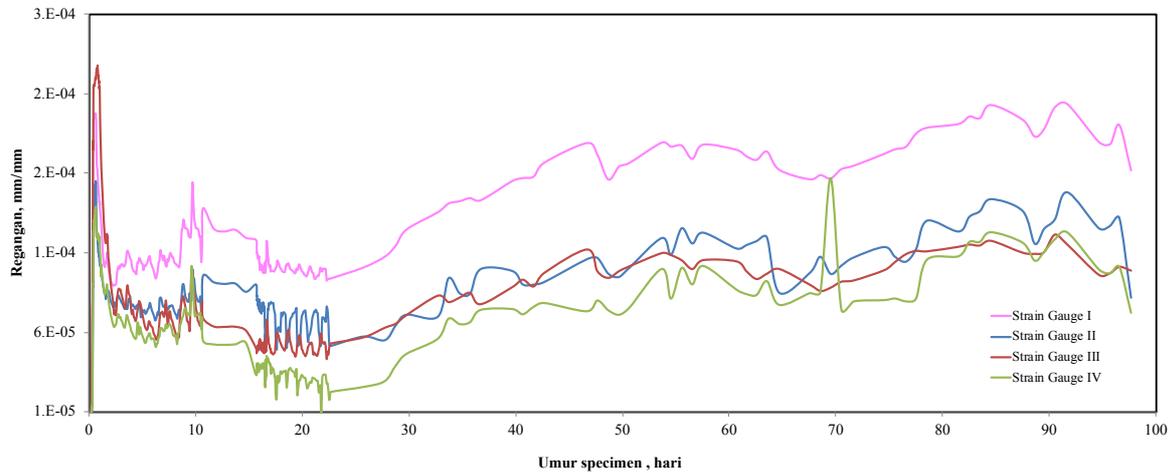
Nilai SRH dan waktu diambil di tengah dua pengamatan berturut-turut, meskipun pilihan ini menghasilkan kesalahan yang besar (Yu dkk., 2020). Hal ini dipilih karena deformasi reversibel pada SRH tertinggi sangat berbeda dengan SRH terendah. Pola SRH dibandingkan dengan keempat pola dari keempat SG. Hubungan deformasi pada masing-masing *strain gauge* terhadap grafik SRH diestimasi berdasarkan asumsi yang disebutkan di atas dan model matematika dibuat menggunakan program excel. Parameter yang diperlukan diperoleh dengan coba-coba dan deviasi terkecil dipilih. Hal ini wajar karena parameter ini tergantung pada posisi dan jaringan pori kapiler di lokasi tersebut.

Hasilnya dibandingkan dengan penelitian *creep* di Malaysia oleh Omar dkk., 2008. Pengamatan *creep* menggunakan 6 silinder berukuran  $100\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ . Spesimen dilembabkan dan diuji di ambient (cuaca tropis lembab) dengan kuat tekan 65 MPa.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Hasil

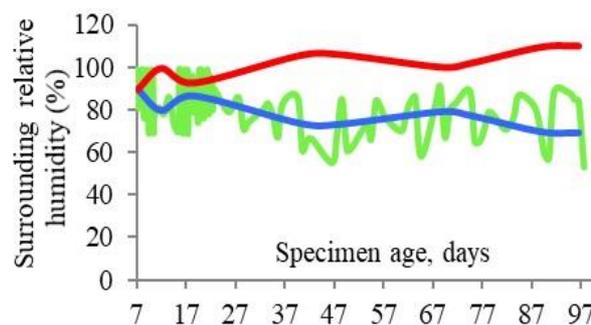
Deformasi dari keempat *strain gauge* disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Deformasi pada keempat *strain gauge*

Susut meningkat tajam pada umur 0-18 jam. Pada rentang waktu itu, susut tertinggi terjadi di bagian tengah. Susut kemudian turun tajam sampai umur 32 jam. Mulai umur 32 jam susut bagian sudut menunjukkan nilai terbesar sampai umur 97 hari. Dari umur 23 – 47 hari, 70-87 hari susut meningkat dengan laju cukup tinggi.

Bila deformasi tersebut dihubungkan dengan kelembaban relatif sekitar, model kelembaban relatif sekitar dan model deformasi ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Deformasi yang merupakan refleksi dari kelembaban relatif

Model deformasi berdasarkan SRH ditunjukkan pada Persamaan 1.

$$\varepsilon_t = \text{SRH}_{\text{initial}} \cdot 10^{-5} \cdot f - \text{SRH}_t \cdot 10^{-5} + C \quad (1)$$

Di mana:

$\epsilon_t$  : regangan pelat pada t  
 $t$  : umur beton terpilih, hari  
 percobaan  
 SRH<sub>t</sub>: SRH pada waktu t, %  
 $SRH_{initial}$ : SRH awal pada kerangka waktu, %  
 $f$  : faktor koreksi SRH<sub>initial</sub> dengan percobaan  
 $C$  : konstanta material dengan percobaan

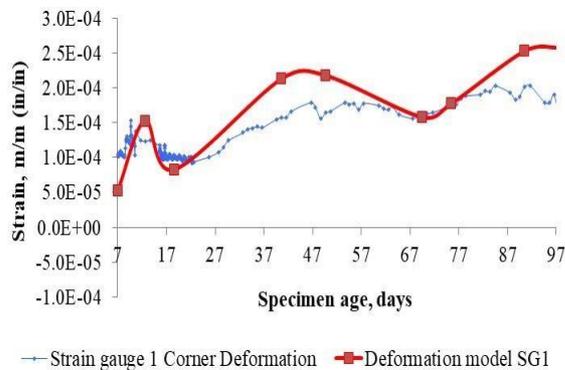
Gambar 5 menunjukkan model deformasi sebagai refleksi dari model SRH.

Untuk menentukan faktor koreksi “f” dan “C”, dipilih data deformasi pada puncak dan lembah. Waktu pengamatan adalah 7, 12.1, 18.5, 48.1, 69, 75, 89, dan 96,7 (hari) seperti terlihat pada Gambar 5. SRH awal diambil dari pola SRH pada umur 7 hari. Faktor koreksi “f” dan “C”, ditunjukkan pada Tabel 1.

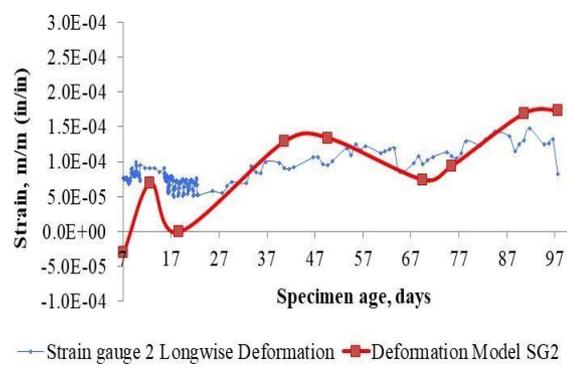
Tabel 1. Faktor koreksi “f” dan “C”

Strain gauge		f	C
No	Position		
1	Sudut	0.975	0.000075
2	Sisi panjang	0.25	0.00064
3	Tengah	0.273	0.000595
4	Sisi pendek	0.26	0.0006

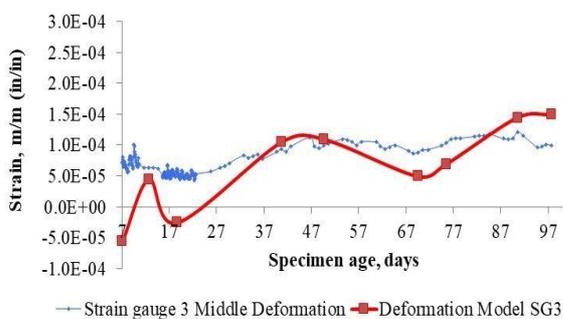
Persamaan Aplikasi 1 untuk semua posisi di pelat ditampilkan pada Gambar 6



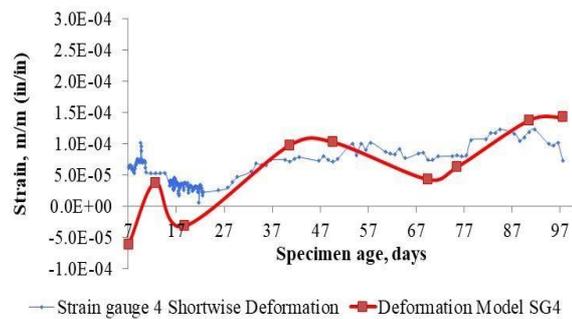
(a)



(b)



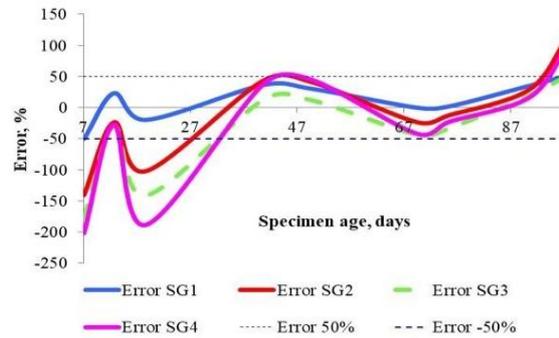
(c)



(d)

Gambar 6. Deformasi dan pemodelannya: (a) SG 1 (sudut); (b) SG2 (sisi panjang); (c) SG 3 (tengah); (d) SG4 (sisi pendek)

Perbedaan antara model dan observasi (*error*) ditampilkan pada Gambar 7.



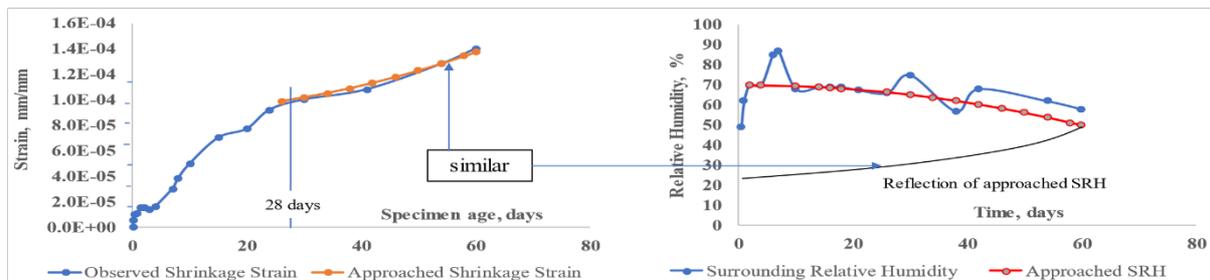
Gambar 7. Selisih antara observasi dan model

### 3.2. Pembahasan

#### 3.2.1. Model refleksi SRH

Deformasi dalam siklus kering-basah dan kondisi tertutup seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 merupakan cerminan dari kelembaban relatif lingkungan (Zhang dkk, 2012). Kelembaban relatif pada kondisi basah hingga kering dapat turun pada kisaran 15-35% (Gambar 1). Fluktuasi SRH yang tinggi akan mempengaruhi pergerakan air yang ada dalam beton. Pengambilan nilai 1 SRH untuk 1 siklus dengan range nilai yang lebar mengandung kelemahan yaitu menyederhanakan mekanisme perbedaan deformasi saat SRH tinggi dan SRH rendah. Seperti yang ditemukan oleh Zhang dkk, 2012 pada Gambar 2, model deformasi juga merupakan cerminan dari model SRH (Gambar 5 dan 6). Model SRH ini juga sesuai dengan penelitian Omar dkk, 2008 (Gambar 8a dan 8b).

Model SRH seperti pada Gambar 5 diperoleh dari titik tengah SRH. Itu tidak tergantung pada fluktuasi SRH tinggi dan rendah. Dalam fluktuasi SRH yang rendah, dimungkinkan untuk memiliki pola yang sama.



Gambar 8. a: Penyusutan HSC di Malaysia (Omar dkk, 2008) dan pemodelannya (penulis):

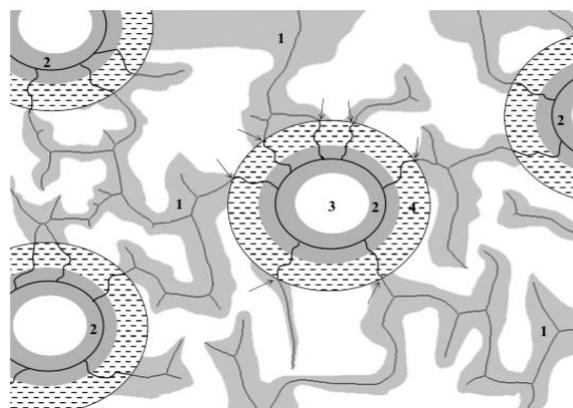
b:SRH (ambien) di Malaysia (Omar dkk, 2008) mendekati model SRH oleh penulis

Rumus pada Persamaan 1 diterapkan pada hasil penelitian dilakukan di Malaysia (cuaca tropis lembab) yang disajikan pada Gambar 8. Perbedaan garis tren antara Gambar 5 dan Gambar 8 disebabkan oleh bentuk spesimen, ukuran dan intensitas pengamatan SRH. Spesimen silinder (Omar dkk, 2008) memiliki luas permukaan yang lebih kecil dibandingkan pelat. Selama 7 sampai 60 hari, jumlah pengamatan dalam penelitian ini adalah 246 (Gambar 5) sedangkan Omar dkk, 2008 adalah 12 (Gambar 8b). Meskipun ukuran dan luas permukaan yang berhubungan langsung dengan cuaca lebih kecil disbanding penelitian ini, namun Persamaan 1 tetap berlaku.

Gambar 5, 6, 8 dan model deformasi pada Persamaan 1 dan Gambar 2 menunjukkan seberapa kuat hubungan antara deformasi dengan SRH; jadi; pembahasan akan ditekankan pada perubahan kelembaban dalam beton (*inner humidity/IH*).

### 3.2.2. Konsep dasar

Pori-pori beton menjadi pintu masuk air yang terkandung di udara sekitarnya. Ada sekitar 500  $m^2/cm^3$  pori-pori dalam beton (Bažant & Wittmann, 1982). Kandungan pori pasta semen dapat mencapai 30% (Holzer dkk., 2006). Kondisi ini membuat udara sekitar yang mengandung air dengan mudah masuk ke dalam beton, memasuki pori kapiler dan berpindah ke seluruh bagian beton. Fenomena ini terjadi karena semua pori kapiler terhubung dan turun ke beberapa phaenograin seperti ilustrasi skema yang ditunjukkan pada Gambar 9 (Holzer dkk., 2006). Sentuhan SRH pada semen yang tidak terhidrasi melalui phaenograins memicu proses hidrasi.



(Holzer dkk, 2006)

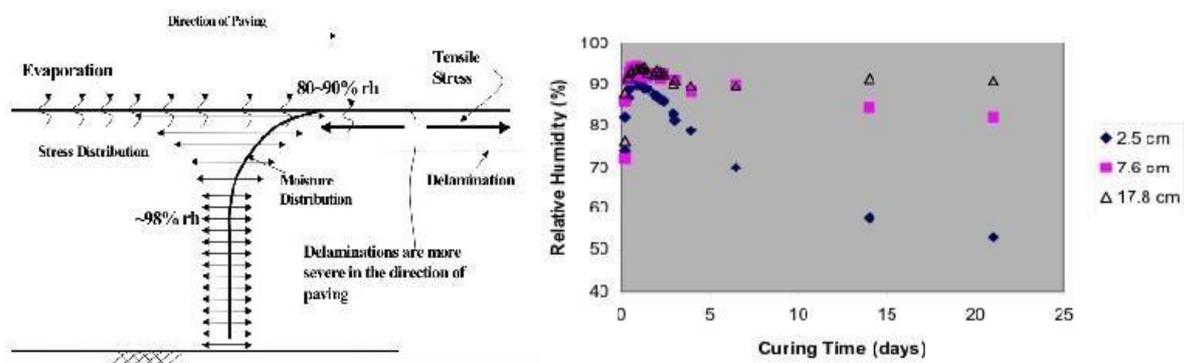
Gambar 9. Ilustrasi skematik pori kapiler

- 1: pori kapiler, 2: phaenograins dengan zona berpori,
- 3: klinker tidak terhidrasi, 4: lapisan hidrasi padat

Kelembaban yang tinggi sepanjang tahun membuat kondisi beton selalu seperti *moisture curing*. *Curing* akan meningkatkan pertumbuhan silika, menentukan morfologi CSH, dan membentuk pengikat yang stabil dalam jumlah besar (Termkajornkit & Nawa, 2006). Peningkatan jumlah pengikat stabil terjadi selaras dengan penetrasi SRH. Proses hidrasi ini akan mengubah tegangan dalam dengan pertumbuhan hidrasi produk, dan tegangan kapiler. Hal ini menimbulkan deformasi. Proses ini terjadi sampai klinker yang tidak terhidrasi tidak ada lagi. Fenomena ini terjadi di daerah cuaca tropis lembab. Pada cuaca yang tidak lembab, mekanisme ini tidak terjadi, sehingga mekanisme penyusutannya berbeda.

### 3.2.3. Kelembaban bagian dalam, ekspansi dan kontraksi

SRH masuk ke beton kemudian terdistribusi dan mengubah kelembaban dalam beton (IH). Gambar 10 menunjukkan dua studi tentang distribusi kelembaban beton bagian dalam (Mukhopadhyay dkk., 2006; Wang & Zollinger, 2000). IH dekat permukaan atas spesimen menurun secara substansial selama 21 hari pengukuran karena tingginya tingkat penguapan yang tertarik terutama pada kedalaman  $\pm 2,5$  cm dari permukaan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10a dan b. Keadaan ini menyebabkan tegangan tarik tinggi yang dapat memicu terjadinya delaminasi (Gambar 10a). Pada kedalaman lebih dari 2,5 cm, penguapan pori mengalami hambatan yang cukup berarti karena melewati beberapa phaenograin.



Gambar 10. Distribusi kelembaban: (a) formasi delaminasi horisontal (Wang & Zollinger, 2000); (b) Distribusi kelembaban dan waktu curing (Mukhopadhyay dkk., 2006)

Waktu curing menentukan distribusi kelembaban dalam beton (Gambar 10b). Dengan asumsi bahan dan metode pengawetan antara penelitian ini dan Mukhopadhyay dkk., 2006 serupa, IH pelat adalah sekitar 80% pada kedalaman 7,5 cm pada 7 hari (Gambar 10b). Dengan SRH tinggi sepanjang tahun, IH dapat diasumsikan selalu  $\pm 80\%$  di tengah pelat. Kondisi ini menyebabkan

jembatan silika sebagai pengikat produk hidrasi, tumbuh optimal (Termkhajornkit & Nawa, 2006). IH tinggi menyebabkan banyak interaksi menarik antara dua lapisan air permukaan. Lebih banyak ketebalan lapisan air, lebih banyak *disjoining pressure* (Derjaguin & Churaev, 1978). Ketebalan film air selalu berubah sesuai dengan IH; oleh karena itu, deformasi juga disebabkan oleh pertumbuhan hidrasi produk dan perubahan *disjoining pressure*.

Kehilangan air karena penguapan (Gambar 10a) dari beton yang mengeras disebut susut pengeringan. Beton yang terpapar pada kondisi lingkungan mengalami susut kering dimana sebagian deformasi tidak dapat berbalik disebabkan oleh kelembaban yang kurang dari 80%. Hal ini menyebabkan tegangan permukaan yang mengakibatkan deformasi. Gaya-gaya tersebut dapat menyebabkan retak rambut menjadi retak yang serius.

Penyusutan pasta semen yang mengeras adalah akibat langsung dari isotherm desorpsinya. Hubungan antara isotherm desorpsi dan kelembaban relatif dalam pasta semen yang menghidrasi terutama dikendalikan oleh distribusi ukuran pori (pori nano ke mikropori). Ada beberapa model hidrasi untuk menggambarkan struktur mikro pasta semen, tetapi isotherm desorpsi dan pengeringan sendiri bukanlah keluaran langsung dari model tersebut karena biasanya diberikan sebagai masukan konstitutif [Mazaheripour, 2021].

#### 3.2.4. Model deformasi

Secara visual model deformasi mirip dengan refleksi pola SRH. Model matematika seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 1 dibuat berdasarkan itu. Model deformasi membutuhkan titik untuk memulai. Titik awal berkorelasi dengan energi aktivasi yang bergantung pada  $w/c$ . Penyusutan awal sebagai manifestasi energi aktivasi dianggap menyusut pada umur 7 hari karena merupakan waktu kontak langsung dengan SRH.

Penyusutan awal diperkirakan sebagai  $SRH_{initial}$  dengan faktor koreksi "f".  $SRH_{initial}$  sama untuk semua posisi. Faktor koreksi "f" ditambahkan sebagai penyesuaian terhadap absorpsi SRH. Faktor koreksi "f" diperoleh dengan *trial* yang memberikan *error* terkecil. Nilai faktor koreksi "f" dari Persamaan 1 untuk sumbu tengah, pendek dan panjang adalah sekitar 0,26 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 tetapi pada posisi sudut nilai "f" adalah 0,975. Artinya energi yang terkait dengan SRH paling besar terletak di sudut. Hal ini menyebabkan CSH tumbuh optimal. Posisi sudut menunjukkan kesalahan terkecil antara Persamaan 1 dan eksperimen (Gambar 8).

