

## ABSTRAK

Alvin Halim:

Tesis

Studi Lekatan Mortar Cetak 3D Dengan Besi Tulangan

Berbagai macam teknologi konstruksi telah berkembang beberapa tahun ke belakang. Salah satunya adalah teknologi cetak 3D. Teknologi ini tetapi memiliki salah satu kelemahan yaitu sifatnya yang anisotropik karena proses produksinya secara berlapis. Teknik produksi ini masih perlu disempurnakan agar didapatkan rekatan yang baik antar lapis cetak 3D. Studi eksperimental ini akan mencoba untuk meletakkan besi tulangan kedalam mortar cetak 3D untuk dilakukan *pull out test* untuk mempelajari lekatannya. Variasi eksperimen akan terletak pada diameter tulangan dan perletakan tulangan terhadap arah cetak 3D. Hasil dari eksperimen ini nantinya akan dibandingkan dengan peraturan konvensional yang ada di FIB Code dan ACI 318-14. Dari eksperimen ditemukan bahwa ada 2 kemungkinan kegagalan spesimen yaitu kegagalan cabut dan kegagalan belah. Secara kekuatan, tulangan yang diletakan sejajar arah cetak 3D memiliki hasil yang lebih baik dari tulangan yang diletakan tegak lurus cetak 3D.

Kata kunci: cetak 3D; tulangan; mortar; lekatan; peraturan.

## ABSTRACT

Alvin Halim:

Thesis

Experimental Study of Embedded Steel Reinforcement in 3D Printed Mortar

Many new construction technique has been developed in recent years, one of them is 3D Concrete Printing (3DCP) which has a promising future. Offering many advantages such as reduced human error during construction progress, minimal manpower usage, and shorter construction period due to the absent of formwork. This technique, however, has its downside because it's anisotropic behaviour due to the printing layer-by-layer process. The production process for this technique still needs to be perfected to ensure good quality in the layer bond. This experimental study will try to embed steel reinforcement in 3D printed mortar to study it's pull out stress. Variation will made in the size of the reinforcement and the printing direction. It's then the result of the pull out test will be compared to the equation found on FIB Code and ACI 318-14. After the pull out test has been done, it's obeserved that the specimen has 2 probable mode of failure: pull out or split. It's also observed that the printing direction also has influence in the pull out stress. Steel reinforcement that embedded pararel to the printing direction is stronger that the one that embedded perpendicular to the printing direction.

Keywords: 3D printed reinforced concrete; reinforcement; mortar; bond strength; design code.

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
1. PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Ruang Lingkup Penelitian .....	3
2. LANDASAN TEORI .....	5
2.1. Karakteristik dari Beton Cetak 3D .....	5
2.1.1. Karakteristik Beton Segar yang Dibuat dengan Cetak 3D .....	5
2.1.2. Karakteristik Beton Keras yang Dibuat dengan Cetak 3D .....	8
2.2. Pengetesan Spesimen Balok Beton Pejal .....	12
2.2.1. <i>Flexural Test</i> .....	12
2.2.2. <i>Tensile Splitting Test</i> .....	13
2.3. Percobaan dengan Tulangan Kabel yang Ditanam Pada Balok Cetak 3D.....	14
2.4. Perletakkan Tulangan dengan Cara <i>Screw Type Reinforcement</i> .....	17
2.4.1. Layer Penetration Reinforcing Method (LPRM) .....	20
2.5. Standar <i>Pull Out Test</i> Berdasarkan EN 10800 .....	21
2.6. Studi Eksperimental <i>Pull Out Test</i> Beton Konvensional .....	22
2.6.1. Studi yang Dilakukan Oleh Deng, Pan, & Sun (2019) .....	22

