

Perkuatan Struktur Beton dengan Tulangan Eksternal Menggunakan CFRP, Material dan Metoda



Han Ay Lie dan Sri Tudjono

Guru Besar, Fakultas Teknik Jurusan Sipil
Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia



hanaylie@live.undip.ac.id, tudjono@gmail.com
<https://hanaylie.id/>



Filsafat di Balik Teknologi



I. Latar Belakang

Bencana alam merubah paradigma dan koridor pemikiran tentang keamanan struktur beton

Tahun 2004 **mega-tsunami** menghantam Aceh, diikuti **gempa** di Klaten tahun 2006. kemudian, Lombok dan Gorontalo

Kerugian finansial besar, dengan korban nyawa yang sangat banyak pula



Aceh, sebelum tsunami



Yogyakarta, 26 Nopember 2020



Mujijat? atau ada penjelasan ilmiah?



Banda Aceh





*St. Paul's Cathedral
UK, WWII*





- Manusia menggunakan **material lebih bagus, struktur lebih kuat** dengan **faktor keamanan lebih tinggi** untuk **bangunan ibadah**
- **Spesifikasi** materials dan design umumnya **terpenuhi**
- **“Penyimpangan”** yang terjadi sedikit

Kita dapat menentukan kriteria perencanaan sesuai kebutuhan!





II. Tinjauan terhadap modifikasi SNI

Setelah 2006, kriteria perencanaan bangunan beton bertulang akibat gempa berubah signifikan

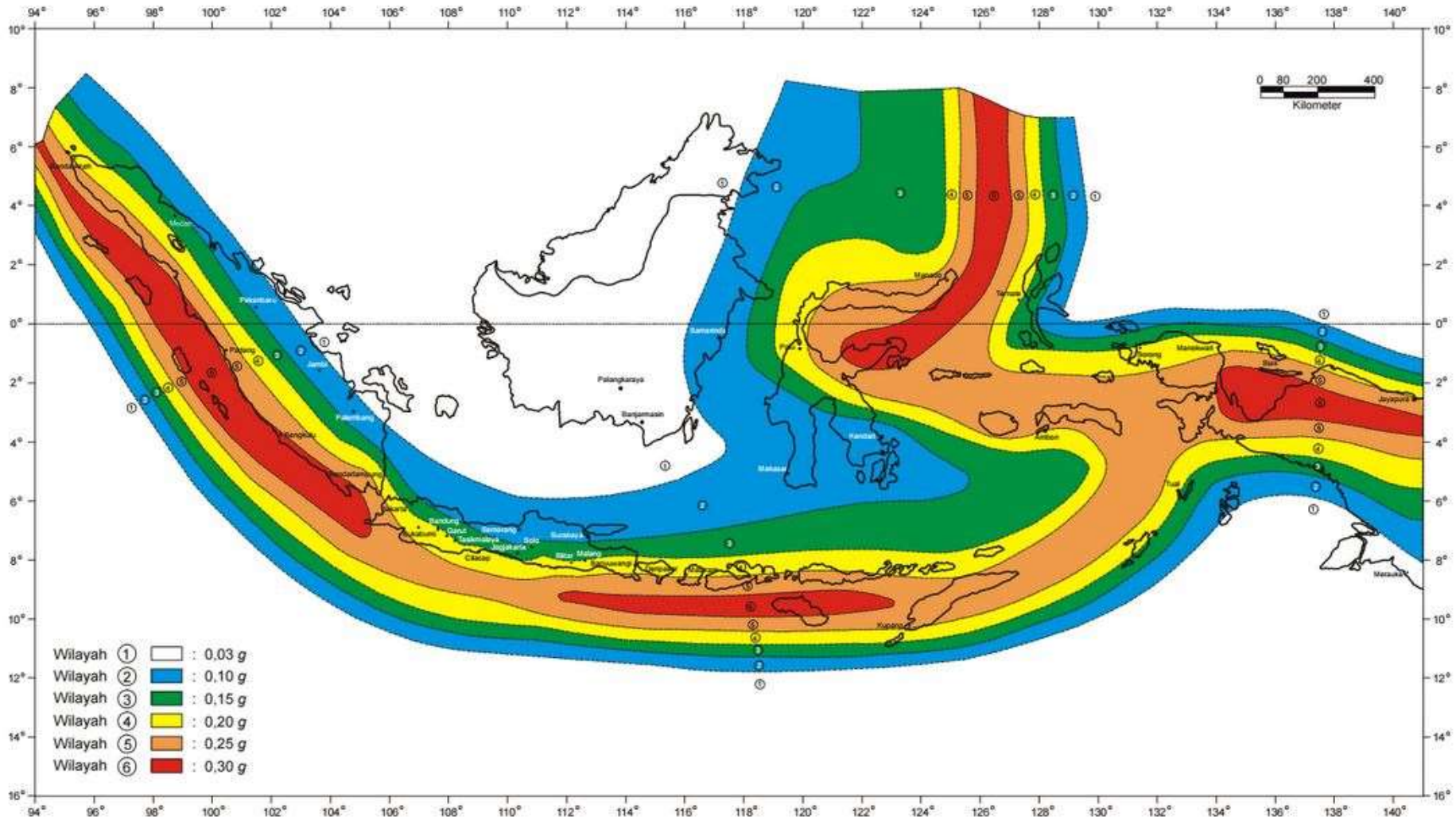
Perubahan **SNI 2847-2002** menjadi **SNI 2847-2013** dan sudah diperbaharui pada tahun **2019** pada dasarnya menuntut **kinerja yang lebih tinggi**, baik dari segi pembebanan maupun perilaku

Dasar perubahan ini berasal dari **perubahan peta zona gempa**, dan perlakuan **pengaruh beban gempa pada beban mati**





SNI 1726:2019



SNI 2009



Yogyakarta, 26 Nopember 2020



Masalah dan Solusi





Struktur beton yang direncanakan berdasarkan **SNI 2002 tidak memenuhi kriteria SNI 2019**

Solusi tanpa pembongkaran:
Penulangan Eksternal

- 1. Peningkatan kapasitas pemikulan balok yang operasional hingga memenuhi SNI 2019*
- 2. Revitalisasi gelagar yang collaps*







III. Konsep dasar

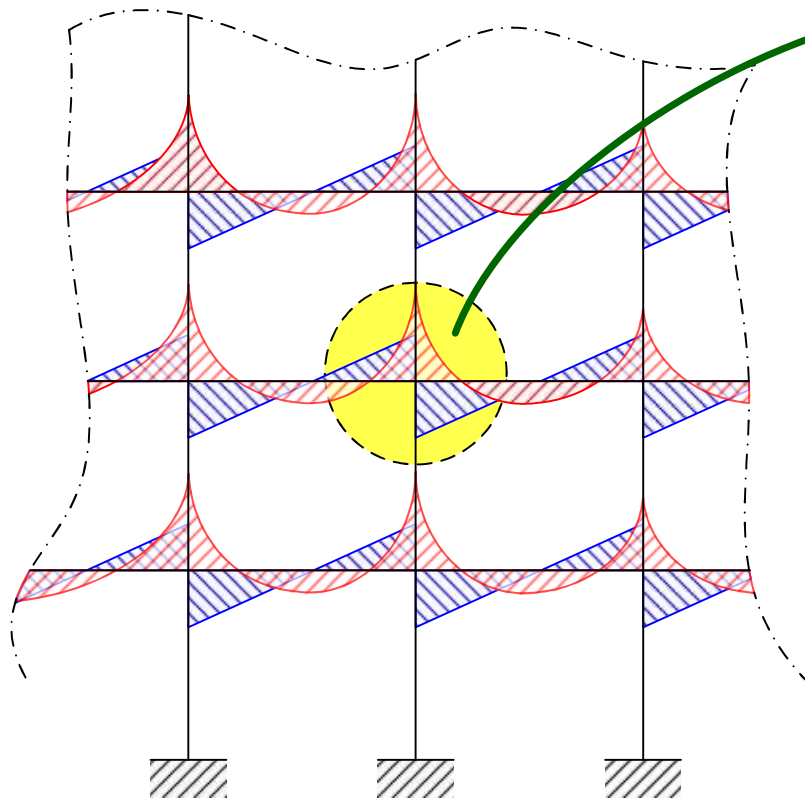
Evaluasi dilakukan melalui uji eksperimental full-scale di *Laboratorium Bahan dan Konstruksi, Undip*