Constanta "C" dimasukkan untuk mengakomodasi faktor lain selain SRH. Constanta "C" di sudut juga paling kecil (0,000075); sedangkan pada posisi lain nilai C sekitar 0,0006 (Tabel

1). Tanpa nilai “C”, deformasi beton hanya bergantung pada SRH. Nilai C yang lebih kecil menunjukkan korelasi yang lebih besar antara SRH dan deformasi.

### 3.2.5. Perbedaan antara observasi dan model

IH di setiap tempat berbeda, yang menyebabkan proses hidrasi yang terjadi juga berbeda. Dengan demikian, semakin lebar suatu benda uji maka semakin bervariasi nilai deformasi yang terjadi. Tidak seperti jenis nilai data lainnya, data deformasi ini memiliki hubungan yang erat antara data dan kondisi lokal yang saling mempengaruhi. Karena kondisi SRH yang diambil merupakan nilai rata-rata dalam 1 siklus, maka tidak mencerminkan mekanisme yang terjadi pada setiap posisi. Ini menghasilkan penyimpangan yang cukup besar antara model dan pengamatan. Kelemahan model ini adalah tidak mampu beradaptasi dengan deformasi akibat perbedaan ketinggian fluktuasi.

Kesalahan besar (lebih 50%) dapat terjadi pada usia 15 - 35 hari atau 21 hari setelah pembebanan diterapkan. Perbedaan besar antara model dan pengamatan yang terjadi dalam penelitian ini dinyatakan di atas oleh Li & He, 2018 ketika kelembaban relatif rata-rata diadopsi dalam model analitik. Selisih (error) posisi corner (SG1) serupa pada kisaran 7 – 97 hari pada kisaran 0-50% (Gambar 7). Artinya, posisi sudut memiliki hubungan paling dekat antara deformasi dan SRH. Deformasi pelat di sudut menunjukkan nilai yang paling besar dibandingkan lokasi lainnya. Kesalahan ini ditunjukkan oleh posisi lain pada usia 40-97 hari. Rata-rata kesalahan pada rentang usia 40 – 97 hari adalah  $\pm 26,8\%$ .

Penerapan model pada hasil reset Omar dkk, 2008 menunjukkan bahwa perbedaan model dan data lebih kecil dari spesimen pelat ini (Gambar 7 dan 8). Hal ini dikarenakan benda uji Omar berbentuk silinder sehingga penetrasi SRH tidak mencerminkan perbedaan posisi. Pengamatan kelembaban pada penelitian Omar dkk, 2008, tidak menunjukkan siklus kelembaban relatif setiap harinya.

#### IV. KESIMPULAN

Pada umur 0-18 jam deformasi terbesar pada bagian tengah pelat. Deformasi pada jalan beton terbesar terjadi di bagian sudut sampai akhir pengamatan yaitu 97 hari. Oleh sebab itu bagian sudut perlu mendapat perhatian lebih. Perhatian lebih dapat dilakukan dengan menutup lebih rapat pada saat *curing*. Susut kemudian turun tajam atau beton memuai sampai umur 32 jam. Dari umur 23 – 47 hari, 70-87 hari meningkat dengan laju cukup tinggi.

Kelembaban relatif di Indonesia (cuaca tropis lembab) adalah siklus kering-basah setiap hari. Penetrasi SRH terus menerus sepanjang tahun terjadi di daerah cuaca tropis lembab membuat beton dalam kondisi perawatan sepanjang tahun.

Penetrasi SRH ke dalam spesimen secara terus menerus menyebabkan kelembaban bagian dalam pada spesimen terus berubah dan berbeda pada setiap posisi vertikal dan horizontal.

Kedalaman dan distribusi penetrasi SRH tergantung pada jumlah, posisi, jaringan pori beton dan nilai SRH itu sendiri yang selalu berubah. Perbedaan luas permukaan yang kontak dengan lingkungan menyebabkan perbedaan penetrasi SRH pada setiap posisi, terutama untuk bidang kontak yang besar seperti pelat. Hal ini membuat model deformasi berbasis SRH pada pelat memiliki perbedaan yang besar pada beberapa posisi.

Jika penetrasi SRH menyentuh semen yang tidak terhidrasi, terjadi reaksi hidrasi dan membentuk produk hidrasi. Produk hidrasi ini akan mengubah jaringan pori, tegangan air pori, tekanan lepas dan mengubah penetrasi SRH lebih lanjut.

Deformasi terjadi karena pertumbuhan produk hidrasi, tekanan air pori dan *disjoining pressure*, yang semuanya terkait dengan SRH. Dengan demikian; ada hubungan yang kuat antara SRH dan deformasi. Proses ini berlanjut sampai semen yang tidak terhidrasi habis.

Hubungan tersebut dinyatakan dalam suatu model yang merupakan fungsi linier refleksi dari SRH. Hubungan dalam bentuk refleksi juga ditunjukkan dalam penelitian Zhang dkk, 2012 pada spesimen balok dengan lingkungan yang dikondisikan memiliki siklus kelembaban relatif kering-basah (Gambar 2).

Model ini cocok untuk memprediksi penyusutan terbesar yang terjadi pada sudut pelat dengan selisih antara model dan pengamatan (error)  $\pm 26,8\%$ . Untuk posisi lain, model ini memiliki error  $> 50\%$ . Karena cocok untuk deformasi pelat terbesar, model ini dapat digunakan sebagai acuan dalam merancang deformasi pelat. Model tersebut juga sejalan dengan penelitian Omar dkk, 2008 dengan menggunakan benda uji berbentuk silinder (Gambar 7).

Untuk penelitian selanjutnya, hubungan antara kelembaban lingkungan di daerah non-tropis yang lembab dapat dicari.

## Saran

1. Karena laju susut tertinggi pada rentang 0-18 jam, dan laju muai tertinggi pada umur 18-32 jam, maka segera sesudah pengecoran, pelat beton ditutup; bila dilakukan *grooving* maka pembukaan plastic hanya dilakukan saat *grooving*, sesudah *grooving* segera ditutup kembali.
2. *Curing* yang lebih cermat agar dilakukan untuk bagian sudut jalan beton
3. Karena sampai umur 97 hari masih terjadi peningkatan susut, maka *curing* agar dilakukan selama 7 hari, agar jembatan silica tumbuh optimum sehingga tidak retak oleh gaya *disjoining pressure*, tekanan air pori, pertumbuhan produk hidrasi dan gaya permukaan

## UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Universitas Lampung dan Universitas Indonesia atas dukungan penuh terhadap penelitian ini. Terima kasih tak terhingga kami sampaikan kepada PT Hutama Karya atas kerjasamanya, Dr. Eng. Josia Irwan Rastandi dan Bapak Apri atas dukungannya yang tak terhingga. Terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Indocement Ltd dan Sika Ltd atas dukungan materialnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- ACI (1992). Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI 209R-92, Farmington Hills, USA, 1-47.
- Bažant, Z.P., & Wittman, F.H. (1982). Creep and Shrinkage in Concrete Structures. John Wiley & Sons, Inc., New York, 129 – 161.
- Derjaguin, B.V., & Churaev, N.V. (1978). On the question of determining the concept of disjoining pressure and its role in the equilibrium and flow of thin film. *Journal of Colloid and Interface Science*, 66 (6), 389 – 398.
- Dey, A., Vastrad, A.V., Bado, M.F., Sokolov, A., & Kaklauskas, G. (2021). Long-term concrete shrinkage influence on the performance of reinforced concrete structure. *Material*, 14 (2), 1-16.
- Elzokra, A.A., Al-Houri, A., Habib, A., Habib, M., & Malkawi, A.B. (2020). Shrinkage behavior of conventional and nonconventional concrete: A Review. *Civil Engineering Journal*, 6 (9), 1839-1851.
- Gao, P., Chen, Y., Huang, H., Qian, Z., Schlangen, E., Wei, J., & Yu, Q. (2020). Effect of relative humidity on drying-induced damage in concrete: A comparative study of digital image correlation and lattice modelling. *Materials & Design*, 196.
- Holzer, L., Gasser, P., & Muench, B. (2006). Quantification of capillary pores and Hadley grains in cement paste using FIB-nanotomography: measuring, monitoring and modeling concrete properties. In *2nd International Symposium on Advance in Concrete through Science and Engineering*. Springer, Quebec City, Canada, Sept, 509-516.
- Latief, R.H. (2019). Evaluation of the performance of glassphalt concrete mixtures for binder course. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, 9 (4), 1251-1259.
- Lentzkow, M. (2018). Shrinkage of concrete: minimizing/eliminating the potential for cracking. Tilt-up today-A publication of the Tilt-up concrete association (TCA). [Online].
- Li, L., Zhou, D., & S. Wu. (2019). Comparison of calculation methods of creep coefficients and shrinkage strains based on four specifications. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 242, 1-5.
- Li, P., & He, S. (2018). Effects of variable humidity on the creep behavior of concrete and the long-term deflection of RC beams. *Advances in Civil Engineering*, 2018.
- Maruyama, I., Kishi, N., & Aili, A. (2021). The relative humidity range for the development of irreversible shrinkage in hardened cement paste. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 19 (6), 585-592.
- Mazaheripour, H., Faria, R., Azenha, M., & Ye, G., (2021). Modeling macroscopic shrinkage of hardened cement paste considering C-S-H densification. *Advances in Cement Research*, 33(6), 257-284. <https://doi.org/10.1680/jadcr.19.00141>
- Mohammad, I. (2019). Deformation of concrete. FKA- UTM. 1-70 slides. [Online].
- Mukhopadhyay, A. K., Ye, D., & Zollinger, D.G. (2006). Moisture – related cracking effects on hydrating concrete pavement. Texas Department of Transportation Research and

- Technology Implementation. Texas. *Research Report*, no: FHWA/TX-05/0-1700-6, 172 pages.
- Namita. (2020). Shrinkage cracking in concrete structures - Long-term effects. [Online].
- Niken, C., Elly, T., Supartono, F.X., & Laksmi, I. (2018). Deformation of high-performance concrete plate under humid tropical weather. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 316, 1-9.
- Niu, X-J., Li, Q-B., Liu, W-J., & Hu, Y. (2020). Effects of ambient temperature, relative humidity and wind speed on interlayer properties of dam concrete. *Construction and Building Materials*, 260.
- Omar, W., Makhtar, A.M., Mahir, A., Lai, T.P., Omar, R., & Ng, M.K. (2008). Creep, shrinkage and elastic modulus data of Malaysian concrete. *Project Report*, Faculty of Civil Engineering, Johor, Malaysia, 1-230. [Online]
- Pecker, H. (2020). Diagnosing 6 types of concrete cracks. *Concrete Material*. [Online].
- Szlachetka, O., Witkowska-Dobre, J., Dohojda, M, & Cala, A. (2021). Influence of compressive strength and maturity conditions on shrinkage of ordinary concrete. *Advances in Mechanical Engineering*, 13 (6), 1-11.
- Termkhajornkit, P. & Nawa, T. (2006). A Study of composition of CSH gel in cement paste, recent development of concrete technology and structure. in *Second Asian Concrete Federation Conference*.
- Tran, N. P., Gunasekara, C., Law, D.W., & Houshyar, S. (2021). A critical review on drying shrinkage mitigation strategies in cement-based materials. *Journal of Building Engineering*, 38 (9).
- Wang, L., & Zollinger, D.G. (2000). A mechanistic design framework for spalling distress. *Transportation Research Board*, National Research Council, 1730 (1), 18 – 24.
- Yang, Y., Ma, L., Huang, J., Gu, C., Xu, Z., Liu, J., & Ni, T. (2019). Evaluation of the thermal and shrinkage stresses in restrained high-performance concrete. *Materials*, 12 (22).
- Yu, J., Zhao, J., Jin, T., Zhang, S., & Yang, Y. (2020). Analysis of bearing capacity of the six-sided plate pavement structure considering connection. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1-9.
- Zhang, J., Han, Y., & Sun, W. (2012). Shrinkage and interior humidity under dry-wet cycles. *Drying Technology*, 30 (6), 583-596.



# PABRIK GENTENG IBUKOTA

Jl.Raya Pasar Kemis Rajeg No 88 Ds Sindangsari Pasar Kemis Tangerang  
Banten Indonesia

## SURAT PERJANJIAN PELAKSANAAN PENELITIAN PADA PABRIK GENTENG IBUKOTATAHUN 2021 Nomor : 001/SPPP/IB/PENELITIAN/XII/2021

Pada hari ini Selasa tanggal Dua Puluh Satu bulan Desember tahun Dua Ribu Dua Puluh Satu, kami yang bertandatangan dibawah ini:

- 1 Hendra Widjaja ST : Direktur Pabrik Genteng Ibukota; untuk selanjutnya disebut PIHAK PERTAMA
- 2 .DR.IR.CHATARINA NIKEN MT : Dosen Teknik Struktur pada program studi Teknik Sipil S1 dan S2 di Universitas Lampung untuk selanjutnya disebut PIHAK KEDUA

PIHAK PERTAMA dan PIHAK KEDUA secara bersama-sama bersepakat mengikatkan diri dalam suatu Perjanjian Pelaksanaan Penelitian dengan ketentuan dan syarat-syarat diatur dalam Pasal-Pasal berikut :

### Pasal 1

- (1) PIHAK PERTAMA memberi tugas kepada PIHAK KEDUA, dan PIHAK KEDUA menerima tugas tersebut untuk mengkoordinir dan sebagai penanggungjawab pelaksanaan Penelitian Penyebab kerapuhan genteng produksi PT.Hasil Indonesia Beton yang dilakukan oleh dosen perguruan tinggi di Universitas Lampung .
- (2) PIHAK KEDUA bertanggungjawab penuh atas pelaksanaan, atas pekerjaan/kegiatan sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dan berkewajiban menyimpan semua dokumen pelaksanaan lainnya.

### Pasal 2

- (1) PIHAK PERTAMA memberikan dana untuk kegiatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 1 sebesar Rp.50.000.000 (Lima Puluh Tiga Juta Rupiah)
- (2) Dana pelaksanaan Penelitian sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dibayarkan oleh PIHAK PERTAMA kepada PIHAK KEDUA secara bertahap dengan ketentuan sebagai berikut:
  - a. Pembayaran Tahap Pertama sebesar 50% dari total dana kegiatan yaitu 50% X Rp. 50.000.000,00 (Lima Puluh Tiga Juta Rupiah) = Rp. 25.000.000,00 (Dua Puluh Lima Juta Rupiah)
  - b. Pembayaran Tahap Kedua/Terakhir sebesar 50% dari total dana kegiatan yaitu 50% X Rp. 50.000.000,00 (Lima Puluh Tiga Juta Rupiah) = 25.000.000,00 (Dua Puluh Lima Juta Rupiah), dibayarkan setelah PIHAK KEDUA selesai.:
    1. Surat Pernyataan Laporan Kemajuan Pelaksanaan Penelitian;
    2. Rekapitulasi Laporan Penggunaan Keuangan 50% yang telah dilaksanakan;
    3. Berita Acara Serah Terima Laporan Kemajuan Pelaksanaan;
    4. Berita Acara Serah Terima Laporan Penggunaan Keuangan 50%.

- (3) **PIHAK KEDUA** bertanggungjawab mutlak dalam pembelanjaan dana tersebut pada ayat (1) sesuai dengan proposal kegiatan yang telah disetujui dan berkewajiban untuk menyimpan semua bukti-bukti pengeluaran sesuai dengan jumlah dana yang diberikan oleh **PIHAK PERTAMA**.
- (4) **PIHAK KEDUA** berkewajiban untuk menyimpan Laporan pelaksanaan Penelitian dan laporan pertanggungjawaban keuangan kegiatan beserta rekapitulasi.

### Pasal 3

- (1) Hak Kekayaan Intelektual yang dihasilkan dari pelaksanaan Penelitian tersebut diatur dan dikelola sesuai dengan peraturan dan perundang-undangan yang berlaku.

### Pasal 4

- (1) Apabila terjadi perselisihan antara **PIHAK PERTAMA** dan **PIHAK KEDUA** dalam pelaksanaan perjanjian ini akan dilakukan penyelesaian secara musyawarah dan mufakat ..
- (2) Hal-hal yang belum diatur dalam perjanjian ini akan diatur kemudian oleh kedua belah pihak.

### Pasal 5

Surat Perjanjian Pelaksanaan Penugasan Penelitian Tahun 2021 ini dibuat rangkap 2 (dua) bermaterai cukup sesuai dengan ketentuan yang berlaku, dan biaya materai dibebankan kepada **PIHAK KEDUA**.

#### PIHAK PERTAMA



**Hendra Widjaja ST**  
Direktur

#### PIHAK KEDUA

Ttd

**DR.IR.CHATARINA NIKEN MT**  
Peneliti



## PABRIK GENTENG IBUKOTA

Jl.Raya Pasar Kemis Rajeg No 88 Ds Sindangsari Pasar Kemis Tangerang Banten  
Indonesia

### SURAT PERNYATAAN

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Hendra Widjaja,ST  
Jabatan : Direktur PT.Hasil Beton Indonesia  
Alamat : Jl.Raya Pasar Kemis No 88 Rajeg Ds Sindangsari Pasar Kemis  
Tangerang Banten Indonesia

Dengan ini menyatakan bahwa setelah melalui beberapa tahap seleksi dari manajemen dan sesuai pengalaman sebagai Dosen Teknik Struktur pada program Studi Teknik Sipil S1 , S2 di Universitas Lampung dan Pengalaman sebagai peneliti di bidang beton dari tahun 1983 , maka kami menunjuk DR. IR. Chatarina Niken MT selaku penerima tugas untuk mengkoordinir dan sebagai penanggung jawab pelaksanaan penelitian Penyebab Kerapuhan Genteng Produksi PT.Hasil Beton Indonesia

Demikian Pernyataan ini dibuat dengan sesungguhnya dan dengan sebenar-benarnya.

Tangerang, 20 Desember 2021



Hendra Widjaja,ST  
Direktur

**LAPORAN PENELITIAN  
KERJASAMA DENGAN  
PABRIK GENTENG IBUKOTA**



**JUDUL PENELITIAN :**

**PENYEBAB KERAPUHAN GENTENG IBUKOTA**

Disusun oleh:

**Dr. Ir. Chatarina Niken, M.T. NIDN 0013065811**

**JURUSAN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
2021**

HALAMAN PENGESAHAN  
PENELITIAN UNIVERSITAS LAMPUNG

Judul Laporan: Penelitian Penyebab Kerapuhan Genteng Beton

Jenis Kegiatan :  Penelitian  Pengabdian

Tim Peneliti:

No	Nama Lengkap	NIDN	Jabatan Fungsional	Jurusan	No HP
1	Dr. Ir. Chatarina Niken DWSBU, MT	0013065811	Dosen	Teknik Sipil	081329055304

Lokasi Penelitian : Fakultas Teknik Universitas Lampung & Universitas Indonesia  
Lama Penelitian : 21 Juni 2021 – 21 Desember 2021  
Biaya Penelitian : Rp 50.000.000,00  
Sumber Dana : Pabrik Genteng Ibukota  
Luaran wajib : Laporan Akhir

Bandar Lampung, 21 Desember 2021

Mengetahui  
Ketua Jurusan Teknik Sipil FT Unila

Ir. Laksmi Irianti, M.T.  
NIP: 196204081989032001

Ketua Peneliti

Dr. Ir. Chatarina Niken, M.T.  
NIP: 195806131984032003

Mengetahui  
Ketua IPD FT Unila



(Dr. Ir. Justitia Afrioni, DEA)  
NIP: 196305191992032008

Menyetujui  
Dekan Fakultas Teknik Unila



(Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.)  
NIP: 1975092820011210021

## DAFTAR ISI

	Hal
Halaman Judul	
Halaman Pengesahan	
Halaman Identitas dan Uraian Umum	
Daftar Isi	i
Daftar Gambar	ii
Daftar Tabel	iii
Ringkasan	1
I. Pendahuluan	1
II. Material dan Metode	4
2.1. Material	4
2.1.1. Material genteng	4
2.1.2. Material bahan baku	5
2.2. Metode	6
III. Hasil Penelitian	6
3.1. Hasil Perhitungan $C_3S$ , $C_2S$ , $C_3A$ dan $C_4AF$	6
3.2. Elemen yang terkandung, energi atom dan viskositas dinamik	7
3.3. <i>Scanning Electron Mycroscopy</i> (SEM)	8
3.4. Penggabungan hasil EDX dan SEM	11
3.5. Hasil EDX material baku penyusun genteng	12
IV. Diskusi	12
4.1. Bertambah dan berkurangnya elemen	12
4.1.1. Sulfur (S)	12
4.1.2. Strontium (Sr)	12
4.1.3. Clorin (Cl)	13
4.1.4. Mangan (Mn)	13
4.1.5. Titanium (Ti)	13
4.2. Semen	13
V. Kesimpulan	14
Daftar Pustaka	

## DAFTAR GAMBAR

	Hal	
Gambar 1	Kerusakan genteng di Perumahan	3
Gambar 2	Genteng yang diuji terbungkus plastik	4
Gambar 3	Genteng yang diuji	5
Gambar 4	Meterial baku genteng Ibukota	6
Gambar 5.1	SEM genteng produksi 2016	8
Gambar 5.2	SEM Genteng stok terpapar produksi 2019	9
Gambar 5.3	SEM Genteng terpapar flat Garuda 2018	9
Gambar 5.4	SEM genteng stok terlindung dari proyek produksi 2020	9
Gambar 5.5	SEM genteng terpapar produksi 2019	10
Gambar 5.6	SEM genteng terpapar produksi 2021	10
Gambar 5.7	SEM stok terlindung permukaan rusak produksi 2019	10

## DAFTAR TABEL

Tabel 1	Material baku penyusun genteng beton	5
Tabel 2	C <sub>3</sub> S, C <sub>2</sub> S, C <sub>3</sub> A dan C <sub>4</sub> AF genteng produksi 2016 dan genteng yang rusak	7
Tabel 3	Perbandingan elemen, energi atom dan viskositas dinamis antara genteng terpapar produksi 2016 dan genteng yang rusak	8
Tabel 4	Perbedaan elemen yang terkandung pada genteng produksi 2016, genteng yang rusak, penampakan SEM dan C <sub>3</sub> S/C <sub>2</sub> S	11
Tabel 5	Elemen, energi ion dan viskositas dinamis	12

# LAPORAN PENELITIAN

## PENYEBAB KERAPUHAN GENTENG BETON

Dr. Chatarina Niken

### RINGKASAN

Suatu perusahaan genteng memproduksi genteng sejak 1976. Namun pada tahun Kerapuhan genteng terjadi pada produksi sesudah tahun 2016 padahal memakai bahan, menggunakan cara dan peralatan yang sama dengan produksi 2016. Komplain terjadi karena genteng terpasang menjadi tidak rata dan rapuh setelah dipasang 8 bulan. Penelitian dilakukan pada genteng terpasang produksi 2016, dan genteng produksi sesudahnya. Genteng produksi tahun 2016 menjadi acuan karena kualitasnya masih baik sampai saat pengujian dan tidak ada keluhan. Sampel diuji dengan Energy Dispersive X-ray Fluoresensi (EDX) dari Laboratorium Fisika Universitas Indonesia dan *scanning electron microscopy* (SEM) dari Laboratorium Terpadu Universitas Lampung. Jumlah sampel untuk pengujian EDX guna memperoleh konsentrasi setiap elemen adalah 2 buah, dan untuk mencari viskositas dinamis setiap elemen dan energi ion sebanyak 1 buah. Jumlah sampel untuk pengujian SEM adalah 1 buah setiap jenis genteng dengan magnitudo 500, dan 5.00 K. Hal itu dilakukan agar struktur mikro dapat dilihat secara menyeluruh. Dari data konsentrasi 2 buah sampel setiap elemen dilakukan perhitungan  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  dan  $C_4AF$  sesuai SNI 15-2049-2004. Hasil penelitian menunjukkan bahwa  $C_3S/C_2S$  kedua sampel sama. Pada genteng yang rapuh terdapat atom Sr, Cl selain itu juga terdapat sampel yang tidak mengandung S dan Mn. Keberadaan Sr dapat berasal dari material yang digunakan, dan penggunaan semen PCC. Perlu ada peninjauan peraturan SNI 0096-2007 tentang unsur yang berbahaya pada genteng serta pada bagian uji lentur dimana mensyaratkan kelembaban 40%, sedangkan kelembaban di Indonesia rata-rata  $\pm 72\%$ .