2.7.	Studi yang Dilakukan Oleh Baena, Torres, Turon, & Barris (2009).....	24
2.8.	Studi Eksperimental <i>Pull Out Test</i> Beton Cetak 3D oleh Baz, Aouad, Leblond, Al-Mansouri, D'hondt, & Remond (2020).....	27
3.	Metodologi Penelitian.....	33
3.1.	Umum.....	33
3.2.	Desain Spesimen .....	33
3.3.	Pembuatan Spesimen.....	35
3.4.	<i>Test Set Up</i> .....	42
3.5.	Penamaan dan Variasi Spesimen .....	47
3.6.	Perbandingan Hasil Penelitian Dengan Peraturan .....	49
4.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	54
4.1.	Hasil Test Tekan.....	54
4.2.	Hasil Test Tarik Besi Tulangan .....	55
4.3.	Hasil Uji Tarik ( <i>Pull Out Test</i> ) Cor Konvensional .....	57
4.4.	Hasil Uji Tarik ( <i>Pull Out Test</i> ) Tulangan Sejajar Arah Cetak 3D (Para-I).....	62
4.5.	Hasil Uji Tarik ( <i>Pull Out Test</i> ) Tulangan Tegak Lurus Cetak 3D (Perp-I).....	67
4.6.	Hasil Uji Tarik ( <i>Pull Out Test</i> ) Tulangan Sejajar Arah Cetak 3D (Para-P).....	73
4.7.	Hasil Uji Tarik ( <i>Pull Out Test</i> ) Tulangan Tegak Lurus Cetak 3D (Perp-P).....	78
4.8.	Diskusi .....	82
4.8.1.	Diskusi Hasil Test Tekan .....	82
4.8.2.	Diskusi Hasil <i>Pull Out Test</i> Eksperimen.....	83
4.8.3.	Diskusi Hasil Percobaan Literatur Baz, Aouad, Leblond, Al-Mansouri, D'hondt, & Remond (2020).....	86
4.8.4.	Percobaan oleh Gebhard, Esposito, Menna, & Mata-Falcon (2022) .....	89
4.8.5.	Diskusi Antara Hasil Eksperimen dan Literatur .....	91
5.	KESIMPULAN DAN SARAN.....	93
5.1.	Kesimpulan.....	93

5.2. Saran.....	93
DAFTAR REFERENSI .....	95

## DAFTAR TABEL

2.1 Hasil Slump dan Slump-flow dari Berbagai Campuran.....	6
2.2 Campuran yang digunakan.....	10
2.3 Spesifikasi Kabel yang Digunakan Sebagai Tulangan .....	15
2.4 Hasil Percobaan Uji Tarik.....	18
2.5 Lajutan Hasil Uji Tarik.....	18
2.6 <i>Mix Design</i> Beton yang Digunakan.....	22
2.7 Profil Tulangan yang Digunakan .....	23
2.8 Hasil Percobaan.....	24
2.9 Properti Material yang Digunakan .....	25
2.10 Hasil Percobaan.....	26
2.11 Hasil Uji Tarik.....	30
2.12 Hasil Percobaan Test Tarik .....	32
3.1 <i>Mix Design</i> Mortar yang Digunakan.....	36
3.2 Perumusan <i>FIB Code</i> Untuk Masing-Masing Kondisi Kegagalan dan Jenis Lekatan.....	50
3.3 Perumusan Kekuatan Angkur Menurut ACI 318-14 .....	53
4.1 Hasil Test Tekan Kubus Beton .....	55
4.2 Properti Besi Tulangan. ....	56
4.3 Hasil Percobaan Uji Tarik Spesimen Cor Konvensional .....	57
4.4 Hasil Uji Tarik Spesimen Cetak 3D Arah Para-I.....	63
4.5 Hasil Uji Tarik Spesimen Cetak 3D Arah Perp-I.....	68
4.6 Hasil Uji Tarik Spesimen Cetak 3D Arah Para-P.....	73
4.7 Hasil Uji Tarik Spesimen Cetak 3D Arah Perp-P .....	78
4.8 Hasil Uji <i>Pull Out Test</i> oleh Baz et al. (2020) .....	87
4.9 Hasil Uji <i>Pull Out Test</i> oleh Baz et al. (2020) .....	88