1. Perkuatan eksternal balok-T dengan CFRP bentuk **sheet, rod, string** dan **pelat**
2. Evaluasi **perlakuan permukaan beton** paska CFRP
3. Pengamatan respon pengaruh kedalaman penanaman **rod**
4. **Revitalisasi** gelagar yang runtuh melalui retrofitting dan perkuatan eksternal geser dan lentur

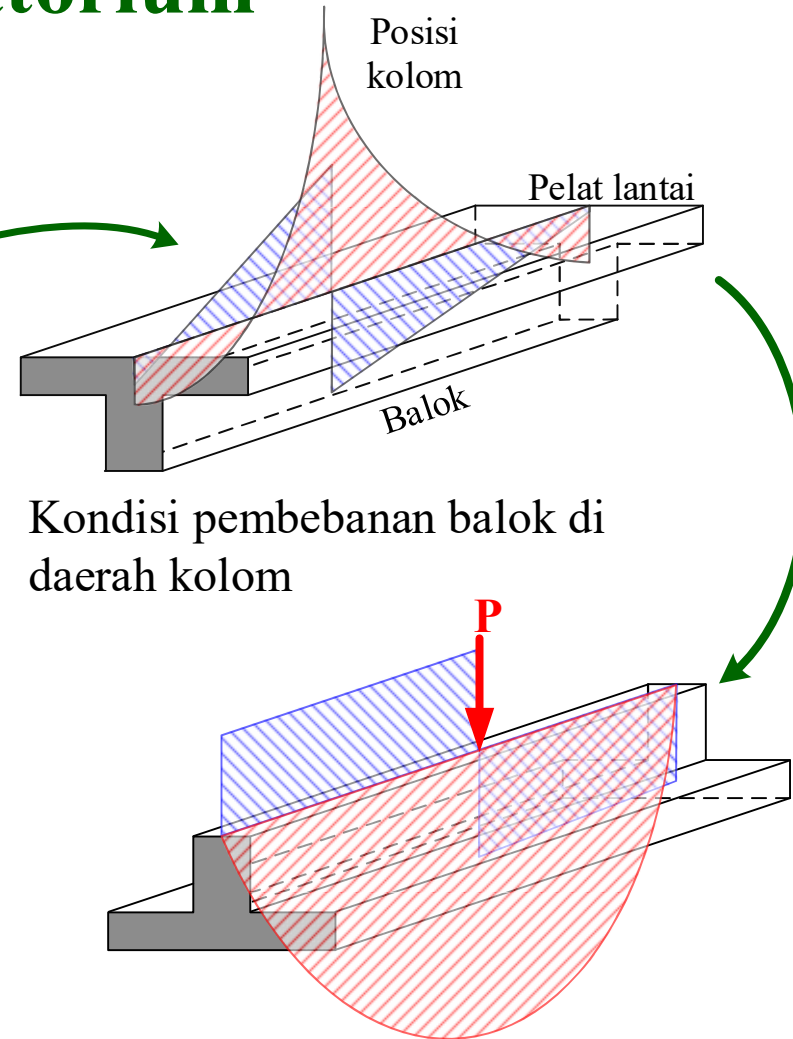


IV. Simulasi di Laboratorium

-  Bidang momen akibat beban tetap
-  Bidang geser akibat gempa



Distribusi momen lengkung dan geser pada balok

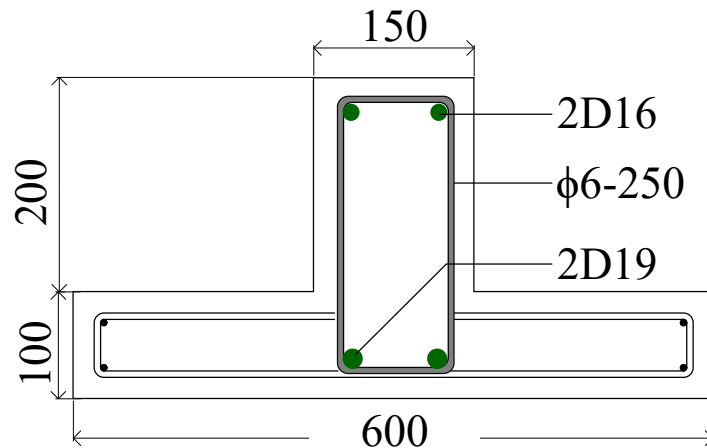


Kondisi pembebanan balok di daerah kolom

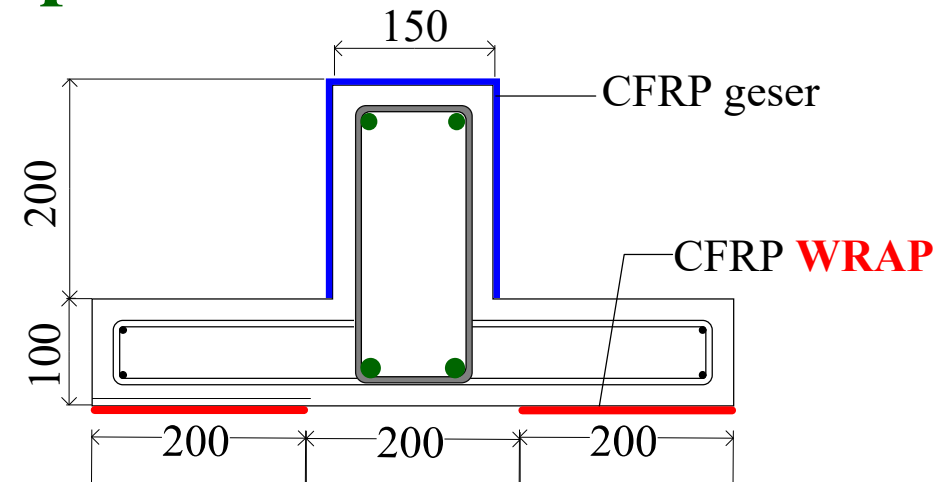
Uji eksperimental (*Balok diputar 180°*)