Kata kunci: beton, EDX, genteng, rapuh, SEM,

### 1. Pendahuluan

Indonesia memiliki jumlah penduduk lebih dari 270.2 juta jiwa [Badan Statistik, 2020], sehingga perlu rumah dengan jumlah yang memadai. Genteng beton menjadi salah satu pilihan penutup atap rumah dewasa ini karena umur layanannya bisa mencapai 20 tahun. Genteng beton dipakai oleh sebagian besar perumahan, baik perumahan yang dikelola swasta maupun pemerintah di seluruh Indonesia. Genteng beton adalah bahan bangunan berbasis semen dengan ketebalan  $\pm 1.5$  cm. Sepanjang umur layannya genteng menerima perubahan cuaca secara langsung. Indonesia beriklim tropis lembab, dengan kelembaban rata-rata 72% dengan kelembaban terendah 50% terjadi dalam beberapa hari dalam tiga bulan, dan suhu antara  $26^\circ\text{C}$  –  $34^\circ\text{C}$  terjadi sepanjang tahun [Niken dkk, 2013]. Banyak elemen bangunan yang mengalami degradasi karena kelembaban, seperti plesteran, beton, pasangan bata, dan lantai.

Beberapa peneliti telah memberikan perhatiannya pada genteng beton dan campuran berdasar semen. Pembuatan genteng beton dengan bahan tambah serat serabut kelapa dan styrofoam sudah diteliti [Lubis dan Hermanto, 2020]. Penyelidikan pemekaran dilakukan pada genteng semen dan agregat dengan lumpur limbah marmer [Allam dkk, 2020]. Penggunaan 5% penggantian abu sekam padi dan 25% penggantian terak tembaga yang dilakukan untuk genteng diperoleh hasil terbaik dan paling nyaman dari uji daya serap air, kuat tekan dan lentur [Rajalakshmi dkk, 2020], sedangkan penambahan dengan abu sekam padi 10% menunjukkan hasil yang lebih baik daripada OPC pada umur 28 hari [Olufemi dkk, 2016]. Tidak banyak perbedaan modulus elastisitas (MOE) antara persentase komposisi abu tongkol jagung (CCA) dan serat kenaf (KF) dalam semen untuk genteng, tetapi perbedaan terlihat jelas dalam modulus pecah (MOR) dan tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap nilai modulus

elastisitas [Obakin, 2020]. Genteng beton memiliki berat sendiri yang cukup besar. Uji coba untuk mengatasi masalah ini dan masalah kebutuhan semen dalam jumlah yang besar telah dilakukan menggunakan beton geopolimer dan agregat kasar ringan buatan [Nasser dkk, 2020]. Genteng beton berbusa juga telah dipelajari [Shyamala dkk, 2019]. Genteng dengan styrofoam inovasi karya mahasiswa Undip raih medali emas di Nurenberg [Internet 1, 2018]. Pembuatan genteng beton berkonsep material ramah lingkungan menggunakan abu sekam padi dan limbah polyethylene telah dilakukan [Nugroho dkk, 2017].

Peraturan Genteng beton SNI 0096, 2007 mensyaratkan penyerapan air maximum 10%, tidak boleh ada air yang menetes dalam waktu 20 jam $\pm$ 5 menit. Selain itu pengujian lain yang disyaratkan meliputi sifat tampak, ukuran, kerataan, uji beban lentur dengan kondisi benda uji sebanyak 10 buah dalam ruangan bersuhu antara 15°C–30°C dan kelembaban relatif minimum 40 %. Kondisi kelembaban 40% pada pengujian beban lentur tidak sesuai dengan alam Indonesia.

Kerusakan yang meluas pada atap genteng selama beberapa tahun terakhir dinyatakan oleh Huang dkk, 2009. Bahkan untuk badai yang lebih lemah sekalipun, genteng mengalami kerusakan. Hal ini telah menimbulkan kekhawatiran mengenai praktik dan kode konstruksi [Huang dkk, 2009]. Kerusakan genteng beton yang meluas juga terjadi di Indonesia.

Salah satu perusahaan genteng di Indonesia, pada tahun 2015 memproduksi sekitar 4.200.000 buah yang memenuhi 10.000 buah rumah rakyat. Perusahaan ini memproduksi genteng beton sejak tahun 1976 dengan memakai semen dari salah satu pabrik sampai tahun Agustus 2020, dan memakai material yang sama. Meskipun sumber material dan cara pengerjaan tidak berubah, namun terjadi complain karena kerusakan seperti Gambar 1. Kerusakan terjadi setelah genteng dipasang selama 8 bulan. Kerusakan genteng tersebut terjadi pada produksi mulai Maret /April 2018.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Gambar 1. Kerusakan Genteng di Perumahan: (a) Panorama Indah, (b) Duta Pakis Residence, (c) Bukit Cilegon Asri, (d) Hidayah Asri Parung Panjang, (e) Arya Green Bogor, (f) Griya Samiaji Ciseeng, (g) Hutagian Serang, (h) Rajeg City Mansion

Karena kerusakan tersebut pihak pengembang tidak bersedia membayar dengan alasan kualitas yang tidak bagus [Internet 2]. Dampak kerusakan genteng terjadi pada 23 perusahaan, 13 pribadi, dan 50 lebih proyek. Kerugian moral dan materiil yang tidak sedikit dialami oleh Produsen karena hal ini.

Penyebab kehancuran beton, telah diteliti oleh pihak semen ybs namun tidak ditemukan hal-hal yang menyebabkan kehancuran tersebut. Uji kuat tekan pada kombinasi material yang dipakai terjadi penurunan kuat tekan pada umur 90 hari. Karena genteng beton dipakai di hampir semua perumahan, maka apabila penyebab kehancuran tidak diketahui dapat berakibat pada industri genteng beton secara Nasional. Kerugian moral dan material harus ditanggung oleh Produsen.

## 2. Material dan Metode

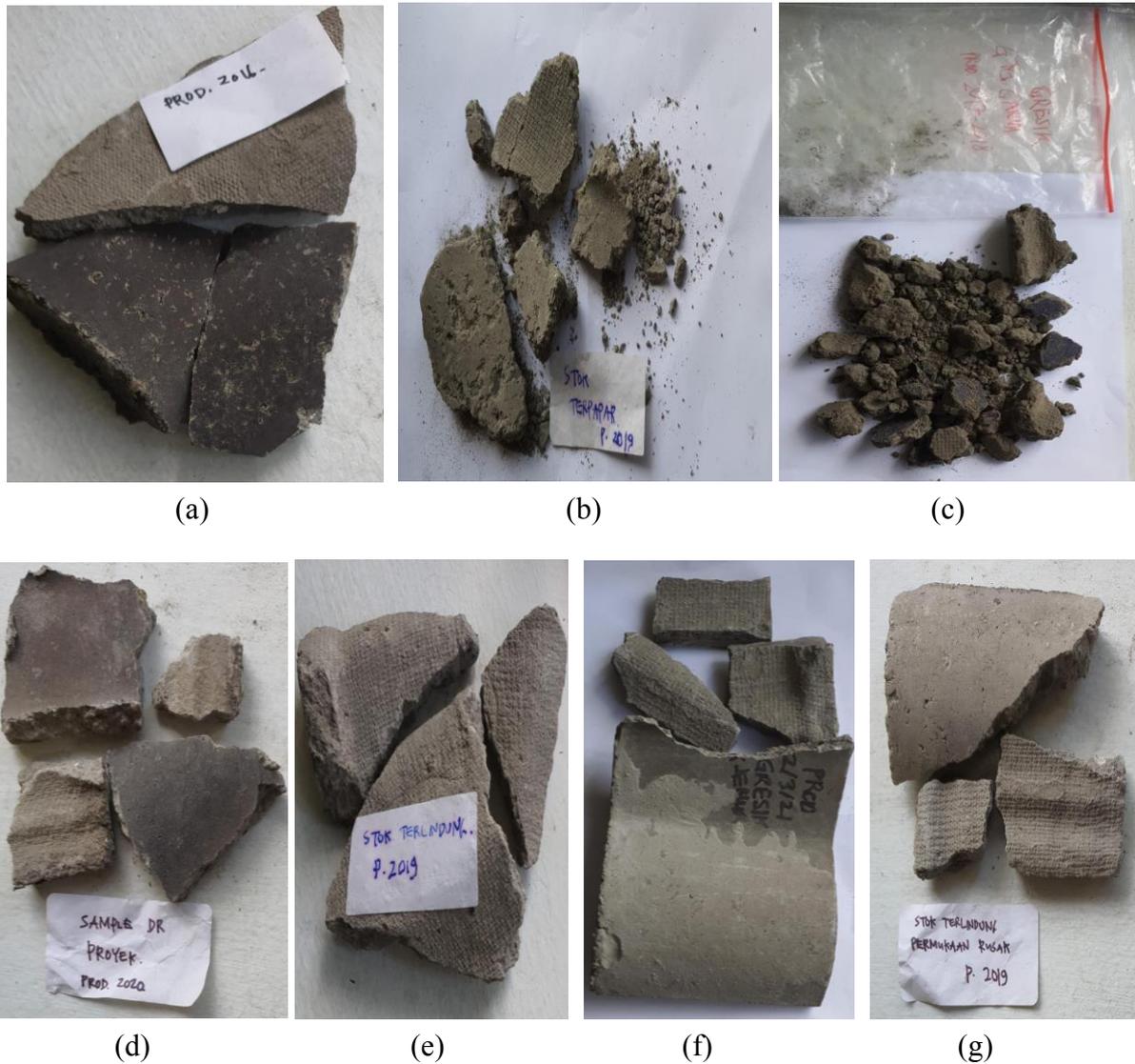
### 2.1. Material

#### 2.1.1. Genteng

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah genteng dari satu buah pabrik yang terdiri atas: genteng produksi tahun 2016 yang terpasang di sebuah rumah, dan genteng produksi sesudah 2016 yaitu: jemur (terpapar), terpapar (*flat*), stok terlindung permukaan rusak, stok terlindung, sampel proyek, stok terpapar, dan semen Gresik tahun 2021 (Gambar 2).



Gambar 2. Genteng yang diuji: (a) Sampel yang masuk Laboratorium Fisika UI, (b) Sampel produksi 2016, (c) Sampel 1: terpapar 2019, (d) Sampel 2 Garuda produksi 2019/2018, (e) Sampel 3: terpapar dari proyek 2020, (f) Sampel 4: Terlindung proyek 2019, (g) Sampel 5: Terpapar Jemur produksi 2021, (h) Sampel 6: stok terlindung permukaan rusak produksi 2019



Gambar 3. Genteng yang diuji : (a) Sampel produksi 2016, (b) Sampel 1: terpapar 2019, (c) Sampel 2: Garuda produksi 2019/2018, (d) Sampel 3: terpapar dari proyek 2020, (e) Sampel 4: Terlindung proyek 2019, (f) Sampel 5: terpapar jamur produksi 2021, (g) Sampel 6: stok terlindung permukaan rusak produksi 2019

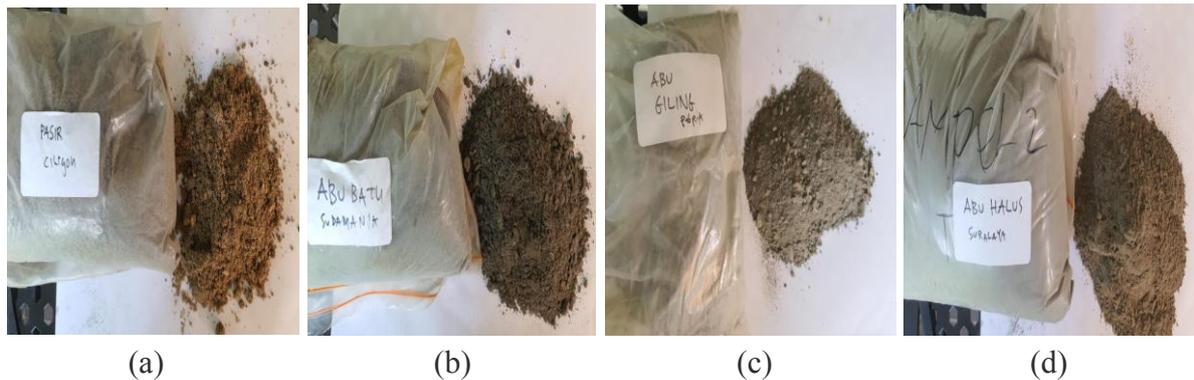
### 2.1.2. Material baku

Material baku genteng beton disajikan pada Tabel 1. Perbandingan berat air terhadap berat semen 1.328. Bahan baku penyusun genteng dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Material baku penyusun genteng beton

Material	kg
Semen	40
Pasir Cilegon	71.3
Abu batu Sudamanik	13
Bottom ash/abu giling pabrik	7.3
Air	53.12

Wujud bahan baku disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Material baku genteng Ibukota: (a) Pasir Cilegon, (b) Abu batu Sudamanik, (c) abu giling pabrik, (d) Abu halus Suralaya

## 2.2. Metode

Genteng produksi tahun 2016 menjadi acuan karena kualitasnya masih baik sampai saat pengujian dan tidak ada keluhan. Sampel diuji dengan Energy Dispersive X-ray Fluoresensi (EDX) dari Laboratorium Fisika Universitas Indonesia dan *scanning electron microscopy* (SEM) dari Laboratorium Terpadu Universitas Lampung. Jumlah sampel untuk pengujian EDX guna memperoleh konsentrasi setiap elemen adalah 2 buah, dan untuk mencari viskositas dinamis setiap elemen dan energi ion sebanyak 1 buah. Jumlah sampel untuk pengujian SEM adalah 1 buah setiap jenis genteng dengan magnitude 500, dan 5.00 K. Hal itu dilakukan agar struktur mikro dapat dilihat secara menyeluruh. Dari data konsentrasi 2 buah sampel setiap elemen dilakukan perhitungan  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  dan  $C_4AF$  sesuai SNI 15-2049-2004. Hasil perhitungan kedua sampel pada setiap elemen dibandingkan, dan dianalisis. Dari data EDX dilihat keberadaan elemen yang berbeda dengan elemen yang terkandung pada genteng produksi 2016. Dari studi literatur, sifat elemen yang berbeda dipelajari. Hubungan elemen dan viskositas dinamis, dari genteng yang rusak dan genteng produksi 2016 dibandingkan. Hasil analisis dihubungkan dengan SEM dari kedua magnitude.

## 3. Hasil Penelitian

Hasil penelitian terbagi atas beberapa bagian, sebagai berikut:

### 3.1. Hasil Perhitungan $C_3S$ , $C_2S$ , $C_3A$ dan $C_4AF$

Hasil perhitungan  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  dan  $C_4AF$  dari genteng 2016 dan genteng yang rusak disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A dan C<sub>4</sub>AF dari genteng produksi 2016 dan genteng yang rusak

Element	Konsentrasi, %													
	ProD 2016-a	ProD 2016-b	Stok Terpapar 2019	Stok Terpapar 2019	Gresik Flat 1, 2018 Garuda	Gresik Flat 2, 2018 Garuda	Terpapar Proyek 1 2020	Terpapar Proyek 2 2020	Terlindung Proyek 1 2019	Terlindung Proyek 2 2019	Terpapar Jemur 1 2021	Terpapar Jemur 2 2021	Stok Terlind Permk rusak 2019	Stok Terlind Permk rusak 2019
			Sampel 1a	Sampel 1b	Sampel 2a	Sampel 2b	Sampel 3a	Sampel 3b	Sampel 4a	Sampel 4b	Sampel 5a	Sampel 5b	Sampel 6a	Sampel 6b
Al	5.74	1.85	5.66	2.04	3.87	0.97	6.34	2.34	4.96	1.86	5.54	2.2	5.69	2.13
Si	21.02	6.78	20.96	7.55	14.23	3.55	21.12	7.81	19.8	7.44	18.46	7.31	20.45	7.64
S	0.72	0.23							0.81	0.3	0.51	0.2	0.72	0.27
Cl					0.5	0.13	0.39	0.14			0.38	0.15		
K	2.96	0.96	1.88	0.68	1.31	0.33	2.2	0.82	1.91	0.72	2.11	0.83	2.44	0.91
Ca	48.73	15.73	43.42	15.65	51.11	12.77	42.75	15.81	51.15	19.21	50.55	20.02	45.09	16.84
Ti	1.55	0.5	1.78	0.64	1.69	0.42	1.71	0.63	1.45	0.54	1.62	0.64	1.61	0.6
V													0.04	0.02
Cr													0.01	0.01
Mn	0.48	0.16	0.49	0.18		0.12	0.44	0.16	0.39	0.15			0.51	0.19
Fe	18.26	5.89	24.99	9.01	0.48	6.43	23.73	8.77	18.45	6.93	19.7	7.8	22.24	8.3
Sr					25.72		0.46	0.17	0.31	0.12	0.44	0.18	0.44	0.17
Ag	0.54	0.17	0.82	0.3	1.09	0.27	0.86	0.32	0.8	0.3	0.7	0.28	0.75	0.28
Al2O3	8.06	3.13	7.91	3.37	5.61	1.61	8.87	3.89	7.02	3.14	7.89	3.7	7.98	3.54
SiO2	32.28	12.54	32.19	13.73	22.92	6.57	32.38	14.19	30.76	13.78	28.85	13.52	31.45	13.95
SO3	1.2	0.47			0.36				1.37	0.62	0.87	0.41	1.21	0.54
Cl					1.08	0.1	0.26	0.11			0.26	0.12		
K2O	2.26	0.88	1.45	0.62	46.1	0.31	1.69	0.74	1.48	0.66	1.64	0.77	1.88	0.83
CaO	40.55	15.75	36.9	15.74	1.68	13.21	36.12	15.83	43.14	19.33	43.12	20.21	38.03	16.87
TiO2	1.4	0.55	1.66	0.71	0.36	0.48	1.58	0.69	1.33	0.59	1.51	0.71	1.48	0.66
V2O5													0.04	0.02
Cr2O3													0.01	0.01
MnO	0.33	0.13	0.34	0.15		0.1	0.31	0.14	0.27	0.12			0.35	0.16
Fe2O3	13.62	5.29	19.09	8.14	21.23	6.08	18.05	7.91	14.01	6.28	15.19	7.12	16.88	7.49
SrO							0.28	0.12	0.19	0.08	0.27	0.13	0.27	0.12
Ag2O		0.11	0.45	0.19	0.66	0.19	0.47	0.21	0.44	0.2	0.39	0.18	0.42	0.18
C3S	157.30	61.12	174.86	74.55	236.43	15.66	184.44	80.84	129.25	57.88	120.93	56.68	165.40	73.37
C2S	26.12	10.16	39.63	16.88	112.65	7.02	46.31	20.31	9.32	4.16	8.51	4.00	34.61	15.36
C4AF	41.45	16.10	58.09	24.77	64.60	18.50	54.93	24.07	42.63	19.11	46.22	21.67	51.37	22.79
C3A	-1.69	-0.66	-11.34	-4.84	-21.05	-6.02	-7.04	-3.08	-5.10	-2.30	-4.79	-2.24	-7.41	-3.29
C3S/C2S	6.02	6.02	4.41	4.42	2.10	2.23	3.98	3.98	13.87	13.93	14.20	14.17	4.78	4.78
C3A/C2S	-0.06456	-0.06461	-0.2861356	-0.2869244	-0.186906	-0.8578051	-0.1519105	-0.1514418	-0.5473563	-0.5545015	-0.5629557	-0.560366	-0.214216076	-0.214338642
C4AF/C2S	1.59	1.59	1.47	1.47	0.57	2.64	1.19	1.19	4.57	4.60	5.43	5.42	1.48	1.48

Dari 2 sampel pada setiap jenis genteng diperoleh nilai C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A dan C<sub>4</sub>AF yang berbeda, namun menghasilkan rasio C<sub>3</sub>S/C<sub>2</sub>S yang sama.