## DAFTAR GAMBAR

1.1 Bentuk Geometri yang Kompleks dibuat dengan 3D Printing.....	1
1.2 Balok Rangka Batang .....	2
2.1 Hasil Cetak 3D dengan Buildability yang Baik.....	7
2.2 Hasil Cetak 3D dengan Buildability yang Tidak Baik.....	8
2.4 Hasil Uji Kuat Tekan dari Berbagai Sisi .....	9
2.5 Ilustrasi Pembebanan Uji Kuat Tekan .....	10
2.6 Hasil Uji Kuat Tekan yang Dilakukan .....	11
2.7 Percobaan <i>Flexural Test</i> .....	12
2.8 Hasil <i>Flexural Test</i> .....	13
2.9 Percobaan <i>Tensile Splitting Test</i> .....	13
2.10 Hasil <i>Tensile Splitting Test</i> .....	14
2.11 <i>Load-slip curves</i> yang didapat dari <i>Pull Out Test</i> .....	15
2.12 Hasil Percobaan <i>Adhesive Bond Stress</i> .....	16
2.13 Hasil Percobaan <i>Ultimate Bond Stress</i> .....	16
2.14 Jenis Tulangan Sekrup yang digunakan.....	17
2.15 Grafik Hasil Uji Tarik .....	19
2.16 Grafik Hasil 3 <i>Point Bending Test</i> .....	19
2.17 Konsep LPRM dan Percobaan LPRM yang Dilakukan .....	20
2.18 Spesifikasi Tulangan <i>Helix</i> dan Ulir yang Digunakan .....	21
2.19 Skematik 3 <i>Point Bending Test</i> yang Dilakukan.....	21
2.20 Skematik Spesimen <i>Pull Out Test</i> .....	22
2.21 Desain Spesimen yang Digunakan.....	23
2.22 Detail Arah Cetak 3D .....	27
2.23 Balok Kecil yang Dicitak Dengan Arah Cetak 3D Tertentu dan Ditanami Besi Tulangan ...	28
2.24 Bekisting 16x16x20 cm .....	28
2.25 Kubus Kecil yang Sudah Ditanam dan Selesai Dicor Dengan Mortar Lain .....	29
2.26 Arah Penanaman Besi Tulangan Terhadap Arah Cetak Mortar 3D.....	31
3.1 Diagram Alir Percobaan.....	33
3.2 Skematik Cetak 3 Dimensi Arah Para dan Perp.....	34
3.3 Skematik Spesimen <i>Pull Out Test</i> .....	35