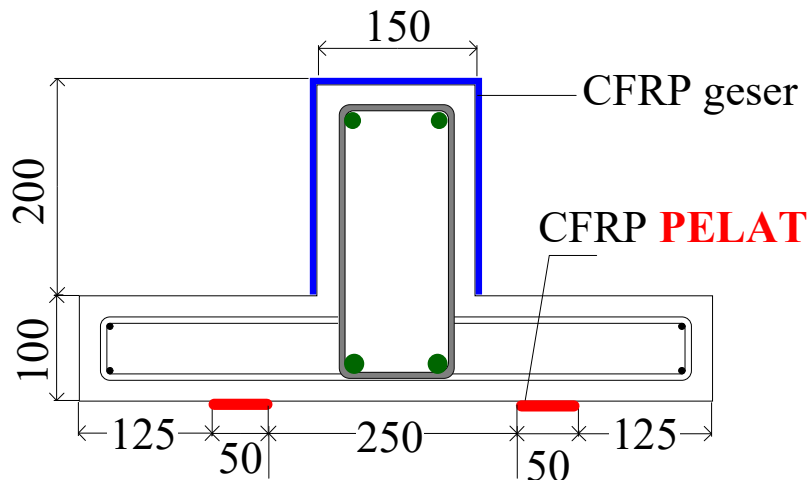
v. Benda uji dan test set up



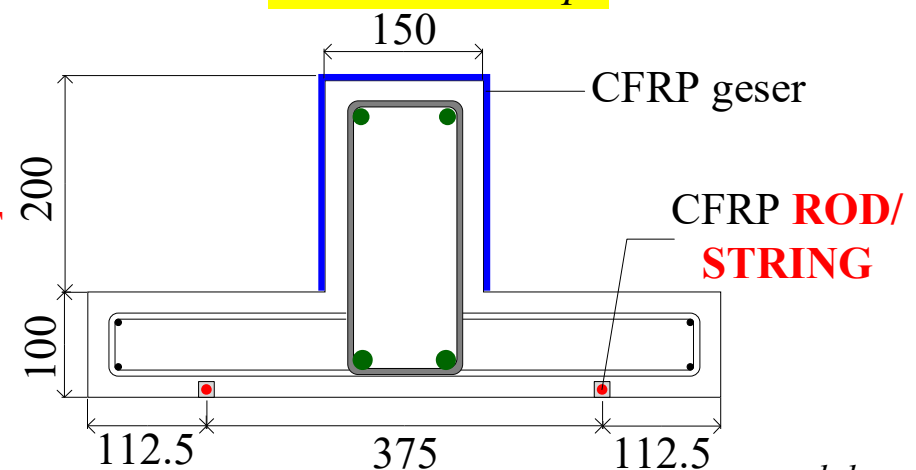
SNI 2002



Perkuatan Wrap

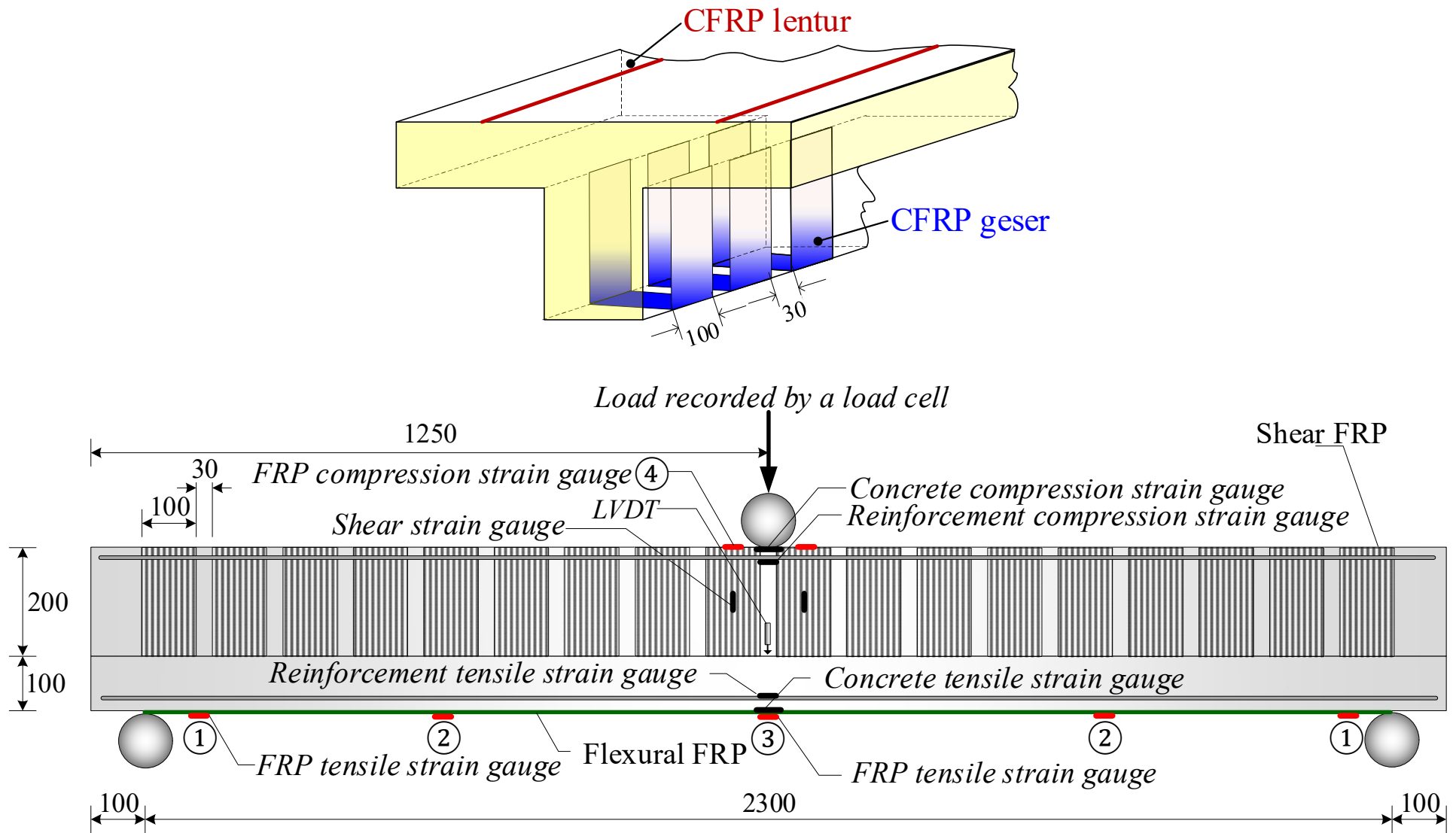


Perkuatan Pelat



Perkuatan Rod/String

dalam mm



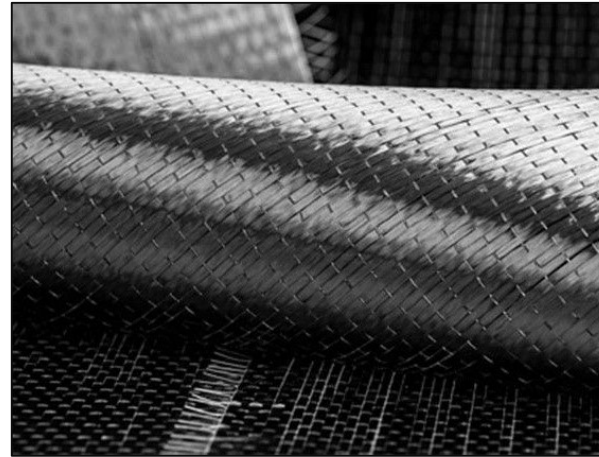
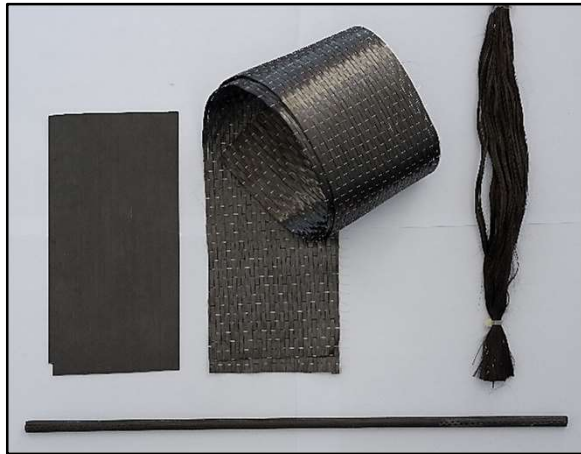