### 3.2. Elemen yang terkandung, energi atom dan viskositas dinamik

Perbandingan elemen dan viskositas dinamis antara genteng terpapar produksi 2016 dan genteng yang rusak disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan elemen, energi atom dan viskositas dinamis antara genteng terpapar produksi 2016 dan genteng yang rusak

Atom, Energi Atom keV	Dynamic viscosity, keV							
	Exposed	Exposed stock	Exposed	Unprotected	Protected	Exposed	Protected stock	Gresik Cement Nov-21
	2016	2019	Flat 2018	Proyek 2020	2019	2021	surface damage 2019	
	1	2	3	4	5	6		
Al KA, 1.5	60	70	30	60	60	50	55	20
Si KA, 1.75	580	550	350	580	400	500	580	180
Sr LA, 1.75				150	200	500	150	
Sr LB, 1.9				40	50	50	40	
S KA, 2.3	100				130	90	100	150
Cl KA, 2.7			160	110		50		
Ag LA, 2.9	800	800	1000	800	900	760	800	600
Ag LB1, 3.1	500	400	600	550	400	400	400	280
Ag LB2, 3.3	450	280	220	300	300	300	300	180
K KA, 3.3	390	280	450	300	300	300	300	180
K KB, 3.3	600	550	450	300	600	300	600	900
Ca KA, 3.7	4450	4200	4000	4050	4750	4700	4200	7000
Ca KB, 4	660	610	600	620	700	700	650	1000
Ti KA, 4.5	140	160	130	160	120	120	130	20
Ti KB, 4.95	40	40	50	40	20	40	30	10
U KA, 4.95							20	
U KB, 5.45							20	
Cr KA, 5.45							20	
Cr KB, 5.9							70	
Mn KA, 5.9	80	80	80	40	60		70	
Mn KB, 6.5	400	450	400	500	400		400	
Fe KA, 6.4	1000	620	1150	1300	980	1100	1200	220
Fe KB, 7.1	200	220	200	240	200	200	200	30

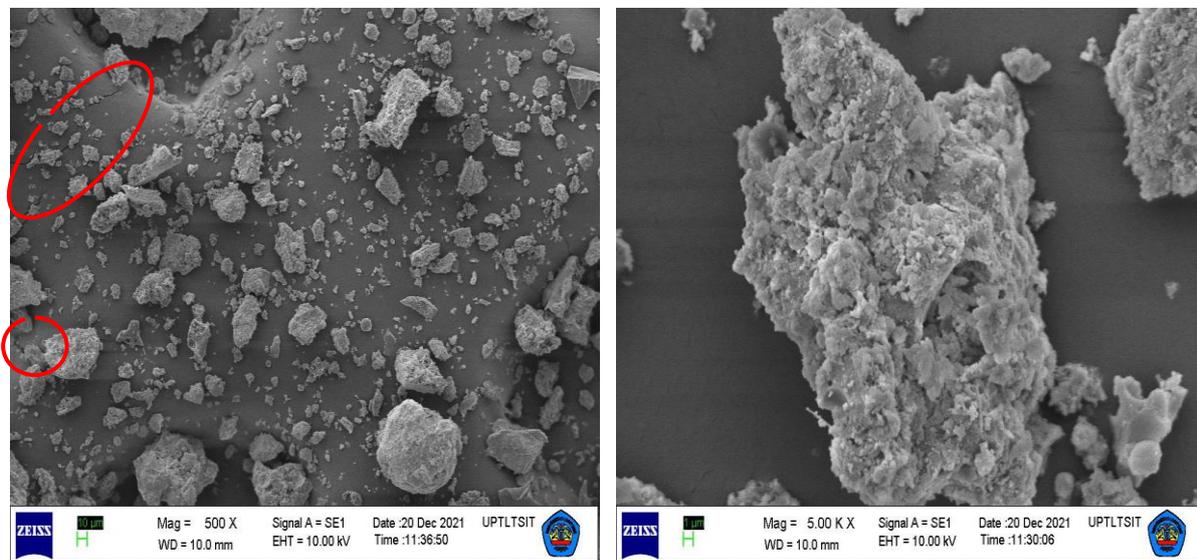
Tulisan merah: elemen yang tidak terkandung pada genteng produksi 2016

Blok merah : elemen yang hilang pada genteng yang rusak

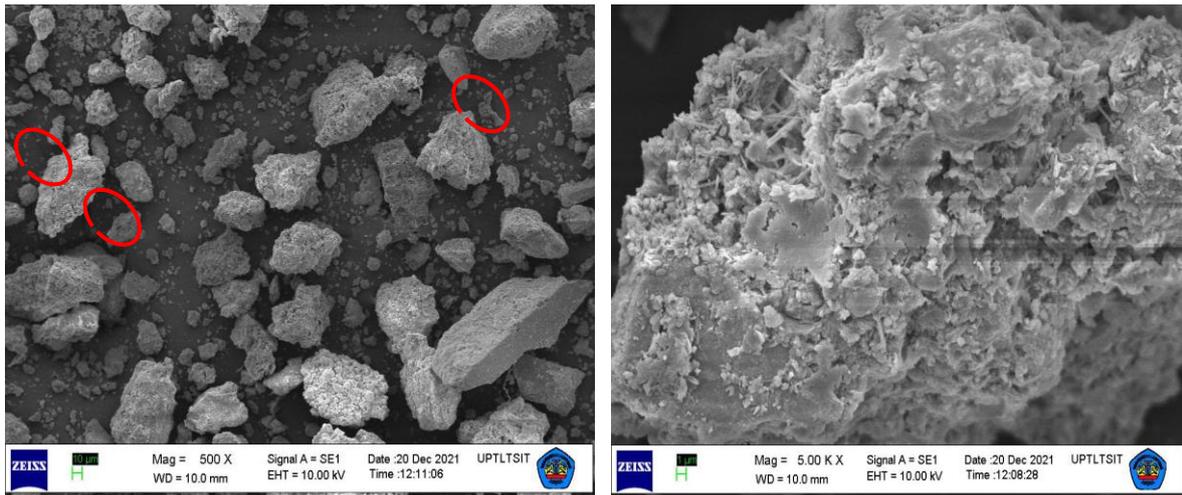
Bila dibandingkan dengan semen Gresik, maka pada semen Gresik tidak terdapat kandungan Mn sedangkan pada genteng produksi 2016 mengandung Mn.

### 3.3. Scanning Electron Microscopy

Perbedaan SEM magnitudo 500 dan 5.00 K disajikan pada Gambar 5.

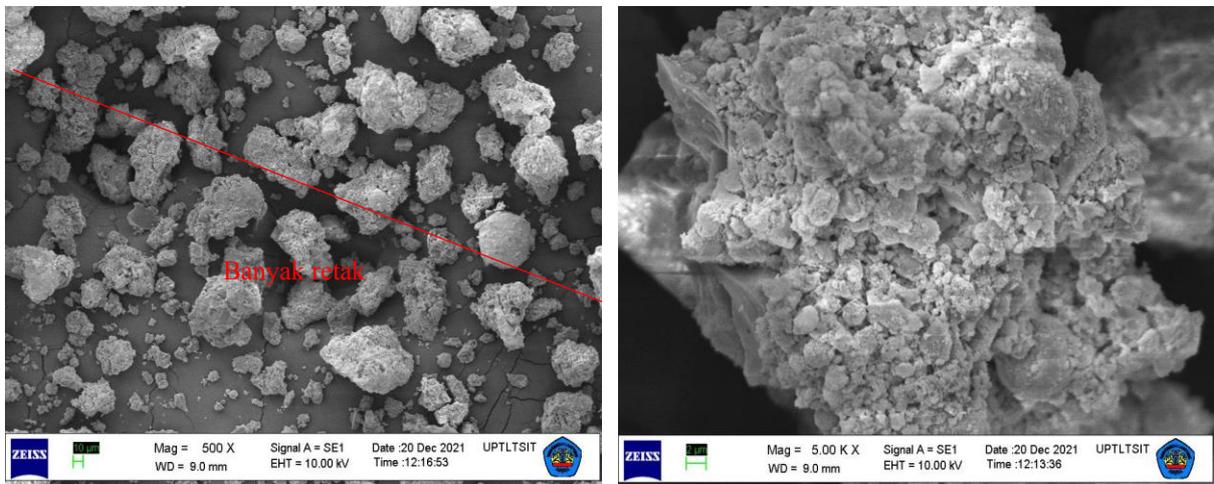


Gambar 5.1. SEM genteng produksi 2016



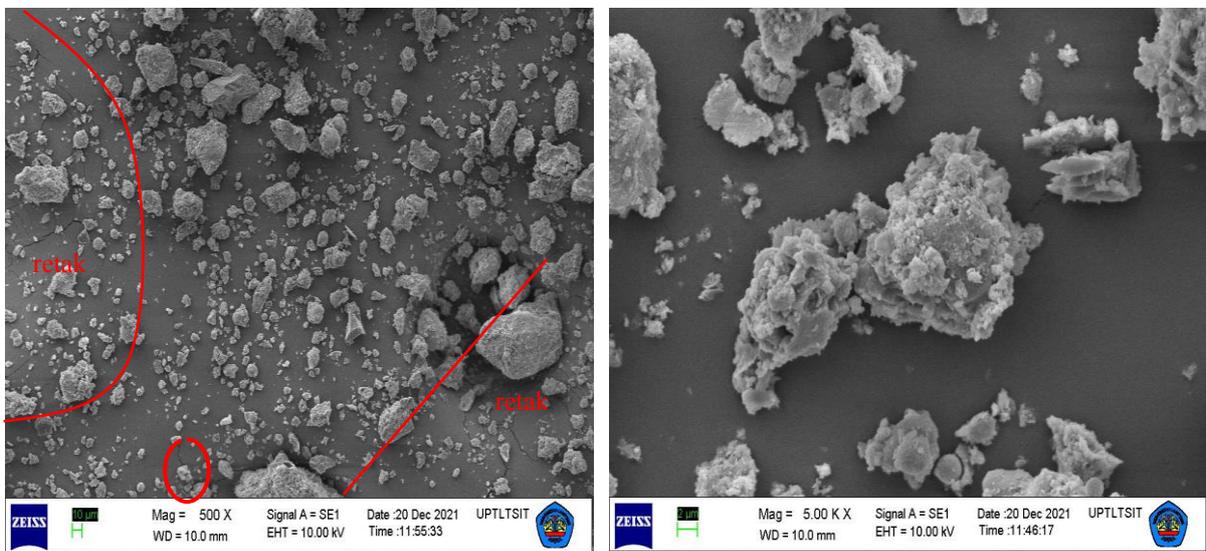
Sampel 1: Terpapar 2019: S tidak ada

Gambar 5.2. SEM Genteng stok terpapar produksi 2019



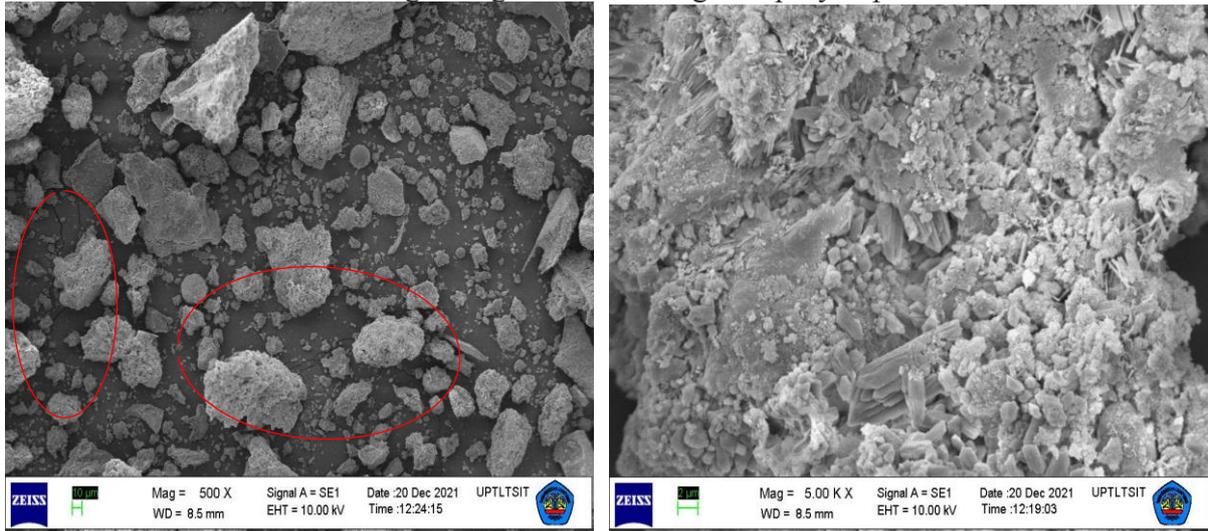
Sampel 2: Terpapar Flat: S tidak ada dan muncul Cl

Gambar 5.3. SEM Genteng terpapar flat Garuda 2018



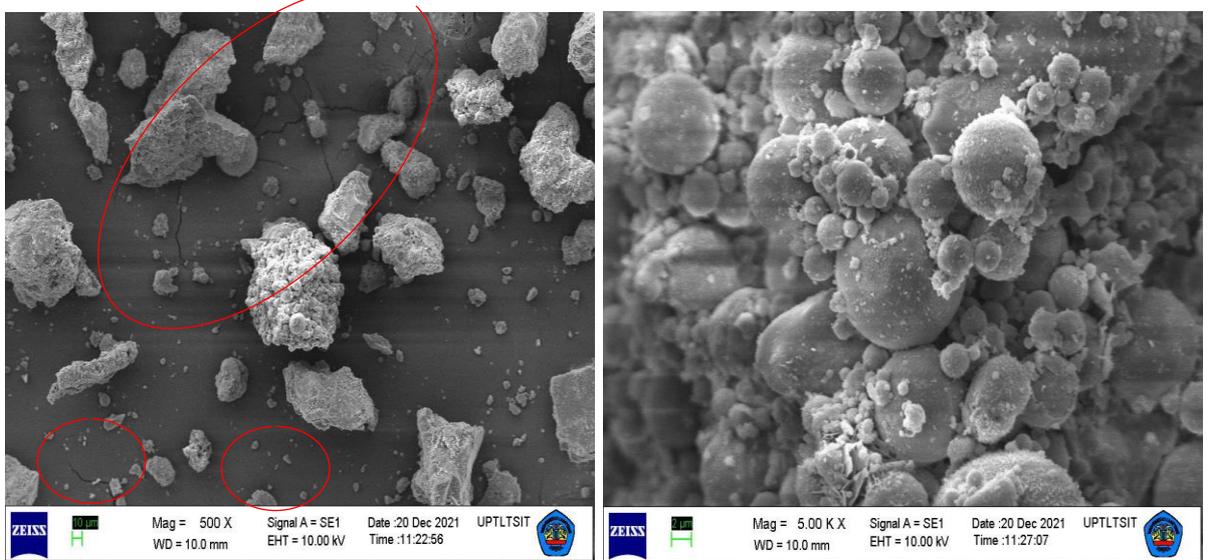
Sampel 3: Stok terlindung 2019: Tidak ada S, muncul Cl dan Sr

Gambar 5.4. SEM genteng stok terlindung dari proyek produksi 2020



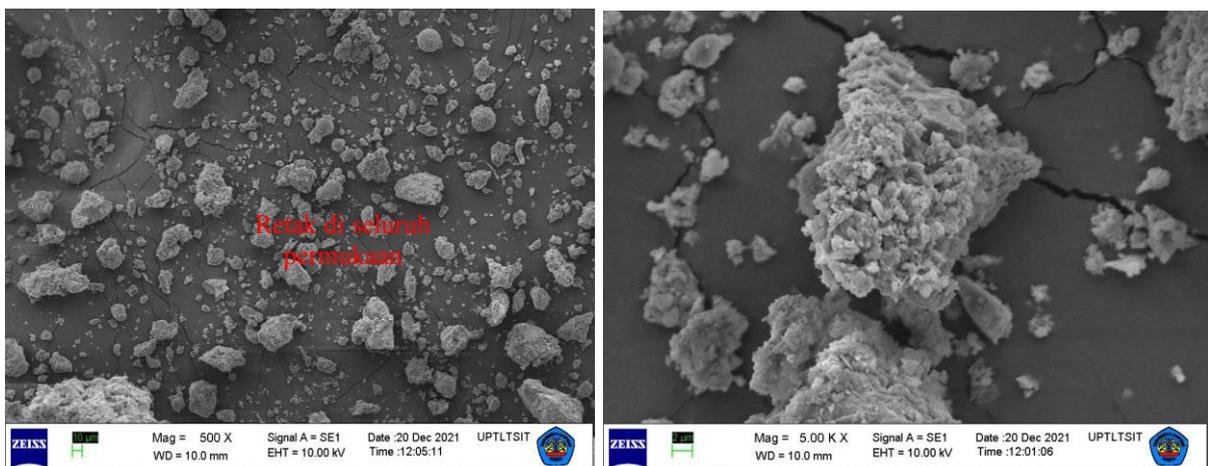
Sampel 4: Terpapar 2020: muncul Sr

Gambar 5.5. SEM genteng terpapar produksi 2019



Sampel 5: Terpapar: Tidak ada Mn, muncul Sr dan Cl

Gambar 5.6. SEM genteng terpapar produksi 2021



Sampel 6: Stok terlindung permukaan rusak: muncul Sr, U dan Cr

Gambar 5.7. SEM stok terlindung permukaan rusak produksi 2019

### 3.4. Penggabungan hasil EDX dan SEM

Perbedaan elemen yang terkandung pada genteng produksi 2016 dan genteng yang rusak, serta penampakan SEM magnitudo 500 dan 5.00 K disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbedaan elemen yang terkandung pada genteng produksi 2016 – genteng yang rusak, penampakan SEM dan  $C_3S/C_2S$

Kode Sampel	Elemen yang berbeda dengan produksi 2016	Penampakan magnitudo 500	Penampakan magnitudo 5.00K	$C_3S/C_2S$
2016	Al, Si, S, Ag, K, Ca, Ti, Mn dan Fe	Retak $\pm 5\%$ , pecahan kecil-kecil (1-20), banyak yang kecil	Masif, ada yang terlihat rapuh	6.02
1	Kehilangan S (Gambar 2.2)	Retak $\pm 5\%$ , pecahan rata <sup>2</sup> 20, ada yang padat ada yang rapuh	Lebih porous, ada bagian yang rata, seperti jarum, terlihat rapuh	4.41
2	Kehilangan S muncul Cl (Gambar 2.3)	Retak $\pm 60\%$ , pecahan kecil-kecil (1-20) banyak yang besar	Banyak gumpalan putih, lebih porous, lebih rapuh	2.16
3	Kehilangan S muncul Cl dan Sr (Gambar 2.4)	Retak $\pm 30\%$ , pecahan kecil-kecil (1-20) banyak yang kecil	Terpecah menjadi beberapa bagian, gumpalan putih, rapuh, porous	3.98
4	Muncul Sr (Gambar 2.5)	Retak $\pm 20\%$ , pecahan 5-30	Gumpalan putih, batang, seperti jarum, porous	13.9
5	Kehilangan Mn, muncul Cl dan Sr (Gambar 2.6)	Retak $\pm 30\%$ , pecahan kecil-kecil (1-40) banyak yang besar	Banyak bentuk bola ukuran besar dan kecil, porous, sedikit bercak putih	14.18
6	Muncul Sr, U dan Cr (Gambar 2.7)	Retak 100% (1-15) banyak yang kecil	Pecah menjadi bagian besar dan remah-remah, porous, gumpalan putih	4.78

### 3.5. Hasil EDX material baku penyusun genteng

Tabel 5. Elemen, energi ion dan viskositas dinamis

Elemen	Energi atom keV	Viskositas dinamik, keV				
		Abu Sudamanik	Pasir Cilegon	Abu halus Suralaya	Abu giling pabrik	Air tanah
Sr LA	1.7	198	350	250	200	0
Sr LB	1.8	40	40	40	30	0
Cl KA	2.65	140	225	150	120	1
Si KA	1.75	0	975	800	480	0.5
S KA	2.38	0	0	170	80	0.5
Ca KA	3.65	1620	600	2850	4280	23
Ca KB	4	260	115	430	640	4

## 4. Diskusi

### 4.1. Bertambah dan berkurangnya elemen

Bertambah atau berkurangnya elemen dalam genteng beton mempengaruhi ketahanan genteng. Pengujian reaktivitas bahan tambahan semen dianggap perlu untuk diuji [Avet dkk, 2022]. Penambahan bahan pengubah fasa mengurangi sifat kuat tekan dan lentur keseluruhan beton [Narain dkk, 2016]. Reaksi suatu material atas kondisi yang terjadi baik di dalam diri atau material yang berhubungan dengan kelembaban dan temperature dapat positif atau negative. Reaksi negative material dapat terjadi kapan saja tanpa peringatan. Pada kondisi ambien, genteng beton dengan semen menunjukkan kinerja termal yang lebih baik daripada atap dengan polistiren yang diekstrusi sebagai bahan insulasi dan atap dengan plafon POP palsu [Kumar dan Puranik, 2015]. Genteng di Indonesia harus tahan terhadap iklim tropis dengan kelembaban tinggi.