3.4 Spesimen dengan Cor Konvensional .....	37
3.5 Skematik Spesimen Cetak 3 Dimensi .....	38
3.6 Mesin Cetak 3D .....	39
3.7 Spesimen Kubus Kecil Cetak 3D Arah Para.....	40
3.8 Spesimen Kubus Kecil Cetak 3D Arah Perp .....	41
3.9 Spesimen Kubus Kecil yang Dimasukan Kedalam Bekisiting dan Diberi Proteksi Kombinasi Isolasi, PVC dan Plastisin .....	41
3.10 Kubus Kecil yang Dimasukan Kedalam Bekisting dan <i>Digrouting</i> .....	42
3.11 <i>Linear Variable Differential Transformer</i> (LVDT) yang dipasangkan pada <i>magnetic box</i> ...	43
3.12 <i>Load Cell</i> Kapasitas 200kN.....	44
3.13 Skematik <i>Set Up Pull Out Test</i> .....	45
3.14 <i>Set Up</i> Lengkap Sebelum Pengujian Dimulai.....	46
3.15 Skematik Penempatan LVDT untuk Pengukuran Defleksi.....	47
3.16 Grafik Analitikal <i>Stress-Slip FIB Code</i> .....	51
3.17 Pola Kegagalan Angkur Menurut ACI 318-14.....	52
4.1 Skematik Spesimen Arah Tekan .....	54
4.2 Grafik Rata-Rata Hasil Uji Tekan.....	55
4.3 Grafik <i>Stress-Strain</i> Besi Tulangan (a) Tulangan <i>Wiremesh</i> M6 (b) Tulangan <i>Wiremesh</i> M8 (c) Tulangan <i>Wiremesh</i> M10 (d) Tulangan <i>Deformed</i> D10.....	56
4.4 <i>Stress-Slip Curve</i> Spesimen M-6 Cor Konvensional .....	60
4.5 <i>Stress- Slip Curve</i> Spesimen M-8 Cor Konvensional .....	61
4.6 <i>Stress-Slip Curve</i> Spesimen M-10 Cor Konvensional .....	61
4.7 <i>Stress-Slip Curve</i> Spesimen D-10 Cor Konvensional .....	62
4.8 <i>Stress-Slip Curve</i> Spesimen M-6 Tulangan Sejajar Arah Cetak Para-I.....	65
4.9 <i>Stress-Slip Curve</i> Spesimen M-8 Tulangan Sejajar Arah Para-I.....	66
4.10 <i>Stress-Slip Curve</i> Spesimen M-10 Tulangan Sejajar Arah Para-I.....	66
4.11 <i>Stress-Slip Curve</i> Spesimen D-10 Tulangan Sejajar Arah Para-I.....	67
4.12 <i>Stress-Slip Curve</i> Spesimen M-6 Tulangan Tegak Lurus Cetak 3D Arah Perp-I.....	71
4.13 <i>Stress-Slip Curve</i> Spesimen M-8 Tulangan Tegak Lurus Cetak 3D Arah Perp-I.....	71
4.14 <i>Stress-Slip Curve</i> Spesimen M-10 Tulangan Tegak Lurus Cetak 3D Perp-I .....	72
4.15 <i>Stress-Slip Curve</i> Spesimen D-10 Tulangan Tegak Lurus Cetak 3D Perp-I .....	72
4.16 <i>Stress-Slip Curve</i> Spesimen M-6 Tulangan Sejajar Arah Cetak 3D Para-P .....	76
4.17 <i>Stress-Slip Curve</i> Spesimen M-8 Tulangan Sejajar Arah Cetak 3D Para-P .....	76

4.18 <i>Stress-Slip Curve</i> Spesimen M-10 Tulangan Sejajar Arah Cetak 3D Para-P .....	77
4.19 <i>Stress-Slip Curve</i> Spesimen D-10 Tulangan Sejajar Arah Cetak 3D Para-P .....	77
4.20 <i>Stress-Slip Curve</i> Spesimen M-6 Tulangan Tegak Lurus Cetak 3D Perp-P .....	80
4.21 <i>Stress-Slip Curve</i> Spesimen M-8 Tulangan Tegak Lurus Cetak 3D Perp-P .....	81
4.22 <i>Stress-Slip Curve</i> Spesimen M-10 Tulangan Tegak Lurus Cetak 3D Perp-P .....	81
4.23 <i>Stress-Slip Curve</i> Spesimen D-10 Tulangan Tegak Lurus Cetak 3D Perp-P .....	82
4.24 Grafik Perbandingan Hasil Uji Kuat Tekan.....	83
4.25 Perbandingan Tegangan Maksimum Antar Jenis Spesimen Tulangan M6 .....	84
4.26 Perbandingan Tegangan Maksimum Antar Jenis Spesimen Tulangan M8 .....	84
4.27 Perbandingan Tegangan Maksimum Antar Jenis Spesimen Tulangan M10 .....	85
4.28 Perbandingan Tegangan Maksimum Antar Jenis Spesimen Tulangan D10 .....	85
4.29 Tekanan yang Diberikan <i>Extruder</i> Pada Spesimen Arah Para dan Perp.....	86
4.30 Posisi Perletakan Tulangan Pada Beton Cetak 3D.....	86
4.31 <i>Stress-Slip Diagram</i> Spesimen Konvensional .....	88
4.32 <i>Stress-Slip Diagram</i> Spesimen Tulangan Sejajar Arah Cetak 3D .....	89
4.33 <i>Stress-Slip Diagram</i> Spesimen Tulangan Tegak Lurus Arah Cetak 3D .....	89
4.34 Posisi Perletakan Tulangan Pada Beton Cetak 3D.....	90
4.35 Posisi Perletakan Tulangan Pada Beton Cetak 3D.....	91