Benda uji di Laboratorium





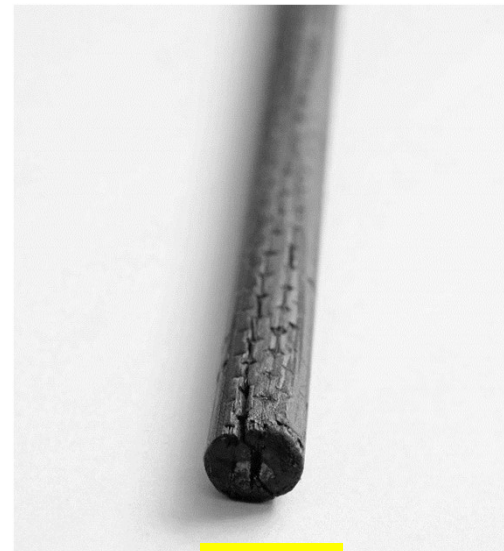
Wrap (sheet), string, rod dan pelat



Wrap



String



Rod



Plate



Detail metoda pemasangan

<i>Jenis CFRP</i>	<i>Wrap</i>	<i>String</i>	<i>Rod</i>	<i>Plate</i>
EBR	√			√
NSM		√	√	
Pre-preg			√	√
Wet lay-up	√	√		

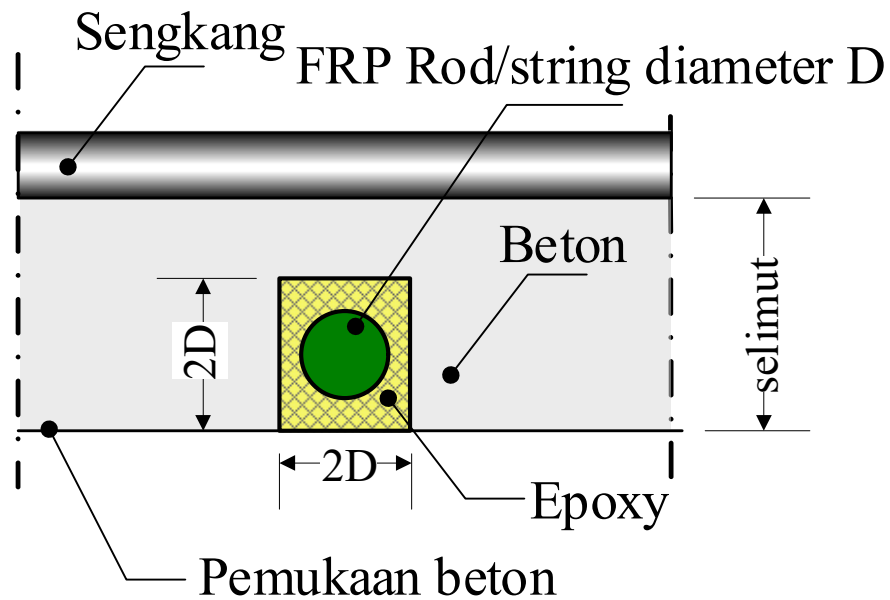
EBR : Externally Bonded Reinforcement

NSM : Near Surface Mounted

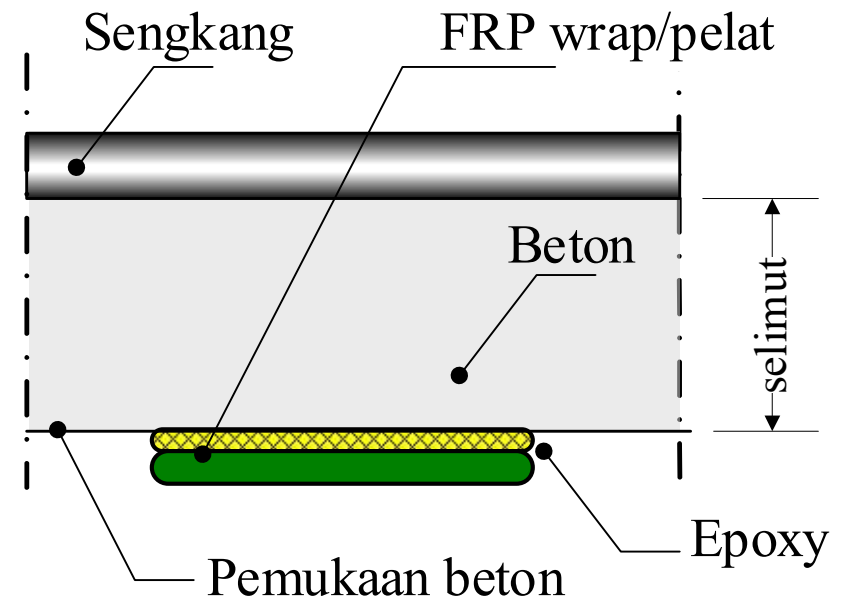
Pre-preg : CFRP di impregnasi dan pultrusi di pabrik