#### 4.1.1. Sulfur (S)

Sulfur tidak larut dan tidak bereaksi dengan air. Belerang bereaksi dengan hampir semua unsur lain kecuali gas mulia, bahkan dengan logam iridium yang terkenal tidak reaktif (menghasilkan iridium disulfida). Beberapa dari reaksi tersebut membutuhkan suhu tinggi [Wikipedia]. Ketiadaan S pada sampel 1, 2 dan 3 membuat  $C_3S/C_2S$  lebih rendah dari produksi 2016 yaitu 2.1 – 4.4 dan menjadi lebih porus (Tabel 4, Gambar 2.2, 2.3 dan 2.4). Menurut Tjaronge dalam Hartini, 2013 rentang  $C_3S/C_2S$  adalah 1.5 – 6.5.

#### 4.1.2. Strontium

Strontium (Sr) terkandung pada semua bahan penyusun genteng (Tabel 5). Strontium dalam bentuk unsurnya terjadi secara alami di banyak kompartemen lingkungan, termasuk batuan, tanah, air, dan udara. Senyawa stronsium dapat bergerak melalui lingkungan dengan cukup mudah, karena banyak senyawa yang larut dalam air. Strontium bereaksi kuat dengan air dan cepat menodai di udara, sehingga harus disimpan dari kontak dengan udara dan air. Oleh sebab itu Strontium terkandung dalam genteng terlindung yang rapuh (Tabel 2). Karena reaktivitasnya yang ekstrim terhadap udara, unsur ini selalu terjadi secara alami dalam kombinasi dengan unsur dan senyawa lain. Sampel 3 s.d 6 semua muncul Sr. Logam strontium bubuk halus akan menyala secara spontan di udara. Strontium dapat berakhir di air melalui tanah dan melalui pelapukan batuan. Strontium dalam tanah larut dalam air, sehingga kemungkinan besar akan bergerak lebih dalam ke dalam tanah dan masuk ke dalam air tanah.

Sampel 1 dan 2 tidak mengandung Sr (Tabel 3). SEM pada genteng yang mengandung Sr nampak rapuh dan porus (Gambar 2.2 dan 2.3).

#### 4.1.3. Clorin (Cl)

Clorin sangat reaktif dan agen pengoksidasi kuat, dapat mengoksidasi air menjadi oksigen dan asam klorida, mendidih pada 34,0 °C. Temperatur di Indonesia mencapai 34°C dalam beberapa hari dalam satu bulan [Niken dkk, 2013], dengan demikian ada kemungkinan Clorin mendidih. Hal ini menambah kerapuhan pada genteng beton. Sampel 2, 3 dan 5 muncul Cl, SEMnya nampak berbintil putih (Gambar 2.3). Pada sampel dimana Cl dan Sr muncul, bentuk SEM menjadi terpecah (Gambar 2.4). SNI 03-6861.1-2002 menyatakan kandungan klorida kurang dari 0,5 gram/liter.

#### 4.1.4. Mangan (Mn)

Mangan adalah logam keperakan yang keras, rapuh, mudah teroksidasi sering ditemukan dalam mineral dalam kombinasi dengan besi. Mangan meningkatkan kekuatan, kemampuan kerja, dan ketahanan aus. Mangan oksida digunakan sebagai agen pengoksidasi, sebagai aditif karet, dalam pembuatan kaca, pupuk, dan keramik.

Beton adalah sejenis keramik. Keberadaan Mn membuat ada bagian yang rapuh pada SEM genteng produksi 2016 (Gambar 2.1). Ketiadaan Mn, membuat SEM tampak bola-bola dengan ukuran dari yang besar sampai yang kecil (Gambar 2.6).

#### 4.1.5. Titanium (Ti)

Pada genteng produksi 2016, terdapat elemen Ti sebesar 1% (Tabel 2). Tes kekuatan mortar menunjukkan bahwa kekuatan tekan berkurang lebih dari 50% untuk kandungan TiO<sub>2</sub> 2,5 wt.% dalam terak. Pada hari ke 28 kehilangan kuat tekan masih lebih dari 40% [Blotevogel dkk, 2020].

Meskipun semua bahan penyusun mengandung Sr (Tabel 5), namun dari genteng produksi 2019 yang diperiksa, diperoleh genteng yang terpapar tidak mengandung Sr, sedang genteng yang terlindung mengandung Sr tetapi keduanya rapuh. Hal ini bisa terjadi karena Sr yang terdapat pada genteng terpapar sudah berakhir melalui pelapukan, sedang pada kondisi terlindung dimana kelembaban tinggi Sr masih tinggal. Keberadaan Cl dan Sr membuat genteng sangat mudah hancur bahkan dengan tenaga yang sangat kecil. Kondisi yang sama juga terjadi pada genteng yang mengandung Sr, U dan Cr.

### 4.2. Semen

Ordinary Portland Cement (OPC) dibuat dari klinker, gypsum, dan batu kapur. Semen Portland didefinisikan sebagai semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak. Semen portland terutama terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain [Irawan, 2013].

Semen Portland Pozolan (PPC) didefinisikan sebagai suatu semen hidrolis yang terdiri dari campuran yang homogen antara semen portland dan pozolan halus, yang diproduksi dengan menggiling klinker semen portland dan pozolan bersama-sama, atau mencampur secara merata bubuk semen portland dengan bubuk pozolan, atau gabungan antara menggiling dan mencampur, di mana kadar pozolan 6% sampai dengan 40% massa semen Portland [SNI 15-0302-2004].

Semen Portland Komposit (PCC) didefinisikan sebagai bahan pengikat hidrolis hasil penggilingan bersama-sama terak semen portland dan gips dengan satu atau lebih bahan

anorganik, atau hasil pencampuran antara bubuk semen portland dengan bubuk bahan anorganik lain. Bahan anorganik tersebut antara lain terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), pozolan, senyawa silikat, batu kapur, dengan kadar total bahan anorganik 6% - 35 % dari massa semen portland komposit [SNI 15-7064, 2004]. Konsentrasi SrO yang diinginkan dalam terak tanur sembur industri (GGBS) yang dicampur dengan aditif yang berbeda adalah 2% [Blotevogel dkk, 2020]. Dengan demikian pemakaian PCC akan meningkatkan kandungan Sr.

## 5. Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari uraian di atas adalah:

1. Sebelum 8 bulan, genteng terpasang rapi, proses kerapuhan terjadi namun deformasi karena kerapuhan belum menimbulkan masalah
2. Ketiadaan S, Mn, munculnya Sr, Cl ditemukan pada genteng yang rapuh. Hal ini diduga memicu kerapuhan genteng yang menimbulkan deformasi tidak seragam. Penampakan atap genteng pada 8 bulan pemasangan menjadi bergelombang tidak rata dan sebagian pecah.
3. Sr muncul pada genteng terlindung, jadi kelembaban tinggi memicu munculnya Sr dan Sr mudah bereaksi dengan air dan udara
4. Kelembaban pengujian lentur pada SNI 0096-2007 yang dinyatakan 40% perlu ditinjau, karena kelembaban terendah di Indonesia 50% dan kelembaban rata-rata 72%
5. Perlu ada studi lebih lanjut untuk menemukan rumusan pembuatan genteng beton dengan kondisi material yang ada sekarang ini

Alternatif mengatasinya:

1. Disarankan tidak menggunakan PCC karena salah satu bahan penyusun PCC adalah *blast furnace slag* yang mengandung Sr
2. Material dicuci dari Sr dan Cl
3. Pilih material yang tidak mengandung Sr dan Cl
4. Membuat genteng kedap air, dan melapisi dengan water proof

Point 2, 3 dan 4 memerlukan tambahan biaya yang akan meningkatkan harga bahan

## Ucapan terima kasih

Terima kasih saya ucapkan kepada mas Rifki, laboran Laboratorium Fisika Universitas Indonesia yang telah membantu menguji bahan, Universitas Lampung yang telah mendukung penelitian ini, kepada teman-teman Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung yang telah mendukung.

Pustaka:

- Allam, M.E., Amin, S.K., dan Garas, G. (2020). Testing of cementitious roofing tile specimens using marble waste slurry. *International Journal of Sustainable Engineering*, 13(2), <https://doi.org/10.1080/19397038.2019.1657981>
- Avet, F., Li, X., Haha, M.B., Bernal, S.A., Bishnoi, S., Cizer, O., Cyr, M., Dolenc, S., Durdzinski, P., Haufe, J., Hooton, D., Juenger M.C.G., Kamali-Bernard, S., Londono-Zuluaga, D., Marsh A.T.M., Marroccoli, M., Mrak, M., Parashar, A., Patapy, C., Pedersen, M., Provis, J.L., Sabio, S., Schulze, S., Snellings, R., Telesca, A., Thomas, M., Vargas, F., Vollpracht, A., Walkley, B., Winnefeld, F., dan Ye, G. 2022. *Report of RILEM TC 267-TRM phase 2, 2022: optimization and testing of the robustness of the R3 reactivity tests for supplementary cementitious materials*, 55-92.

- <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01928-6>
- Badan Pusat Statistik, Sensus Penduduk 2020.
- Blotevogel, S., Steger, L., Hart, D., Doussang, L., Kaknics, J., Poirier, M., Hansjörg, B., Deubener, J., Patapy, C., dan Cyr, M. (2020). Effect of TiO<sub>2</sub> and 11 minor elements on the reactivity of ground-granulated blast-furnace slag in blended cements. *Journal of the American Ceramic Society*, Wiley, 1-30. 10.1111/jace.17431. hal-02931126
- Hartini, 2013. Studi Karakteristik dan mikrostruktur Self Compacting Concrete (SCC) dengan penggunaan air laut. Tesis, Program Pascasarjana Universitas Hasanudin, Makasar, 1-125.
- Huang, P., Mirmiran, A., Chowdhury, A.G., Abishdid, C., dan Wang, T-L. (2009). Performance of roof tiles under simulated hurricane impact. *Journal of Architectural Engineering*, 15(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0431\(2009\)15:1\(26\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0431(2009)15:1(26))
- Internet 1: Genteng Inovasi Karya Mahasiswa Undip Raih Medali Emas di Nurenberg, 2018. Genteng dengan Styrofoam. <https://www.undip.ac.id/post/10708/genteng-inovasi-karya-mahasiswa-undip-raih-medali-emas-di-nurenberg.html>
- Internet 2: Pengembang tidak mau membayar. Available from: [<https://ceklissatu.com/news/tak-dibayar-alasan-kualitas-suplayer-geteng-ibukota-preteli-geteng-di-perum-arya-green-tajurhalang/>]; <https://rakyatbogor.net/tidak-kunjung-dibayar-supplier-genteng-ibu-kota-copot-genteng-yang-sudah-terpasang/>
- Irawan, R.R., 2013. Pusat Penelitian dan pengembangan Jalan dan jembatan. Semen Portland di Indonesia untuk Aplikasi Beton Kinerja Tinggi
- Kumar, K.D.E.V.S., dan Puranik, S. (2015). Thermal performance evaluation of a mineral-based cement tile as roofing material. *Indoor and Built Environment Journal*, 26(3), 409-421. <https://doi.org/10.1177%2F1420326X15622978>
- Lubis, K., dan Hermanto, E. (2020). Pembuatan genteng beton serat dengan bahan tambah serat serabut kelapa dan styrofoam. *Buletin Utama Teknik*, 15(2), 174-179. [jurnal.uisu.ac.id > index.php > but > article > download](http://jurnal.uisu.ac.id/index.php/but/article/download)
- Narain, J., Jin, W., Ghandehari, M., Wilke, E., Nitin Shukla, Berardi, U., El-Korchi, T., dan Dessel, S.V. (2016). Design and application of concrete tiles enhanced with microencapsulated phase-change material. *Journal of Architectural Engineering*, 22(1). <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29AE.1943-5568.0000194>.
- Nasser, I.F., Mohammed, T.J., dan Ali, M.A. A-W. (2020). Production of lightweight geopolymer concrete roof flatness tiles. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 55(5), 1-10. DOI:10.35741/issn.0258-2724.55.5.19
- Niken, C., Elly T., dan Supartono, F.X. (2013). Long-term shrinkage empirical model of high-performance concrete in humid tropical weather. *Civil and Environmental Research Journal*, 3(2), 35-46
- Nugroho, F.T., Husaen, M.F., dan Prabowo, E.W.R. 2017. Pembuatan genteng beton berkonsep Eco-friendly Materials menggunakan abu sekam padi dan limbah polyethylene. Seminar Nasional Pendidikan Vokasi ke 2, Pusat Pengembangan Pendidikan Vokasi, FKIP-UNS, pp 75-83.
- Obakin, O.A. (2020). Structural behaviour (MOE and MOR) of cement fibre composite roofing tiles for sustainable building development. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29(2), 1448-1460.
- Shyamala, B., Ravisankar, K.L., dan Mohanraj, E.K. (2019). Experimental study on foamed concrete tiles. *Journal of Critical Reviews*, 6(6), 433-437.
- Olufemi, A., Akuto, T., Michael, T., dan Ugama, T. (2016). Production of concrete roofing tiles using rice husk ash (RHA) in partial replacement of cement. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 3(6), 2678-2685.
- Rajalakshmi, R. S., Aryamol, E. P. , Francis, J., Das, M.M., dan Haritha, M. (2020). Comparing the strength behavior of agro-industrial roofing tile with ordinary clay roofing

tile. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 9(5), 278-282.  
<http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV9IS050284>

Standar Nasional Indonesia, 0096: 2007. Genteng Beton. Badan Standardisasi Nasional, 1-10.

Standar Nasional Indonesia, SNI 15-0302-2004. Semen Portland Puzzolan, 1-5.

Standar Nasional Indonesia, SNI 7064-2004. Semen Portland Komposit. Badan Standardisasi Nasional, 1-4.

Standar Nasional Indonesia, 15-2049-2004. Semen portland. Badan Standardisasi Nasional, 1-120

Standar Nasional Indonesia, 03-6861.1-2002. Spesifikasi Bahan Bangunan-Bagian A: Bahan Bangunan Bukan Logam, 189 hal.

Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sulfur>

Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Strontium>

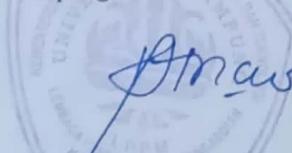
Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Klorin>

Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Manganese>

Kegiatan yang dananya berasal dari DIPA BLU Universitas Lampung

1. No./Tgl.DIPA : 023.17.2.677516/2021, 23 November 2020
  2. Kode Keg./Sub.Keg/MAK : 4471.QEI.001.052.A.525119 Tahun Anggaran 2021 (Penelitian PROFESORSHIP)
  3. No. dan Tanggal SPK : 1538/UN26.21/PN/2021 Tanggal 21 April 2021
  4. Nama Penanggungjawab : Dr, Ir Chatarina Niken, MT/ Penanggung Jawab Kegiatan Penelitian PROFESORSHIP Universitas Lampung
  5. Alamat Penanggungjawab : Jl.Prof. Sumantri Brojonegoro No.1 Bandar Lampung.
  6. Nomor Pokok Wajib Pajak : 88.496.921.3-526.000
  7. Nilai SPK/Surat Perjanjian : **Rp 50000000,-**
  8. Uraian dan volume Pekerjaan : Penelitian dengan Judul "Analisis Pengaruh Penetrasi Jangka Panjang Partikel Tanah Pada Kuat Tekan Beton Dan Perubahan Struktur Mikronya".
  9. Cara Pembayaran :
    1. Kegiatan penelitian pembayaran angsuran I (satu) sebesar 70% (dari nilai pekerjaan) atau  $70\% \times \text{Rp } 50000000,-$  yakni sebesar Rp 35000000,- (*Tiga Puluh Lima Juta Rupiah*). setelah surat perjanjian pelaksanaan pekerjaan ini ditandatangani oleh kedua belah pihak dan menyerahkan proposal-proposal kegiatan tersebut dari Pihak Kedua kepada Pihak Pertama
    2. Kegiatan penelitian pembayaran angsuran II (dua) sebesar 30% (dari nilai pekerjaan) atau  $30\% \times \text{Rp } 50000000,-$  yakni sebesar Rp 15000000 ,- (*Lima Belas Juta Rupiah*), setelah pekerjaan selesai 100% dinyatakan dengan Berita Acara Serah Terima pekerjaan dan menyerahkan laporan hasil kegiatan dari Pihak Kedua kepada Pihak Pertama.
    3. Pembayaran tersebut di atas dilakukan melalui kas Badan Layanan Umum (BLU) ke Rekening Pihak Kedua pada Bank : **BNI Cabang TANJUNG KARANG** dengan Nomor **0071053040**a.n. **Dr, Ir Chatarina Niken, MT** sebagai penanggung jawab kegiatan penelitian PROFESORSHIP Universitas Lampung.
  10. Jangka waktu pelaksanaan : 154 (seratus lima puluh empat) hari kalender terhitung tanggal 21 April – 21 September 2021
  11. Tanggal Penyelesaian Pekerjaan : 21 September 2021
  12. Jangka waktu Pemeliharaan : -
- Ketentuan Sanksi :
1. Apabila terjadi ketelambatan pekerjaan tanpa adanya alasan yang diterima oleh pemberi pekerjaan dikenakan sanksi/denda sebesar 1/1000 (satu permil) untuk setiap hari keterlambatan dengan denda maksimal sebesar 5%, (lima persen) dari jumlah harga borongan.
  2. Segala resiko yang timbul akibat keterlambatan pekerjaan tersebut ini sepenuhnya menjadi beban dan tanggung jawab pihak II. Maka kami sebagai pihak I dapat membatalkan SPK secara sepihak dan pihak II tidak berhak menuntut kerugian apapun dari instansi kami.

Bandar Lampung, 21 September 2021  
Pejabat Pembuat Komitmen LPPM Universitas  
Lampung,



**Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A.**  
NIP 196505101993032008

**LAPORAN  
PENELITIAN *PROFESSORSHIP*  
UNIVERSITAS LAMPUNG**



**ANALISIS PENGARUH PENETRASI JANGKA PANJANG PARTIKEL  
TANAH PADA KUAT TEKAN BETON DAN PERUBAHAN STRUKTUR  
MIKRONYA  
(Studi kasus: Gedung RS PTN Universitas Lampung)**

Dr. Ir. Chatarina Niken, MT  
Dr. Eng. Mohd Isneini, MT  
Andius Dasa Putra, ST, MT, PhD  
Prof. Drs. Ir. Suharno, B.Sc. M.S. PhD.IPU., ASEAN.Eng

**JURUSAN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
2021**

**HALAMAN PENGESAHAN PENELITIAN PROFESSORSHIP  
UNIVERSITAS LAMPUNG**

---

Judul Penelitian : Analisis Pengaruh Penetrasi Jangka Panjang Partikel Tanah pada Kuat Tekan Beton dan Perubahan Struktur Mikronya

Manfaat sosial ekonomi :  
- Memberikan rasa aman karena kualitas beton yang terendam lempung diketahui  
- Memberikan penghematan ekonomi karena prasarana yang terendam lempung dapat digunakan atau dilakukan terapi dengan tepat

Ketua Peneliti  
a. Nama Lengkap : Dr. Ir. Chatarina Niken Dwi Wahyuni S, BU, MT  
b. SINTA ID : 6681926  
c. Jabatan fungsional : Lektor Kepala  
d. Program Studi : Teknik Sipil  
e. Nomor HP : 081329055304  
f. Alamat surel (e-mail) : chatarinaniken@yahoo.com

Anggota Peneliti (1)  
a. Nama Lengkap : Andius Dasa Putra, S.T., M.T., PhD  
b. SINTA ID : 6679471  
c. Program Studi : Teknik Sipil

Anggota Peneliti (2)  
a. Nama Lengkap : Dr. Eng. M. Isneini, MT  
b. SINTA ID : 6657342  
c. Program Studi : Teknik Sipil

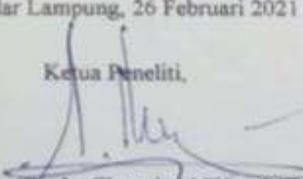
Profesor  
a. Nama Lengkap : Prof. Drs. Ir. Suharno, B.Sc. M.S. PhD IPU, ASEAN Eng  
b. SINTA ID : 6665895  
c. Program Studi : Geofisika

Jumlah mahasiswa yang terlibat : 2 (dua) orang  
Jumlah alumni yang terlibat : 1 (satu) orang  
Jumlah staf yang terlibat : 1 (satu) orang

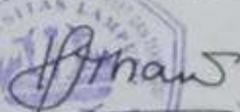
Lokasi kegiatan : Fakultas Teknik Universitas Lampung  
Lama kegiatan : 6 (enam) bulan  
Biaya Penelitian : Rp50.000.000,00 (Lima puluh juta rupiah)  
Sumber dana : DIPA BLU UNILA

Bandar Lampung, 26 Februari 2021

Mengetahui,  
Dekan Fakultas Teknik Unila,  
  
(Prof. Drs. Suharno, ST, M.Sc, PhD)  
NIP. 196202171987031002

Ketua Peneliti,  
  
(Dr. Ir. Chatarina Niken, MT)  
NIP. 195806131984032003

Menyetujui,  
Ketua LPPM Universitas Lampung.