Wet lay-up : Impregnasi dan pultrusi dilakukan di lapangan

EBR versus NSM



NSM



EBR



Pre-preg versus pultrusi di lapangan



Pultrusi di lapangan

Pre-preg





Tantangan: De-bonding dan Selimut Beton





De-bonding

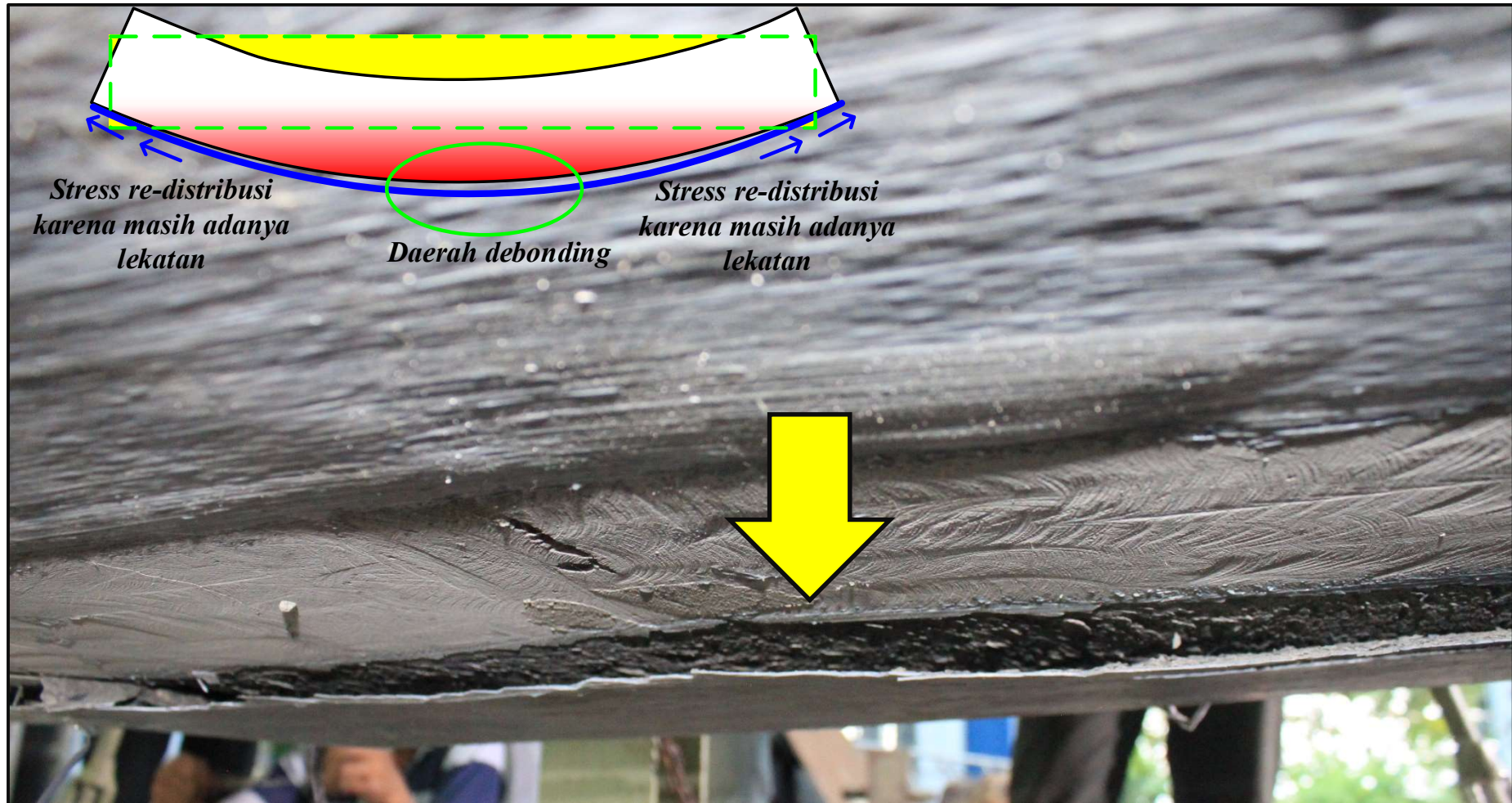
Pada wrap dan pelat (EBR), kegagalan di tandai oleh *lepasnya lekatan (de-bonding)* antara CFRP dengan beton di antarmuka

Disimpulkan bahwa perlakuan permukaan beton dengan penggerindaan sedalam 4 mm diikuti dengan *sand-blasting* sesuai saran produsen **tidak dapat mencegah de-bonding**

System tidak optimal!



De-bonding interfasa antara CFRP dengan beton

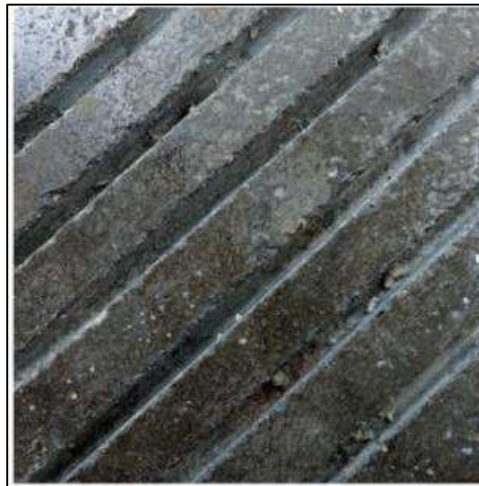




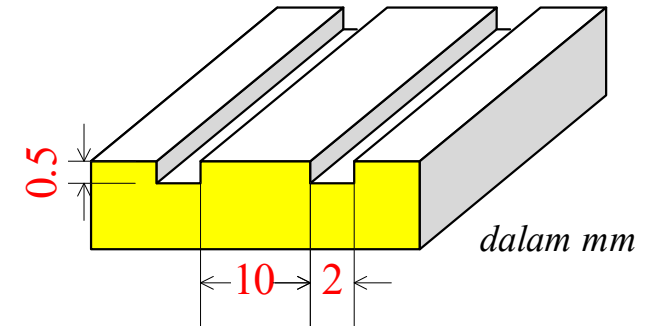
Perbaikan perlakuan permukaan



Tegak lurus beban



Diagonal



Silang



Sejajar beban





Hasil pengujian



Tanpa perawatan
Kegagalan de-bonding



Dengan perawatan
Kehancuran pada beton



Bidang lekatan CFRP diberi pangkasaran





Sand blasting untuk membersihkan alur





Pengetrapan *epoxy bonding agent*





Pemasangan *Wrap*



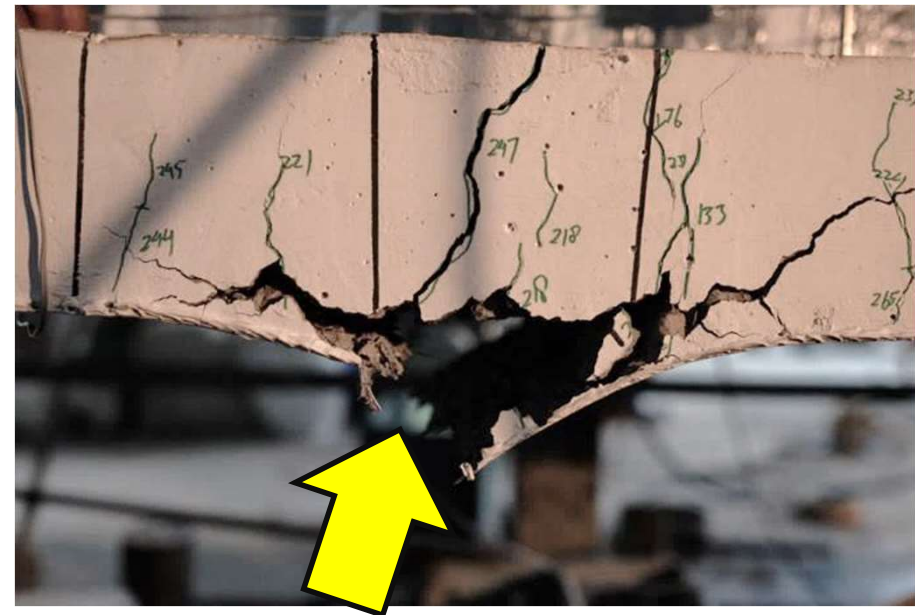
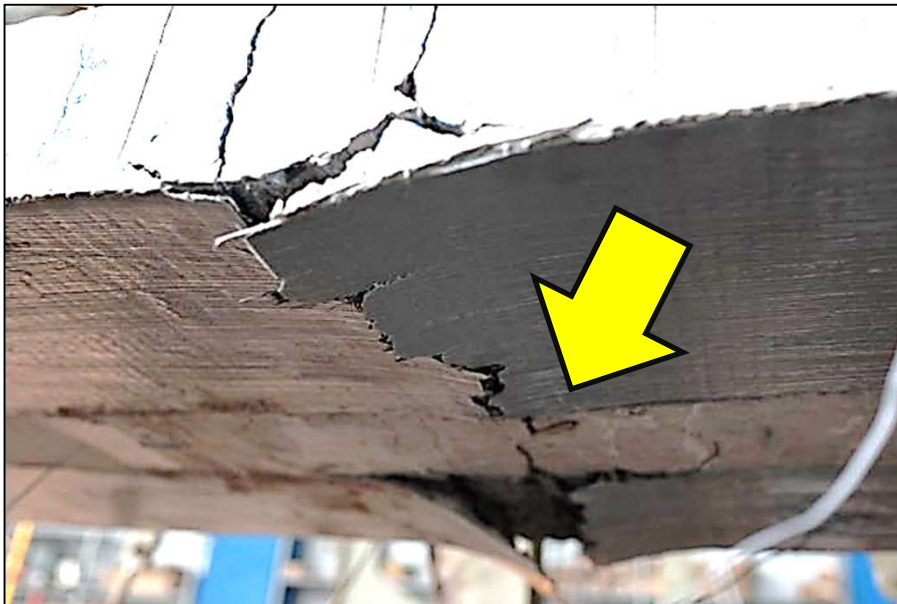