  
(Dr. H. Lusmetia Afriani, DEA)  
NIP. 196305101993032008

## DAFTAR ISI

	Hal
1. Pendahuluan	2
2. Tinjauan Pustaka	3
2.1. Penelitian Terdahulu	3
2.2. Porositas Beton	4
2.3. Produk Hidrasi	5
2.4. Sistem dan Klasifikasi Pori	7
2.5. Lempung	8
3. Metode Penelitian	8
3.1. Lokasi Penelitian	9
3.2. Pengolahan Data	9
3.3. Bagan Penelitian	9
4. Hasil Penelitian	10
4.1. Submit di Jurnal International	11
4.2. Buku Balok Beton Bertulang Terlentur	11
5. Biaya dan Jadwal Penelitian	13
5.1. Biaya Penelitian	13
5.2. Jadwal Penelitian	20
6. Referensi	

## RINGKASAN

Lempung dan lumpur pada agregat adalah faktor yang mengganggu proses pengikatan dalam reaksi hidrasi beton. Penetrasi lumpur dan lempung jangka panjang selain terjadi pada banyak infrastruktur di Sidoharjo juga terjadi pada jalan beton di Kabupaten Kerinci Jambi. *Basement* beton yang terendam oleh lumpur juga terjadi di lantai *basement* Gedung RS PTN Universitas Lampung sejak tahun 2010 sampai 2020. Dinding penahan tanah, terowongan beton atau bangunan dengan kondisi tertentu tidak bisa terhindarkan dari penetrasi partikel tanah. Penetrasi partikel tanah mampu menembus produk hidrasi seperti gel C-S-H karena mengandung pori. Karenanya hal tersebut pasti mengubah struktur mikro, mengubah kekuatan dan durabilitasnya.

Tujuan penelitian ini adalah mengetahui kekuatan beton dalam kondisi terendam lumpur dan evolusi perubahan struktur mikronya. Dalam jangka panjang, pemahaman akan keterkaitan perubahan mikro struktur dan kuat tekan beton akan memberikan sumbangan pada perencanaan bangunan bawah tanah seperti terowongan, dan *basement*.

Penelitian ini dilakukan dengan studi kasus RS PTN Universitas Lampung. Jenis penelitian adalah eksperimental dengan mengambil sampel *core drill* pada daerah yang terendam tanah dan terlindung. Data kuat tekan sampel *core drill* diolah dengan ASTM E178-02, (2002). Struktur mikro diperoleh dari pengujian *scanning electron microscopy*. Analisis dilakukan dengan membandingkan struktur mikro beton terlindung dengan kondisi terendam tanah dan dihubungkan dengan kekuatannya. Struktur mikro kondisi terendam tanah juga dibandingkan dengan struktur mikro beton pada umumnya yang diambil dari studi literatur.

Riset ini memberikan bukti berdasar sampel dari elemen bangunan yang sesungguhnya yang telah terendam lumpur lebih dari 7 tahun. Sampel diteliti dari sisi kekuatannya dan evolusi mikro yang terjadi. Dengan demikian penelitian ini memberikan pembuktian konsep (*proof of concept*) fungsi dan atau karakteristik penting secara analitis dan eksperimental sehingga tergolong TKT 3. Validasi kode, komponen dan atau *breadboard validation* dalam suatu lingkungan adalah TKT 5. Validasi dilakukan dengan membandingkan struktur mikro kondisi terlindung dengan struktur mikro beton pada umumnya dari studi literatur. Dengan demikian memenuhi TKT 5.

Paper telah disubmit pada Indonesian Journal of Science & Technology berindex SCOPUS Q1 dan buku berjudul Balok Beton Bertulang Terlentur yang memasukkan saran untuk konstruksi bawah tanah. Hasil penelitian ini

Penelitian ini berdasarkan studi eksperimental di *basement* Rumah Sakit Pendidikan Universitas Lampung di Indonesia. Sampel diambil dengan menggunakan empat bor inti di ruang bawah tanah dalam kondisi terlindung dan terendam lumpur untuk pengujian kompresi. Bor inti diambil untuk pengujian SEM dan EDX. Data kuat tekan diproses menggunakan praktik standar ASTM E178-02 untuk menangani pengamatan terluar. Data EDX untuk kedua jenis kondisi beton yang menggambarkan viskositas dinamis setiap unsur kimia dibandingkan dan dihubungkan dengan data EDX yang menyatakan massa atom dan SEM. Dari hubungan tersebut dicari mekanisme degradasi beton yang terendam lumpur dengan mempelajari literatur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan beton terendam lumpur selama 10 tahun, hanya 50% dari kuat tekan beton terlindung. Degradasi disebabkan oleh: oksidasi air permukaan yang menyertai perendaman lumpur, munculnya  $Fe^{3+}$  yang membuat perubahan struktur, peningkatan porositas; tekanan perendaman yang mengubah struktur atom dan densitas Ca serta penipisan portlandit yang kemudian diikuti dengan pelepasan Ca dari CSH.

# ANALISIS PENGARUH PENETRASI JANGKA PANJANG PARTIKEL TANAH PADA KUAT TEKAN BETON DAN PERUBAHAN STRUKTUR MIKRONYA (Studi kasus: Gedung RS PTN Universitas Lampung)

## I. PENDAHULUAN

Beton adalah material yang sangat banyak digunakan dalam pembangunan sarana dan prasarana. Lempung dan lumpur pada agregat adalah factor yang mengganggu proses pengikatan dalam reaksi hidrasi beton. Kadar lumpur maximum agregat sebagai material penyusun beton adalah 5% (SNI 03-1750, 1990). Elemen struktur yang di cor dan permanen kontak dengan tanah diharuskan memiliki selimut beton 75mm (SNI 2847, 2019). Dinding penahan tanah, terowongan beton, atau pada bangunan dengan kondisi tertentu tidak bisa terhindarkan dari penetrasi partikel tanah.

Lumpur Lapindo Sidoarjo, Jawa Timur yang muncul dari dalam tanah sejak tahun 2006 menimbulkan masalah yang kompleks. Lebih dari 600 hektar lahan produktif, perumahan dan kawasan industri, serta infrastruktur telah terendam. Jebolnya tanggul di Sidoharjo merendam areal Pasifik Prestress Indonesia dengan lumpur setinggi 3,5 m (Kompas, 2009). Hingga saat ini belum ada tanda-tanda letusan akan berakhir dalam waktu dekat.

Penetrasi partikel tanah jangka panjang selain terjadi pada banyak infrastruktur di Sidoharjo juga terjadi pada jalan beton di Kabupaten Kerinci Jambi (Suara Kerinci, 2018). *Basement* beton yang terendam oleh lumpur juga terjadi di lantai *basement* Gedung RS PTN Universitas Lampung sejak tahun 2010 sampai 2020. Penetrasi partikel tanah tersebut pasti mengubah struktur mikro beton.

Mutu beton dinyatakan dengan kuat tekannya. Kuat tekan beton adalah dasar dari semua perencanaan struktur dengan bahan beton. Kuat tekan ditentukan oleh struktur mikro yang mencakup: bentuk kristal produk hidrasi, *network* pori, kandungan pori keseluruhan dan kandungan pori produk hidrasi. Kandungan dan ukuran pori akan berubah karena dipengaruhi oleh lingkungan, demikian juga semua produk hidrasi.

Tanah di Lampung khususnya di Universitas Lampung belum tercemari oleh limbah pabrik, sehingga dapat mencerminkan situasi normal pengaruh penetrasi partikel tanah pada beton. Penetrasi jangka panjang ini akan dapat menggambarkan perubahan struktur mikro lebih jelas dibandingkan dengan jangka pendek, sehingga dapat memberikan gambaran struktur mikro untuk bangunan bawah tanah yang lain.

Struktur mikro tersebut dipelajari keterkaitannya dengan kekuatan tekannya. Tujuan khusus penelitian ini adalah mengetahui kekuatan beton dalam kondisi terendam lumpur dan evolusi perubahan struktur mikronya. Dengan target capaian tersebut maka ketahanan material beton yang terendam partikel tanah dapat diketahui. Hal ini sangat berguna bagi bangunan bawah tanah seperti terowongan, dan *basement*. Struktur mikro beton yang terpenetrasi partikel tanah akan memberikan kontribusi pada ilmu material beton dan struktur beton. Dengan mengetahui hubungan antara struktur mikro dan kekuatan tekan beton langkah pencegahan degradasi selanjutnya dapat dilakukan dengan tepat.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### II.1. Penelitian Terdahulu

#### *Lumpur merah*

Lumpur merah adalah limbah industri alumunium. Lumpur ini telah dipakai untuk mengganti sebagian semen (Sha dkk., 2016). Penggantian 10% semen dengan lumpur merah, menunjukkan kekuatan tinggi dan meningkatkan durabilitas (Venkatesh dkk., 2020). Kekuatan mekanis dari SCC pada umur dini meningkat dengan peningkatan lumpur merah; potensi korosi tulangan berkurang. Keberadaan lumpur merah tidak membuat efek negative pada peluluhan metal (Tang dkk., 2019). Lumpur merah ini sangat basa dan mengandung oksida besi (Sethy dkk, 2019). Siregar dkk, 2019 menyatakan bahwa kuat tekan beton dengan variasi kadar lumpur 20% dan penambahan stabilisasi tanah lebih tinggi 30,41% dibandingkan beton tanpa stabilisasi tanah. Penggantian sebagian semen dengan lumpur chikoko menurunkan kuat tekan beton (Ottos & Nyebuchi, 2018). Penambahan 2% lumpur merah dengan 30% *iron ore tailings* menunjukkan kuat tekan dan kuat tarik tertinggi (Shetty dkk., 2014). Kuat tekan dan kuat tarik belah berkurang dengan penambahan lumpur merah (Rathod dkk., 2013).

#### *Lumpur vulkanik*

Beberapa upaya telah dilakukan untuk memanfaatkan lumpur vulkanik. Pemanfaatan lumpur vulkanik sebagai agregat buatan melalui proses geopolimerisasi telah dilakukan (Hardjito, 2013). PH tinggi membuat perlindungan yang lebih besar bagi tulangan terhadap korosi dan memberikan hambatan listrik yang lebih besar juga (Ribeiro dkk., 2012).

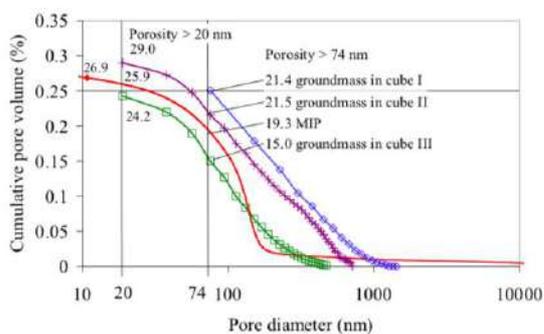
## Lumpur Lapindo

Lumpur Lapindo juga telah diteliti sebagai *filler* dan diperoleh peningkatan kuat tekan beton (Lianasari & Sarira, 2019). Lumpur Sidoarjo merupakan material prospektif untuk pembuatan beton geopolymer (Ekaputri & Triwulan 2011). Bowoputro dkk, 2009 telah mempelajari pengaruh temperature dan perendaman lumpur Lapindo terhadap stabilitas aspal beton. Penurunan stabilitas aspal beton sebesar 53% pada perendaman 28 hari.

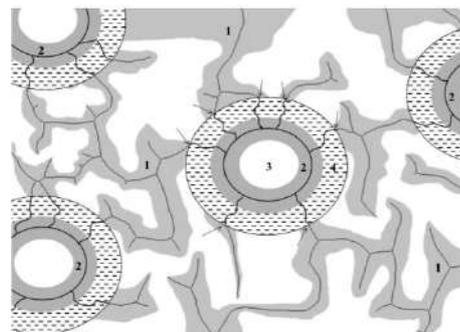
## II.2 Porositas Beton

Penetrasi kelembaban, panas sekeliling atau partikel tanah ke dalam beton pasti melalui pori-pori pasta semen yang terbuka dengan lingkungan. Pori pasta semen dapat mencapai 30% volume beton (Gambar 1). Luas permukaan pori dalam beton berkisar  $500 \text{ m}^2/\text{cm}^3$  (Bažant & Wittmann, 1982). Hal ini membuat material dengan ukuran 10-700 nm (0,00001 mm-0,0007mm) mudah masuk ke dalam beton. Ukuran satu molekul air sangat kecil, umumnya bergaris tengah sekitar 3 Å (0,3 nm atau  $3 \times 10^{-8}$  cm) mengalir membawa partikel tanah dan masuk dalam beton.

Kedalaman penetrasi tergantung pada *network* pori (Gambar 2). Jumlah dan ukuran pori berubah dengan cepat pada umur beton dini sampai 90 hari (Kurtis, 2015). Beton dewasa memiliki jumlah pori yang konstan karena sebagian besar proses hidrasi telah terjadi atau bahkan telah berakhir.



Gambar 1. Distribusi ukuran pori Umur pasta semen 28 hari  
Holzer et al, 2006

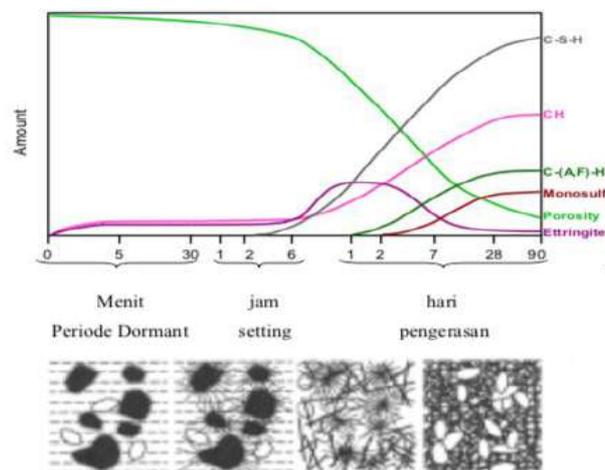


Gambar 2. Ilustrasi skematik:  
(1) pori kapiler,  
(2) phaenograins dengan zona berpori,  
(3) klinker belum terhidrasi,  
(4) lapisan hidrasi padat  
Holzer, 2006

### II.3. Produk Hidrasi

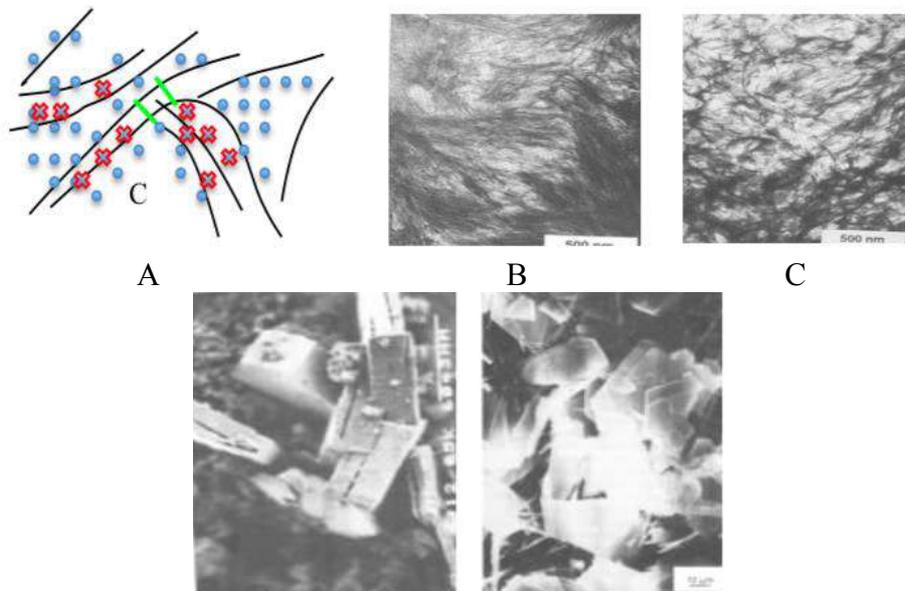
Reaksi semen dengan air pada pembuatan beton disebut sebagai proses hidrasi. Rasio air terhadap semen mempengaruhi redistribusi air atau mobilitas air dan reaksi hidrasi. Hal ini selanjutnya mempengaruhi sifat kinetik beton terutama jangka pendek termasuk susut dan rangkak. Dalam proses hidrasi, jumlah pori beton mengalami penurunan seperti Gambar 1. Ukuran poripun berubah ke ukuran nanometer seperti dalam pori gel (Morin dkk., 2002); dan sifat permukaan air juga mengalami perubahan. Air dalam molekul produk hidrasi pada suatu permukaan pori memiliki sifat berbeda dengan *bulk water*. Air pada lapisan pertama molekul, secara fisik terserap ke permukaan, sedangkan lapis berikutnya mengalir secara random. Pada pori kapiler yang lebih besar, fraksi dari air permukaan ini diabaikan dan pada umumnya air tersebut selalu menjaga sifat *bulk liquid*. Dengan demikian sifat air menjadi suatu fraksi yang signifikan dari kandungan air total. Sifat fisik rata-rata air gel seperti kepadatan, kekentalan, konstanta dielektrik dan konduktivitas berbeda dengan *bulk water*. Laju difusi air permukaan secara signifikan lebih rendah daripada *bulk water*.

Semua produk hidrasi padat berbentuk kristal berukuran relatif besar. Kurtis, 2015 menggambarkan pertumbuhan produk hidrasi dan tahapan sifat beton seperti proses *setting*, pengerasan dan kekakuan dalam Gambar 3. Terdapat hubungan antara pertumbuhan produk hidrasi, bentuk struktur mikro dan tahapan sifat tersebut. Pada saat ettringite terbentuk, beton mengalami *setting* dan pengerasan yang diikuti peningkatan kekakuan. Pengerasan bertambah seiring meningkatnya produk hidrasi seperti C-S-H, CH, C-(AF)-H dan monosulfoaluminat (Gambar 3). Konversi ettringite ke monosulphoaluminate hanya terjadi pada abu terbang dengan kandungan SO<sub>3</sub> rendah (Wesche, 1991).



Gambar 3. Pertumbuhan produk hidrasi dan pori  
Kurtis, 2015

Struktur mikro produk hidrasi C-S-H, CH dan monosulfoaluminate disajikan pada Gambar 4. C-S-H ini meliputi 50-60% volume total, memiliki luas permukaan besar yaitu 100-700m<sup>2</sup>/gram. Karena menempati volume besar maka kualitas C-S-H menentukan perilaku deformasi terutama pada umur dini. Bentuk microscopis C-S-H bergantung pada molar rasio atau Ca/Si (Thomas dan Jennings, 2008). Kualitas C-S-H ditentukan oleh w/c. Bila w/c diturunkan dari 0.3 ke 0.26 hanya terjadi sedikit perubahan komposisi C-S-H gel, namun bila dinaikkan menjadi 0.46 terjadi perubahan komposisi yang berarti (Termkhajornkit, 2006). Untuk Ca/Si > 1.5, C-S-H berbentuk halus (Gambar 4B), sedang pada molar rasio rendah atau Ca/Si < 1.5 bentuk C-S-H seperti Gambar 4C.



Gambar 4. Struktur mikro produk hidrasi: (A) C-S-H model Feldman Sereda, (B) C-S-H dengan Ca/Si > 1.5, (C) C-S-H dengan Ca/Si ≤ 1.5, (D) CH, (E) Monosulfoaluminate

Keterangan Gambar 1A: ~ lapisan C-S-H, C: pori kapiler, x: air di interlayer (air terikat dengan ikatan covalent atau Van der Waals digambarkan dengan garis hijau), o: air terserap di permukaan (mudah bergerak)

Proses hidrasi dapat didekati sebagai konversi progresif dari air bebas dalam pori kapiler ke air terikat dalam produk hidrasi padat. Semua produk hidrasi mengandung air struktural atau terikat secara kimiawi. Air ini tidak berbentuk liquid. Gel C-S-H juga mengandung sejumlah air bebas dan air terserap dalam pori-pori gelnya, dan mengekang air pengikat lebih erat di dalam ruang *interlayer* atau *interpartikel*.