Surface coating



Yogyakarta, 26 Nopember 2020

Keruntuhan beralih dari de-bonding menjadi robeknya CFRP wrap





Selimut Beton

Kedalaman penanaman seperti yang disarankan dalam ACI 440 (NSM) sedalam 1.5 diameter *tidak tercapai*

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh kedalaman penanaman NSM dalam beton





Penanaman sesuai ACI 440



Penanaman $\frac{1}{2} D$





*Bagaimana dengan balok **retak**
yang belum collaps?*





Tahap V: Retrofitting dan Penulangan Eksternal

Balok diluruskan dengan hydraulic jack





Penempatan *packers* pada retakan





Retrofitting dengan metoda injeksi *low viscosity epoxy resin*



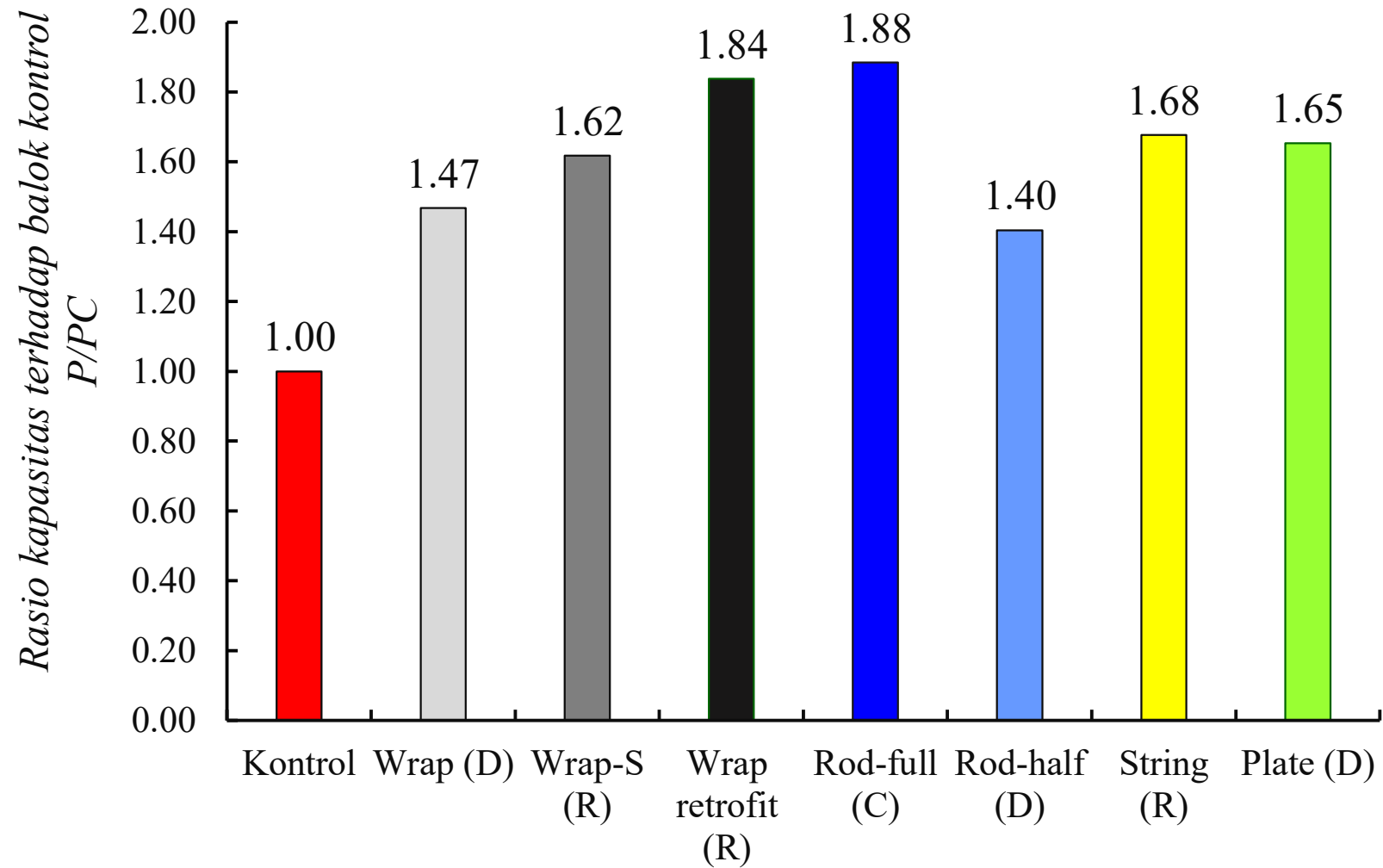


Evaluasi





Kapasitas pemikulan dan Pola Keruntuhan



Type perkuatan CFRP





Wrap-EBR



Rod-NSM-pre-preg



Plate-EBR-pre-preg

***De-bonding: CFRP wrap-s,
rod-half, pelat***





Wrap-EBR-surface
treatment



String-NSM

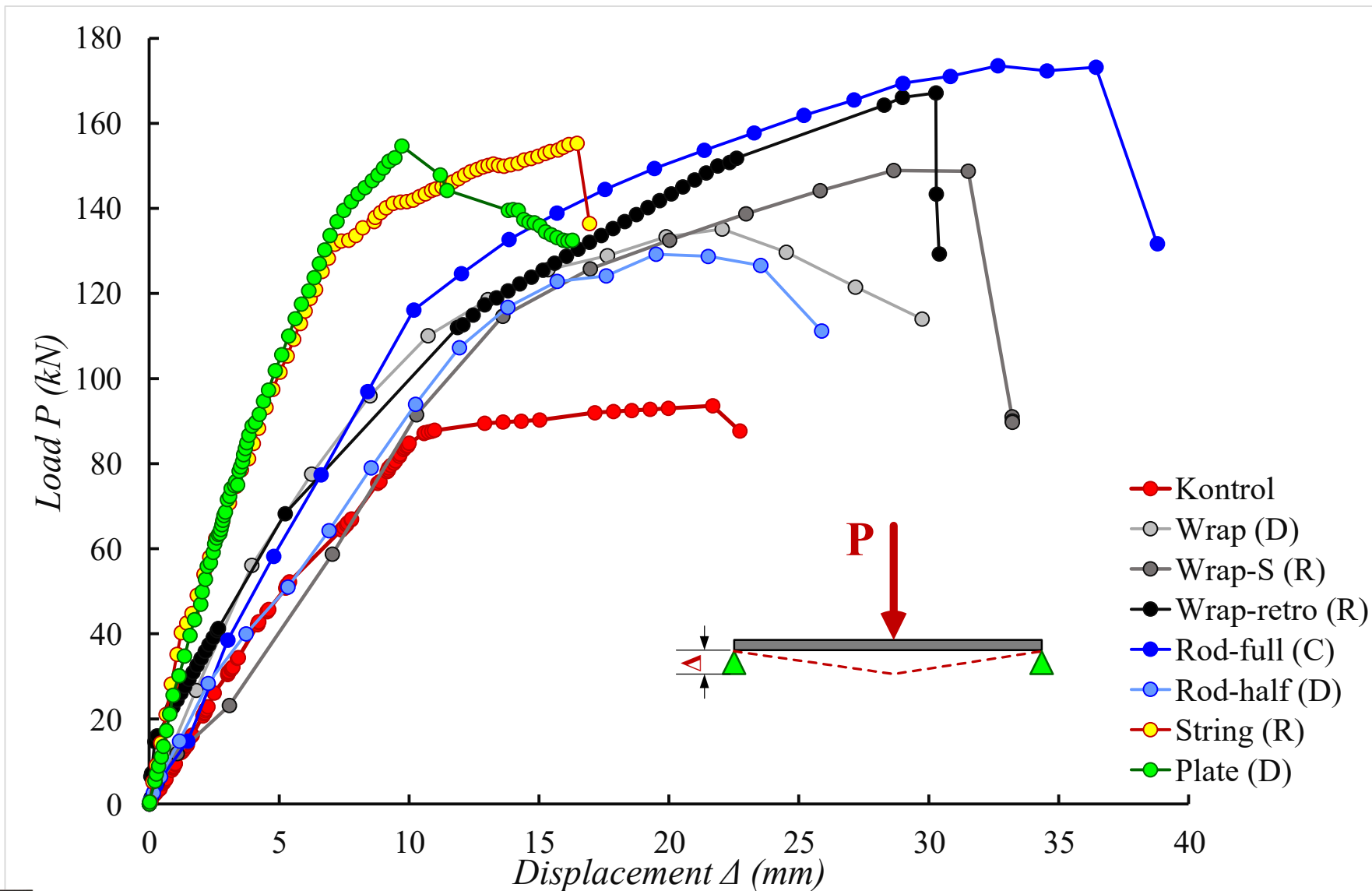
*Rupture: CFRP
wrap, string*

*Rod, keruntuhan **beton
tarik**, tanpa de-bonding,
tanpa rupture*



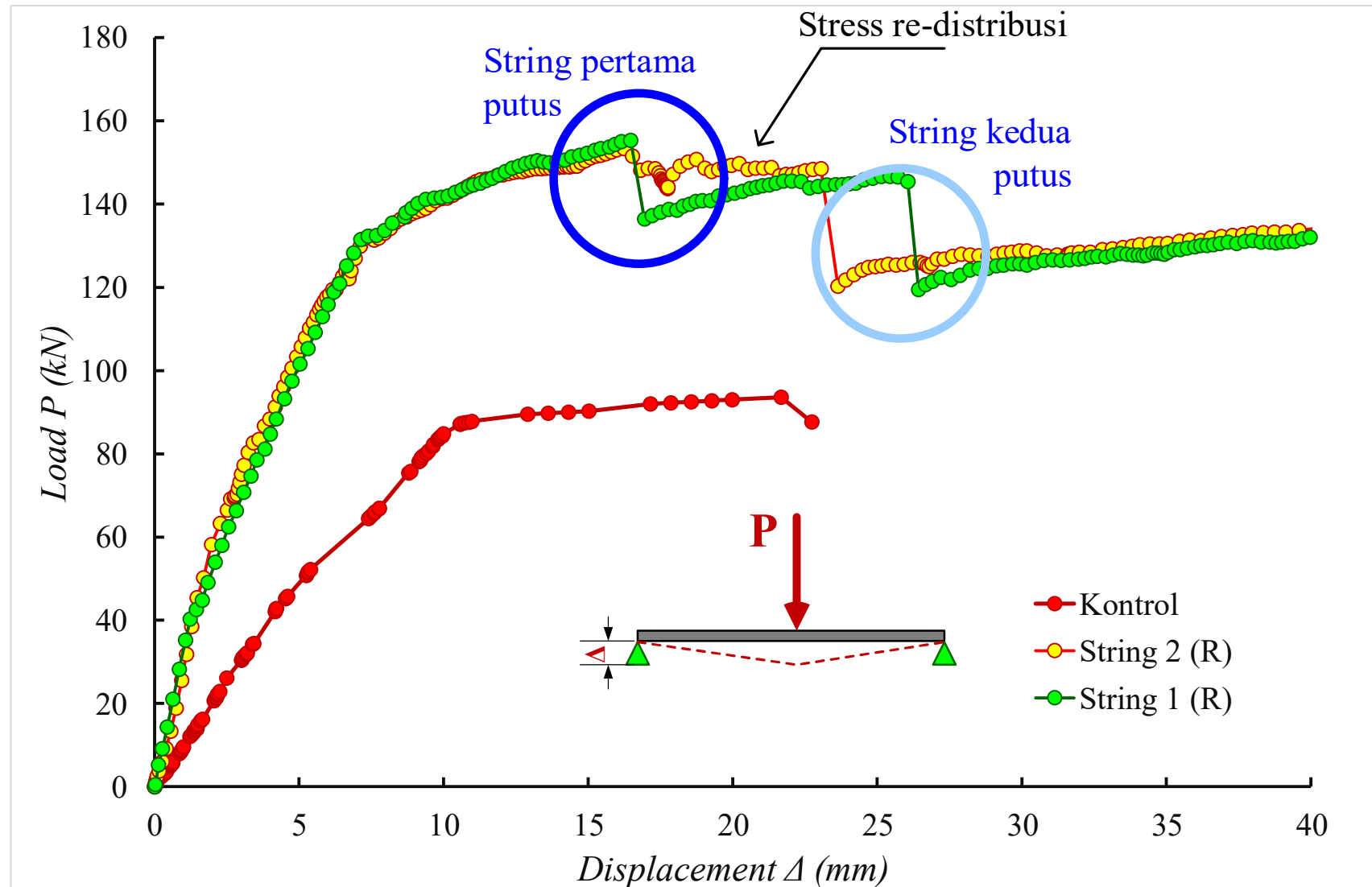


Perilaku beban-deformasi