Air dalam produk hidrasi dapat disederhanakan atau terbagi dalam *bulk liquid* dan air struktural. Air pengikat ini menjamin produk hidrasi mengisi volume yang lebih besar daripada mineral-mineral semen (reaktan padat). *Bond stretching* membuat mekanisme gerakan air seperti mekanisme pompa dimana air keluar dari matriks atau skeleton padat. Air yang tidak terikat ke dalam pasta padat mempengaruhi transportasi ionic, susut kering dan rangkai.

#### II.4. Sistem dan Klasifikasi Pori

Distribusi ukuran pori dapat meliputi rentang yang lebar. Pori dengan ukuran  $\leq 0.5$  nm terbentuk di sela-sela gel C-S-H (Gambar 4A).

Pori ini terbentuk karena udara terjebak selama pencampuran atau pada proses *air-entrainment* yang bertujuan menyebar pori berdiameter 50nm agar lebih tahan terhadap pembekuan. Evolusi radius kapiler aktif sebagai fungsi derajat hidrasi menandakan adanya interaksi kuat antara ukuran *network* kapiler dan aktifitas kimia. Titik maksimal aktivitas kimia merupakan transisi antara klas pori 1 dan 2. Klasifikasi pori tercantum pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi pori

Tipe pori	Deskripsi	Ukuran	Kemampuan penguapan air	Teknik	Sifat
Kapiler	besar	10 $\mu$ m-50nm	mampu	SEM, OM	Kedap, kuat
	medium	50nm-10nm	Mampu menguapkan, menisci kuat	SEM	Kedap, kuat susut pada RH tinggi
Gel	kecil	10-2.5 nm	Mampu menguapkan, menisci kuat	Penyerapan/MIP/IS	Susut, RH 50 %
	pori mikro	2.5-0.5 nm	Tidak mampu menguapkan, tanpa menisci, interaksi molekuler		Susut, rangkai (RH 35-11%)
Ruang interlayer	struktural	< 0.5 nm	Tidak mampu menguapkan, ikatan ionic/ kovalen	Penyerapan/termal	Susut, rangkai RH < 11%
Lain-lain	ITZ	20-50 $\mu$ m	Bulk water	SEM/OM	Kedap, kuat
	Retak mikro	50-200 $\mu$ m	Bulk water	SEM/OM	Kedap, kuat
SEM: scanning electron microscopy; OM: optical microscopy, IS: impedance spectroscopy RH: relative humidity					

Terdapat dua klas pori yaitu antara 10-20 nm dimulai ketika material mencapai *solid hyperstatic state* dan kedua sekitar 1-2 nm (Morin dkk., 2002). Yang pertama berhubungan

dengan ruang pori cluster hidrat C-S-H yang kedua berhubungan dengan porositas internal hidrat. Pori > 10nm sering berada dalam beton.

## II.5. Lempung

Lempung yang merendam beton dapat berupa tanah alluvial dari endapan dengan energi rendah, saat aliran lambat. Endapan tersebut terdiri dari lempung, lanau, pasir (Hetty, 2019). Kalau pori beton dalam rentang 10 nm – 1000 nm, dan sesuai American Geophysical Union dalam Junaidi dan Restu, 2011 maka jenis butiran yang dapat masuk ke dalam pori beton adalah lempung sedang sampai sangat halus.

## III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan sebagian dari penelitian tentang degradasi beton karena pengaruh lingkungan. Kondisi beton tersebut adalah: terlindung, terendam lempung, basah, dan kering.

### III.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental yang merupakan studi kasus lantai *basement* RS PTN Universitas Lampung (Gambar 5).



Gambar 5. Beton *basement* terendam lempung

Gedung ini dihentikan pembangunannya sejak 2010, dan dikerjakan kembali tahun 2019.

Pengambilan sampel:

1. Sampel beton diambil dengan *core drill* sebanyak 4 buah untuk pengujian kuat tekan setiap kondisi. Penelitian ini ditekankan pada kondisi terendam tanah, dan terlindung.
2. Sampel dari kondisi tersebut diperiksa dengan *scanning electron microscopy* (SEM) untuk mengetahui kondisi struktur mikronya.

Lokasi pengujian:

Pengujian kuat tekan beton dilakukan di Laboratorium Beton Fakultas Teknik Universitas Lampung dan pengujian SEM dilakukan di Unit Pelaksana Teknis Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi Universitas Lampung (UPT LTSIT).

### III.2. Pengolahan data

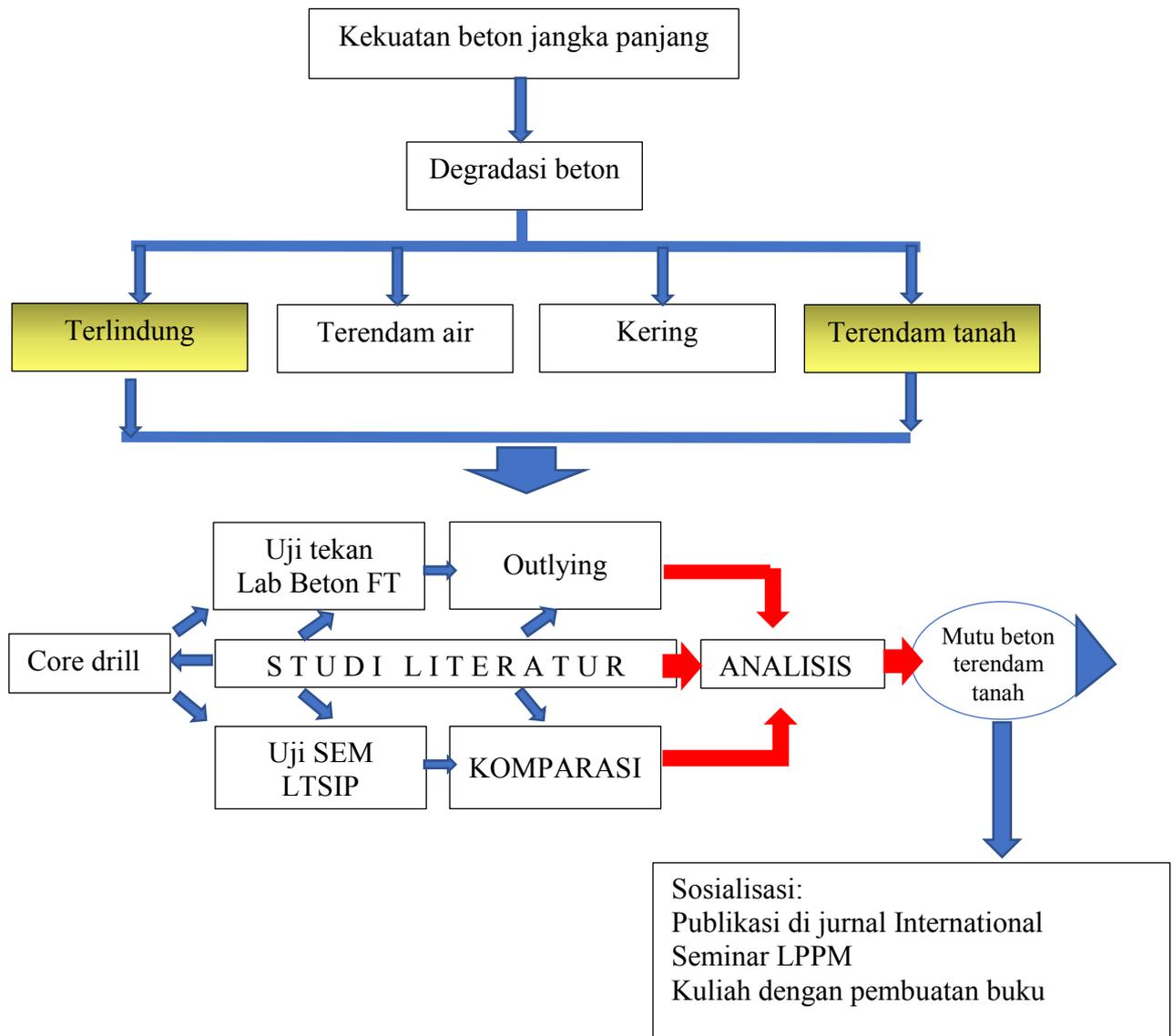
1. Data pengujian diolah dengan ASTM E178-02 *Standard practice for dealing with outlying observation*.
2. Struktur mikro kondisi terendam lempung dibandingkan dengan struktur mikro kondisi terlindung pada lokasi yang sama dan beton terlindung pada umumnya

Dari pengolahan data butir 2 diperoleh jenis produk hidrasi yang mengalami perubahan mikroskopis. Sifat utama produk hidrasi yang mengalami perubahan tersebut dipelajari.

Hasil pengolahan data butir 1 dan 2 diintegrasikan, dianalisis untuk dapat memperoleh evolusi struktur mikro beton karena penetrasi butiran tanah dan pengaruhnya pada kuat tekan beton.

### III.3. Bagan Penelitian

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian kekuatan beton jangka Panjang. Beton jangka Panjang akan mengalami degradasi karena berbagai hal seperti terendam air, terpapar sinar matahari penuh, basah atau terendam air dan terendam tanah (Gambar 6).



Gambar 6. Bagan penelitian keseluruhan

Keterangan: yang di blok diajukan pada proposal penelitian ini

#### IV. HASIL PENELITIAN

Mekanisme degradasi mikrostruktur beton terendam lumpur dan kuat tekannya telah diteliti. Penelitian dilakukan secara eksperimental di *basement* Rumah Sakit Pendidikan Universitas Lampung di Indonesia. Sampel diambil dengan menggunakan empat *core drill* di ruang bawah tanah dalam kondisi beton terlindung dan empat *core drill* beton terendam lumpur untuk pengujian kompresi. *Core drill* tersebut juga diambil untuk pengujian SEM dan EDX. Data kuat tekan diproses menggunakan ASTM E178-02. Data EDX untuk kedua jenis kondisi beton menggambarkan viskositas dinamis setiap unsur kimia yang terkandung dibandingkan dan dihubungkan dengan data EDX yang menyatakan massa atom dan SEM. Dari hubungan tersebut dicari mekanisme degradasi beton yang terendam lumpur dengan dukungan literatur.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan beton terendam lumpur selama 10 tahun, hanya 50% dari kuat tekan beton terlindung. Degradasi disebabkan oleh: oksidasi air permukaan yang menyertai perendaman lumpur, munculnya  $Fe^{3+}$  yang membuat perubahan struktur, peningkatan porositas; tekanan perendaman yang mengubah struktur atom dan densitas Ca serta penipisan portlandit yang kemudian diikuti dengan pelepasan Ca dari CSH.

#### IV.1. SUBMIT di JURNAL INTERNATIONAL

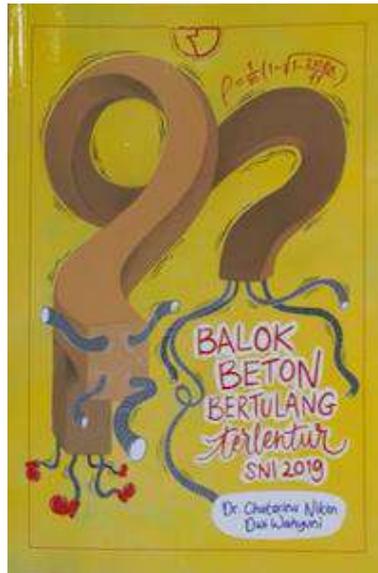
Hasil penelitian telah disubmit ke jurnal internasional terindeks SCOPUS dengan bukti Gambar 7.



Gambar 7. Bukti submit di jurnal internasional SCOPUS

#### IV.2. BUKU BALOK BETON BERTULANG TERLENTUR

Buku yang dihasilkan berjudul “Balok Beton Bertulang terlentur”, ISBN 978 623-231-974-5, 142 hal, 23 cm (Gambar 8a, b). Pengaruh penetrasi tanah, dimasukkan dalam Bab 1, Pengantar Umum, E yaitu tentang “Selimut Beton” halaman 16 (Gambar 9).

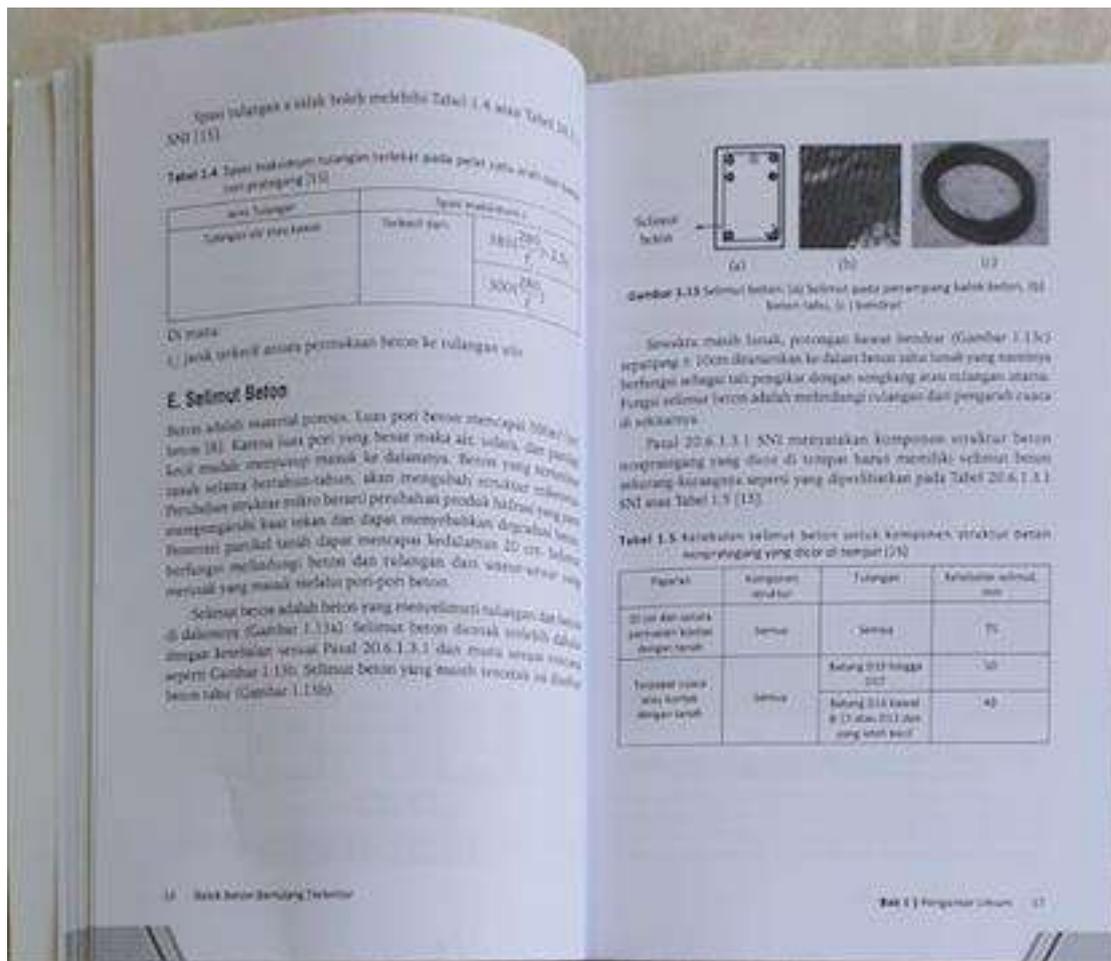


H. Jenis Keruntuhan	41
I. Tulangan Maksimum	42
J. Tulangan Minimum	43
K. Lenturan	44
L. Detail Penulangan	48
<b>BAB 3 BALOK TERLENTUR DENGAN TULANGAN TUNGGAL</b>	<b>59</b>
A. Pendahuluan	59
B. Momen Nominal	60
C. Desain Balok Beton Bertulang	64
D. Diagram Alir	69
E. Contoh Soal	71
<b>BAB 4 BALOK T</b>	<b>95</b>
A. Pendahuluan	95
C. Balok T Paku	98
D. Contoh Soal	98
E. Latihan	120
<b>BAB 5 BALOK BERTULANGAN RANGKAP</b>	<b>121</b>
A. Pendahuluan	121
B. Kekuatan Tulangan	123
C. Metode Perhitungan	124
D. Panjang Penyaluran Tendon	126
E. Contoh Soal	127
F. Latihan	137
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	<b>139</b>
<b>DAFTAR PENULIS</b>	<b>141</b>

A

B

Gambar 8. Sampul depan dan jumlah halaman



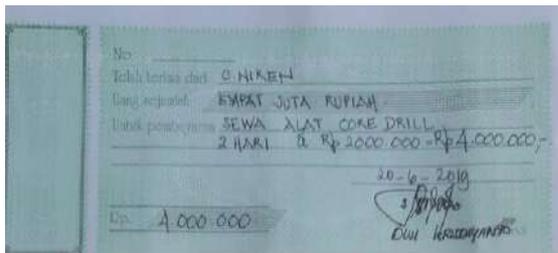
Gambar 9. Halaman yang menyatakan penetrasi tanah ke dalam beton

## V. BIAYA DAN JADWAL PENELITIAN

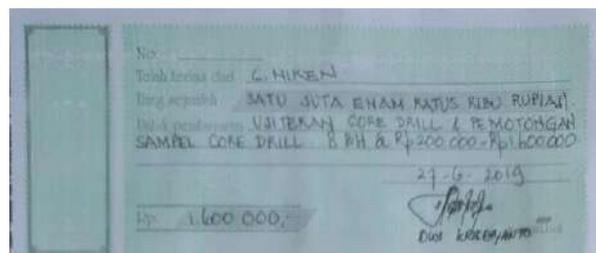
### IV.1. Biaya Penelitian

REKAPITULASI		
No	Jenis Pengeluaran	Jumlah, Rp
1	Pengadaan alat	6,700,000
2	Biaya perjalanan	9,400,000
3	Bahan habis pakai	10,691,000
4	Laporan/ Diseminasi/ Publikasi	23,728,510
<b>JUMLAH</b>		<b>50,519,510</b>

I PENGADAAN ALAT						
No	Jenis Pengeluaran	Kuantitas	Unit	Harga satuan x 1000, Rp	Jumlah Harga x 1000, Rp	Keterangan
1	Sewa alat core drill	2	hari	2000	4000	Nota 1.1
2	Uji tekan beton	8	buah	200	1600	Nota 1.2
3	Uji SEM	2	buah	550	1100	Nota 1.3
<b>Jumlah</b>					<b>6700</b>	



Nota 1.1

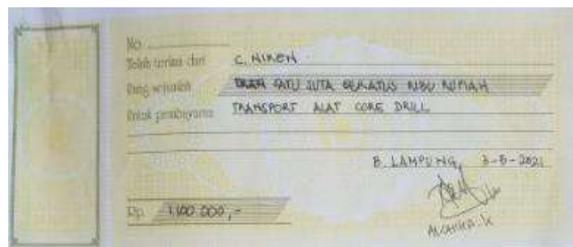


Nota 1.2



Pada penelitian ini hanya 2 sampel yang dimintakan dana (Nota 1.3)

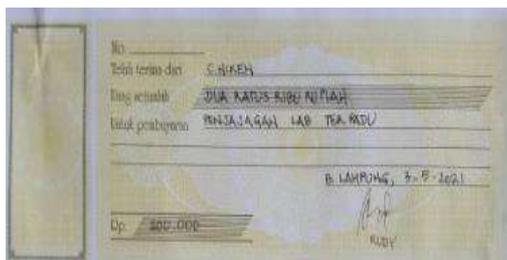
II BIAAYA PERJALANAN						
No	Jenis Pengeluaran	Kuantitas	Satuan	Jumlah harga x 1000, Rp	Jumlah harga x 1000, Rp	Keterangan
1	Transport alat <i>core drill</i>	2	kali	550	1100	Nota 2.1
2	Transport penjajagan Lab terpadu	2.4	orang, hari	100	800	Nota 2.2
3	Transport tenaga <i>core drill</i> ambil sample	4.2	orang, hari	300	2400	Nota 2.3
4	Transport tenaga <i>core drill</i> penjajagan	2	orang, hari	100	200	Nota 2.4
5	Transport peneliti <i>core drill</i>	2	4x	100	800	Nota 2.5
6	Transport tenaga uji tekan	2	kali	100	200	Nota 2.6
7	Transport peneliti uji tekan & ambil sampel	2	kali	200	400	Nota 2.7
8	Transport staff	6	bulan	450	2700	Nota 2.8
9	Transport <i>survey</i> pendahuluan	4	orang	100	400	Nota 2.9
10	Transport <i>survey</i> dengan tenaga <i>core drill</i>	4	orang	100	400	Nota 2.10
Jumlah					9400	