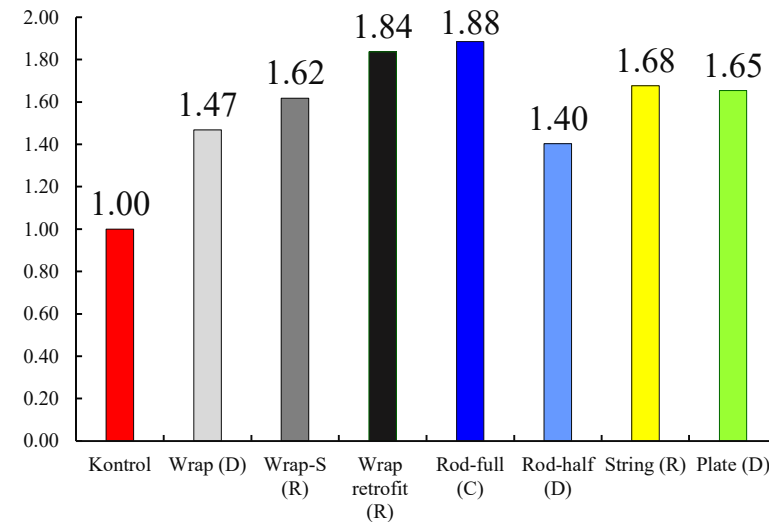
Stress re-distribusi



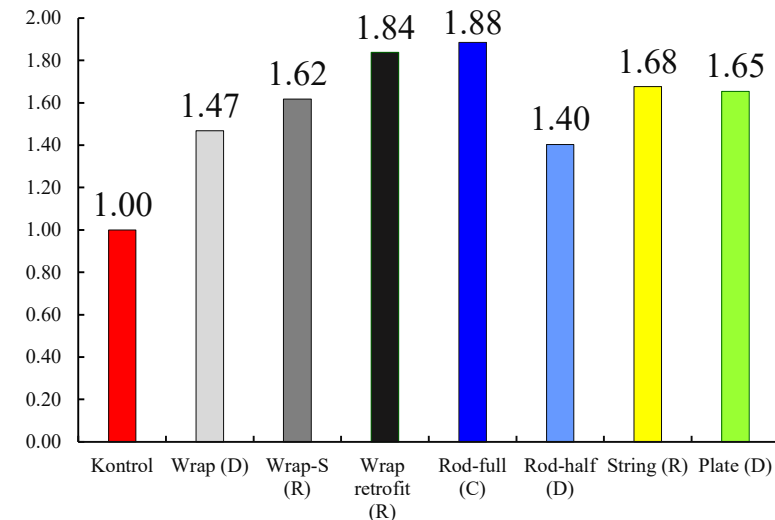


Simpulan

- Semua jenis perkuatan **CFRP** memberikan peningkatan kapasitas pemikulan setidaknya **40%** terhadap balok *tanpa* perkuatan
- **Rod** dengan penanaman sesuai **ACI 440** paling efektif, memberikan peningkatan **88%** (*kehancuran di beton*)
- Balok dengan perkuatan **string** dan **plate** memberikan peningkatan **65% - 68%**



- Penyimpangan penanaman **rod** terhadap ACI 440 ($\frac{1}{2}D$) menurunkan kapasitas **48%**
- *Perkasaran permukaan beton* pada **wrap** berkontribusi sebesar **15%** terhadap peningkatan kapasitas pemikulan
- **Wrap** tanpa perkasaran memberikan peningkatan kapasitas **47%**





Penggunaan CFRP Rod dan String (NSM)

- Persiapan lebih sedikit, bidang kontak terbatas (NSM)
- Polusi debu dan suara terkontrol
- Penghematan epoxy
- System pengerjaan lebih sederhana
- *String* lebih flexibel sehingga dapat mengikuti pola deformasi balok
- Rawan terhadap kedalaman penanaman





Penggunaan CFRP Plate (EBR)

- Bidang kontak lebih kecil bila dibandingkan wrap, mereduksi pekerjaan persiapan, polusi debu dan suara
- Keruntuhan didominasi **de-bonding**, karena sifat fisik plate yang kaku (*rigid*)
- Penentuan daktilitas perlu di definisikan lebih lanjut, karena **tidak serentaknya proses debonding** pada penggunaan plat ganda





Pultrusi dan pre-preg versus lapangan

- *Impregnasi lapangan* tak sebaik pre-preg
- Lurus dan sejajarnya serat tergantung teknisi lapangan, dan cenderung *tidak sempurna*
- Homogenitas epoxy impregnasi dengan serat, serta distribusi serat CFRP pada penampang melintang tidak terkontrol
- *Pre-preg* menghasilkan elemen yang *lebih rigid*



Ucapan Terima Kasih

Riset ini didukung oleh *PT Sika Indonesia* dan
Laboratorium Bahan dan Konstruksi, Undip

Riset ini dilaksanakan sebagai riset bersama antara:
Prof. Dr. Sri Tudjono, *Dr. Windu Partono*, *Dr. Sukamta*,
Ir. Rudy Yuniarto, *Ir. Parang Sabdono*, *Ir. Purwanto*
(Undip)

Prof. Buntara S. Gan (Nihon University, Japan)

Prof. Hsuan-Teh Hu (NCKU, Taiwan)

Dr. Tech Sholihin As'ad (UNS)

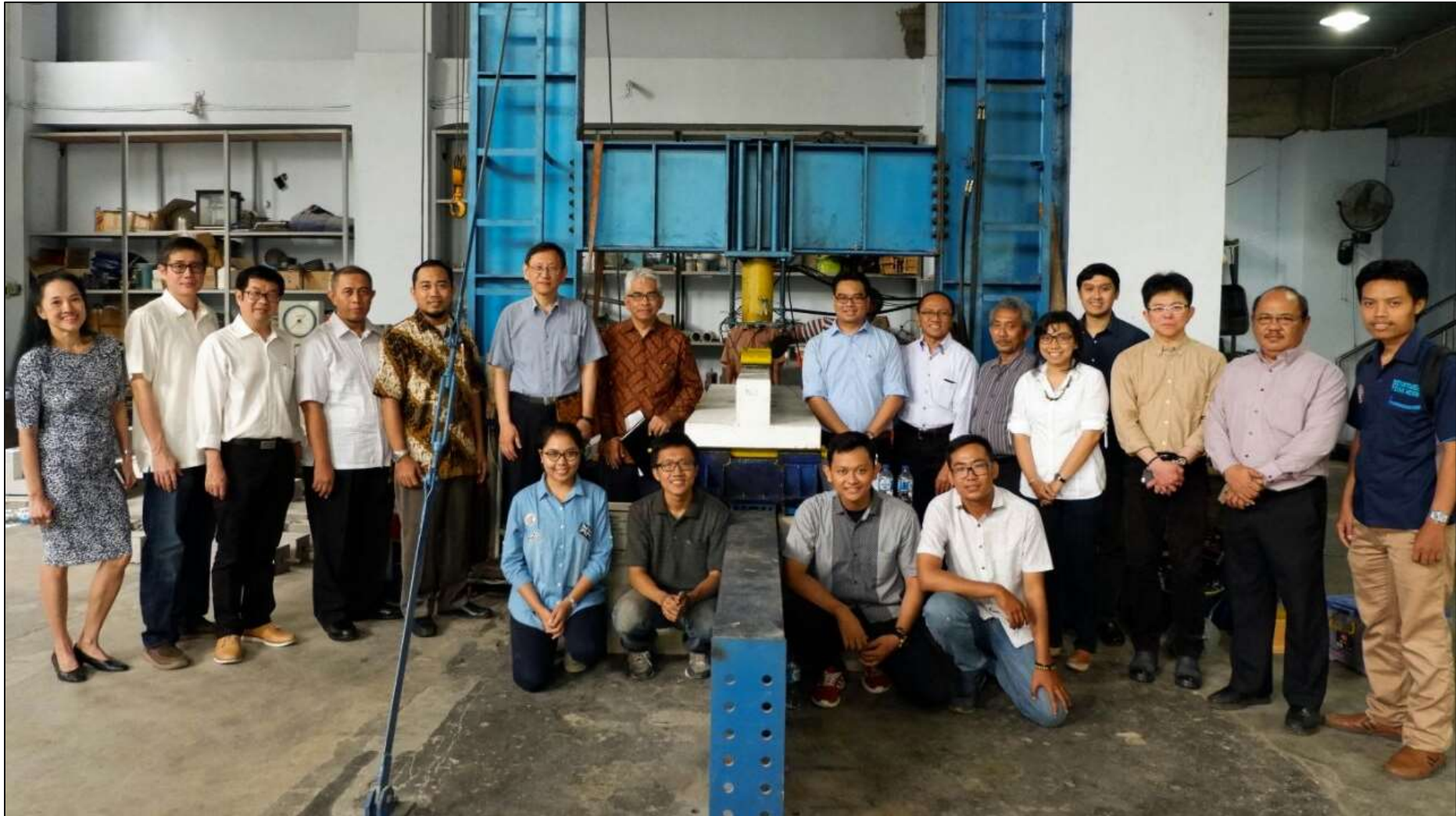
Agung Budipriyanto Ph.D. alm. (ITS)

Dr. Ir. Junaedi Utomo (UAJY, Yogyakarta)





Team 2018





Team 2019



Yogyakarta, 26 Nopember 2020