Nota 2.1



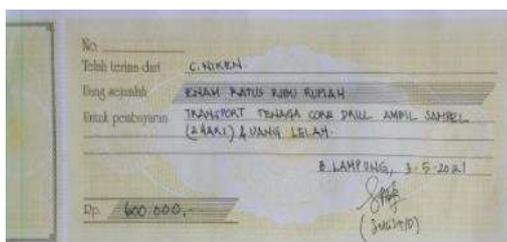
Nota 2.2



Nota 2.2



Nota 2.2



Nota 2.3



Nota 2.3



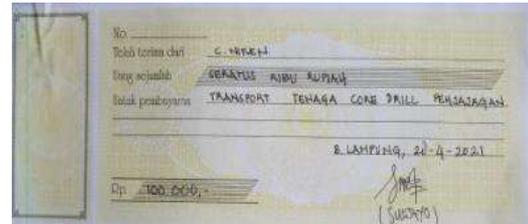
Nota 2.3



Nota 2.3



Nota 2.4



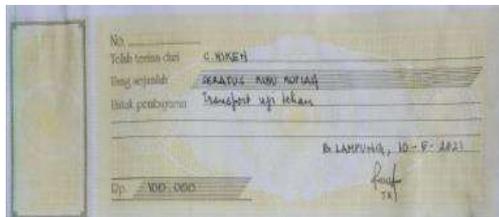
Nota 2.4



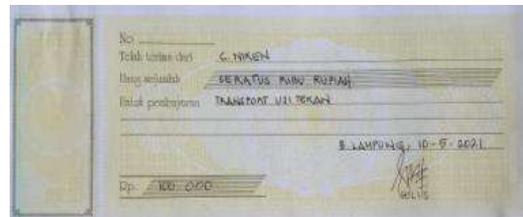
Nota 2.5



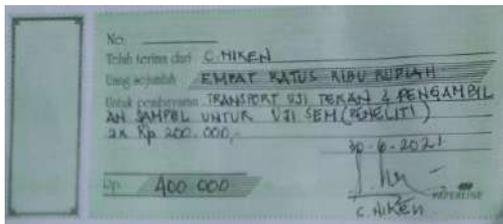
Nota 2.5



Nota 2.6



Nota 2.6



Nota 2.7



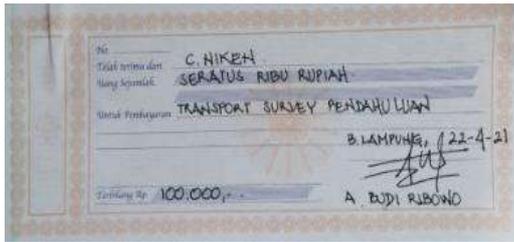
Nota 2.8



Nota 2.9



Nota 2.9



Nota 2.9



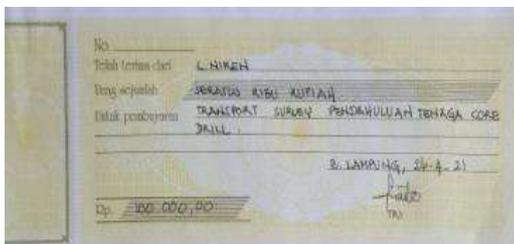
Nota 2.9



Nota 2.10



Nota 2.10



Nota 2.10



Nota 2.10

III BAHAN HABIS PAKAI

No	Jenis Pengeluaran	Kuantitas	Satuan	Frequensi	Satuan	Waktu	Satuan	Jumlah harga x 1000, Rp	Jumlah harga x 1000, Rp	Keterangan
1	Makan minum Staf pengetik buku									
	Aqua	1	dus			6	bulan	49.5	297	Nota 3.1
	Makan 21 hari pertama	1	orang	2	kali	21	hari	22	968	Nota 3.1.1, lebih 2 bks untuk pesuruh
	Makan 21 hari kedua	1	orang	2	kali	21	hari	22	968	Nota 3.1.2, lebih 2 bks untuk pesuruh
	Makan 21 hari ketiga	1	orang	2	kali	21	hari	22	968	Nota 3.1.3, lebih 2 bks untuk pesuruh
	Makan 21 hari keempat	1	orang	2	kali	21	hari	22	968	Nota 3.4, lebih 2 bks untuk pesuruh
	Makan 21 hari kelima	1	orang	2	kali	21	hari	22	968	Nota 3.5, lebih 2 bks untuk pesuruh
	Makan 21 hari keenam	1	orang	2	kali	21	hari	22	968	Nota 3.6, lebih 2 bks untuk pesuruh
2	Makan petugas core drill									
	Makan siang	6	orang	2	hari			200	400	Nota 3.2
	Camilan dan kopi sore	6	orang	2	hari			101	202	Nota 3.2
3	Makan penganalisis	2	orang	2	kali	30	hari	25	3000	Nota 3.3
4	Makan pembuat paper dan laporan	1	orang	2	kali	14	hari	25	700	Nota 3.4
5	Makan survey pendahuluan	4	orang					25	100	Nota 3.5
6	Makan survey dengan tenaga core drill	4	orang					25	100	Nota 3.6
7	Meterai	7	buah					12	84	Nota 3.7
	Jumlah								10691	

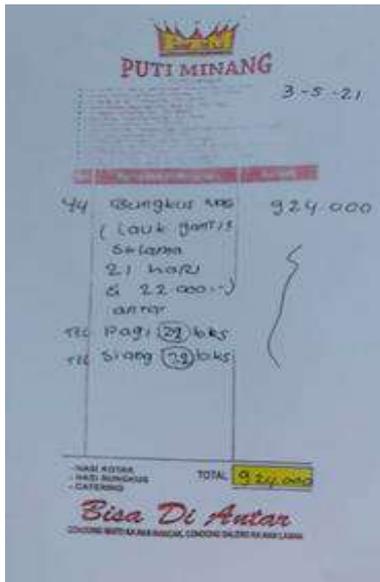
Makan-minum staf:



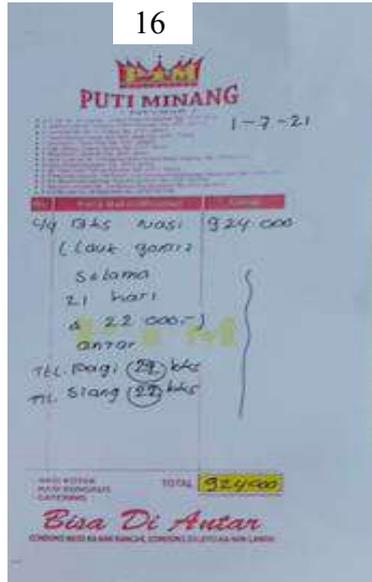
Nota 3.1.



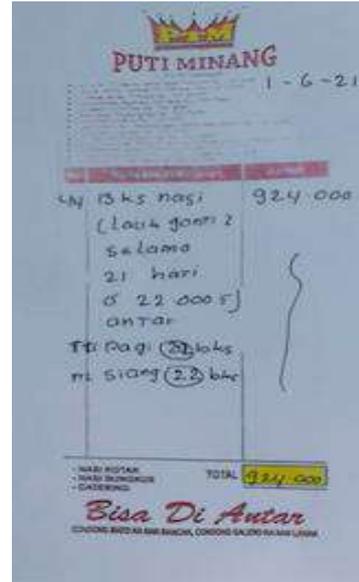
Nota 3.1



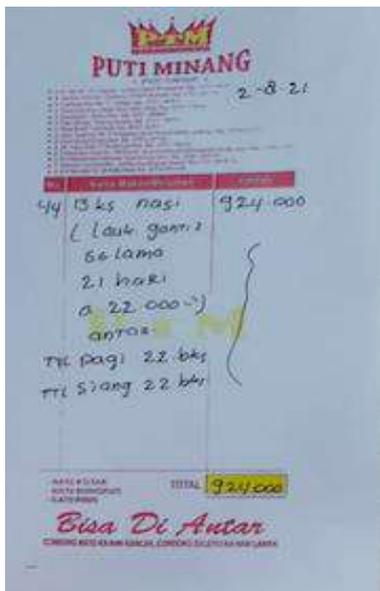
Nota 3.1.1.



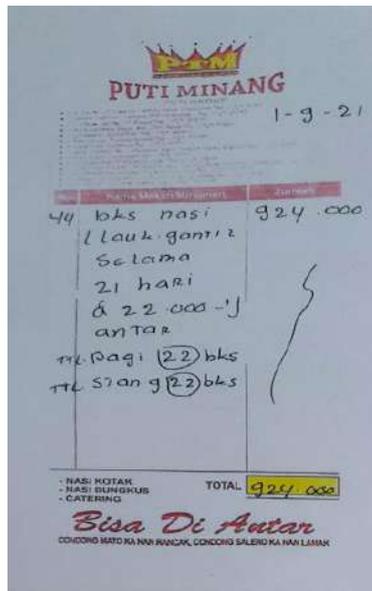
Nota 3.1.2.



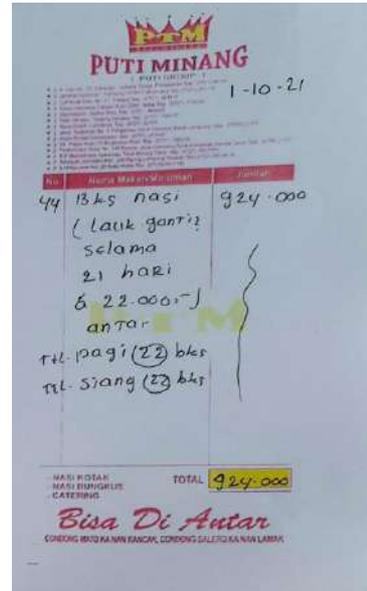
Nota 3.1.3



Nota 3.1.4



Nota 3.1.5.



Nota 3.1.6

Makan petugas core drill

Tgl: 21-6-2021

NO	Uraian	BARANG	JUMLAH	JUMLAH
6	laku ganti	2000	10	20.000
6	laku ganti	1000	20	20.000
6	laku	1000	25	25.000

Jumlah Rp. 100.000

Nota 3.2

Tgl: 21 Juni 2021

NO	Uraian	BARANG	JUMLAH	JUMLAH
6	GORENGAN	20.000		
6	ARUA	6000	36000	
6	Kopi	2500	45000	

Jumlah Rp. 101.000

Nota 3.2.

Tgl: 22 Jun 2021

NO	Uraian	BARANG	JUMLAH	JUMLAH
6	laku ganti	120.000		
6	laku ganti	30.000		
6	laku	24.000		

Jumlah Rp. 100.000

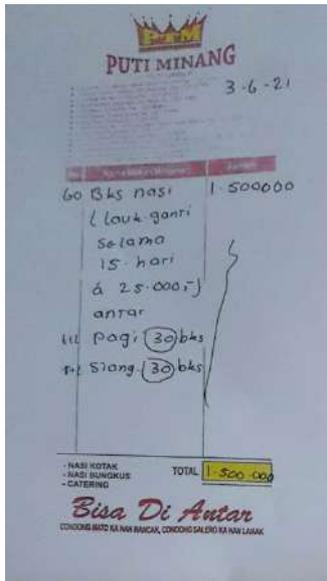
Nota 3.2.

Tgl: 22-6-2021

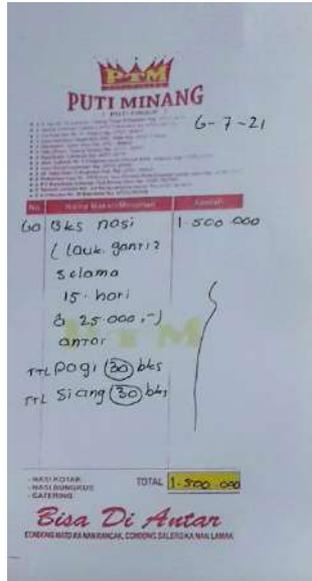
NO	Uraian	BARANG	JUMLAH	JUMLAH
6	laku ganti	6000	20	20.000
6	laku ganti	1000	40	40.000
6	laku	1000	20	20.000

Jumlah Rp. 100.000

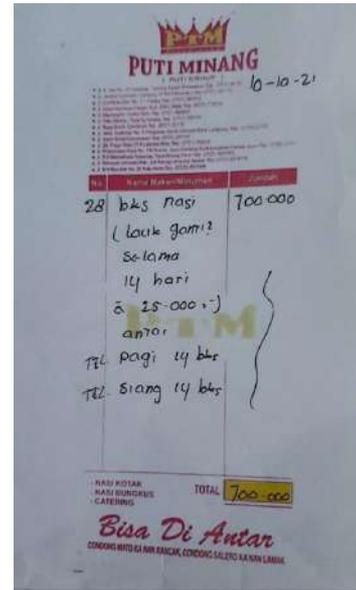
Nota 3.2



Nota 3.3



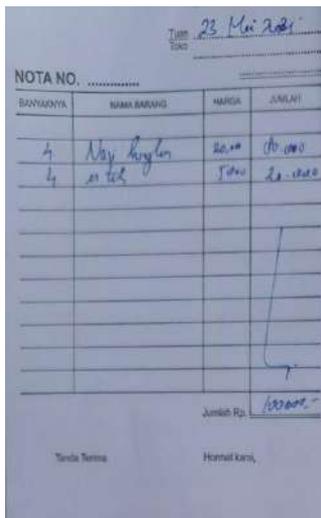
Nota 3.3



Nota 3.4

Survey pendahuluan

Survey dengan tenaga core drill



Nota 3.5



Nota 3.6



Nota 3.7

IV LAPORAN/ DISEMINASI/ PUBLIKASI								
No	Uraian	Kuantitas	Unit	Kuantitas	Unit	Harga Satuan, Rp x 1000	Jumlah Harga, Rp x 1000	Keterangan
1	Proofread			1	kali		1,784	Nota 4.1
2	Publikasi			1	kali		7,769	Nota 4.2
3	Penulisan buku Balok Beton Bertulang Terlentur			143	hal	10	1,430	Nota 4.3
4	Koreksi Buku Balok Beton Terlentur	4	kali	143	hal	8	4,576	Nota 4.4
5	Desain sampul buku	1	kali			1,500	1,500	Nota 4.5
6	Penerbitan Buku						6,500	Nota 4.6
7	Pembuatan laporan			17	hal	10	170	Nota 4.7
Jumlah							23,729	

Proofread

Publikasi

Transaksi Berhasil		Transaksi Berhasil	
Rekening Tujuan	136303894	Rekening Tujuan	136303894
Nama Penerima	LEBI - FIB UI LEMBAGA	Nama Penerima	LEBI - FIB UI LEMBAGA
Tanggal Transaksi	01-07-2021	Tanggal Transaksi	14-07-2021
Waktu Transaksi	10:51:19 WIB	Waktu Transaksi	19:34:22 WIB
Email Penerima		Email Penerima	chatarinaniken@yahoo.com
Bank Tujuan	BNI	Bank Tujuan	BNI
Nama Pengirim	CH NIKEN DWI WAHYUNI	Nama Pengirim	CH NIKEN DWI WAHYUNI
Nominal	1.000.000	Nominal	783.760
Fee	0	Fee	0
<b>Total</b>	<b>1.000.000</b>	<b>Total</b>	<b>783.760</b>
Keterangan	DP proof reading	Keterangan	Pelurusan proofreading

Nota 4.1

Nota 4.1



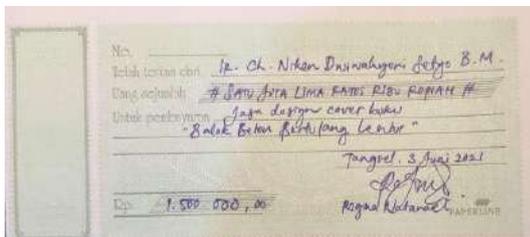
Nota 4.2



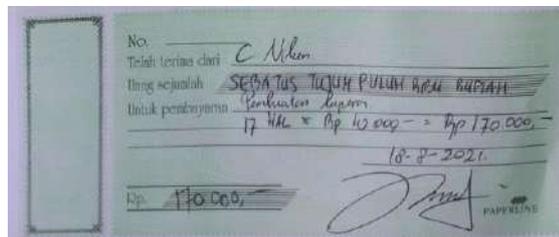
Nota 4.3



Nota 4.4



Nota 4.5



Nota 4.7



Nota 4.6

## V.2. Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	Bulan ke					
		1	2	3	4	5	6
1	Survey pendahuluan	-					
2	Survey dengan petugas <i>core drill</i>	-					
3	Penjajagan ke Lab Terpadu	-					
4	Pengambilan sampel <i>core drill</i>	-					
5	Pengambilan sampel untuk SEM	-					
6	Pengujian tekan	-					
7	Pengujian SEM			-			
8	Analisis data uji tekan			-			
9	Analisis data SEM			-			
10	Integrasi butir 8 & 9				-		
11	Studi literatur	-	-	-	-	-	-
12	Pembuatan <i>paper</i>					-	
13	<i>Proff read</i>					-	
14	Submit						-
15	Penulisan buku Balok Beton	-	-	-	-	-	-
16	Penulisan laporan						-

### Referensi:

1. SNI 03-1750-1990. Agregat beton, mutu dan cara uji. Badan Standardisasi Nasional.
2. SNI 2847, 2019. Persyaratan beton structural untuk bangunan Gedung dan penjelasan. Badan Standardisasi Nasional
3. Tanggul jebol, PT PPI di Sidoarjo terendam lumpur 3,5 meter. (2009, Maret 10) Kompas
4. Jalan beton di Semerap terendam air bercampur lumpur, kondisi jalan menjadi licin. (2018, Meret 18). Suara Kerinci.
5. Sha, O.B.M, Remya, C.P., Salja, P.A., & Shifal, K.S. (2016). Red mud concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 02.04. 2582-2585.
6. Venkatesh, C., Ruben, N., & Chand, M.S.R. (2020). Red mud as an additive in concrete: comprehensive characterization. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 57, 281-289.
7. Tang, W.C., Wang, Z., Donne, S.W., Forghani, M., & Liu, Y. (2019). Influence of red mud on mechanical and durability performance of self-compacting concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 379.
8. Sathy, K., Sitha, R.K., Barpanda, S., & Bhoi, B.R. (2019). *Experimental investigation of strength properties of red mud concrete*. AIP Conference Proceeding 2158, 020015.
9. Siregar, S.H., Ismeddiyanto, & Djauhari, Z. (2019). Pengaruh penggunaan soil stabilization terhadap sifat fisik beton dengan agregat halus berkadar lumpur tinggi. *JOM FTEKNIK*, 6. 1, 1-9.

10. Ottos, C.G., & Nyebuchi, D. (2018). Laboratory investigation of the effect of Chikoko mud on compressive strength of Portland cement concrete. *International Journal of New Technology and Research*, 4.3, 78-80.
11. Shetty, K.K., Nayak, G., & Vijayan, V. (2014). Effect of red mud and iron ore tailings on the strength of self-compacting concrete. *European Scientific Journal*, 10.21, 168-176.
12. Rathod, R.R., Suryawanshi, N. T., & Memade, P.D. (2013). Evaluation of the properties of red mud concrete. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. Second International Conference on Emerging Trends in Engineering (SICETE), Jaysingpur, India 31-34.
13. Hardjito, D., Antoni, Suryawangi, E., & Takarendehang. (2013, Agustus). *Development of volcanic mud-based geopolymer artificial aggregate*. The sixth Civil Engineering Conference in Asia Region (CECAR-6), Agustus, Jakarta, Indonesia.
14. Ribeiro, D.V., Labrincha, J.A., & Morelli, M.R. (2012). Effect of red mud on the corrosion parameters of reinforced concrete evaluated by electrochemical methods. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, 5 2.
15. Lianasari, A.E., & Sarira, M.K. (2019). Kajian penggunaan lumpur Sidoharjo sebagai filler terhadap karakteristik self-compacting concrete. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 23.1, 26-36.
16. Ekaputri, J.J., & Triwulan. (2011). Geopolymer concrete using fly ash, trass, Sidoarjo mud mased material. *ITS Journal of Civil Engineering*, 31.2, 57-63.
17. Bowoputro, H., Indriastuti A.K., Hatta, A.F., 2009. Pengaruh temperature dan perendaman lumpur Lapindo terhadap nilai stabilitas campuran aspal beton. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 3.3, 237-245.
18. Bazant, Z.P. & Wittmann F.H. (1982). Creep and shrinkage in concrete structures. John Wiley & Sons, Chichester.
19. Kurtis, K. (2015). *Portland Cement Hydration*. [Video]. School of Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia. pp. 1- 35.  
Available online at: <http://fliphtml5.com/xtto/ogts/basic>
20. Holzer, L., Gasser, P., & Muench, B. (2006). Quantification of Capillary Pores and Hadley Grains in Cement Paste using FIB-Nanotomography. *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties* (pp 509-516). Springer, 509-516
21. Morin, V., Cohen-Tenoudji, F., Feylessoufi, A., & Richard, P. (2002). Evolution of the capillary network in a reactive powder concrete during hydration process, *Cem. Concr. Res. Journal*. 32, 1907-1914.
22. Wesche. K. (1991). Fly ash in concrete. Rilem Report 7. E.FN Spon. Chapman & Hall, New York.
23. Thomas, J., & Jenning, H. (2008). The science of concrete. American Concrete Association, Center for Advanced Concrete Based Materials Research.
24. Termkhajornkit, P. & Nawa, T. (2006, Nov). *A Study of composition of C-S-H gel in cement paste*. Recent Development of Concrete Technology and Structure, 2<sup>nd</sup> ACF International Conference.
25. Hetty, S. (2019). Sifat-sifat tanah. Balai BHGK, PUSAIR, Bandung
26. ASTM E178-02 (2002). Standard practice for dealing with outlying observation, American Society for Testing and Materials, 1-18.