

TESIS

**SIMULASI NUMERIK UNTUK MENGANALISIS  
PERILAKU LENTUR BALOK-T DENGAN BETON  
NORMAL YANG DIPERKUAT CFRP**



NICO FOE  
No. Mhs.: 225119282

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS ATMA JAYA YOGYAKARTA  
2024



# FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS ATMA JAYA YOGYAKARTA  
PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

---

## PESETUJUAN TESIS

Nama : NICO FOE  
Nomor Mahasiswa : 225119282  
Konsentrasi : Struktur  
Judul tesis : Simulasi Numerik untuk Menganalisis Perilaku Lentur  
Balok-T dengan Beton Normal yang Diperkuat CFRP

**Dosen Pembimbing**

**Tanggal**

**Tanda Tangan**

Dr. Ir. Junaedi Utomo, M.Eng.

18/01/2024



## PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Tesis dengan judul:

### **SIMULASI NUMERIK UNTUK MENGANALISIS PERILAKU LENTUR BALOK-T DENGAN BETON NORMAL YANG DIPERKUAT CFRP**

benar-benar merupakan hasil karya pendalaman akademik sendiri dan bukan merupakan hasil plagiasi dari karya orang lain. Ide, data hasil penelitian, maupun kutipan baik langsung maupun tidak langsung yang bersumber dari tulisan atau ide orang lain dinyatakan secara tertulis dalam Tesis ini. Apabila terbukti di kemudian hari bahwa Tesis ini merupakan hasil plagiasi, maka ijazah yang saya peroleh dinyatakan batal dan akan saya kembalikan kepada Rektor Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

Yogyakarta, 24 Januari 2024

Yang membuat pernyataan



Nico Foe

## INTISARI

Penelitian ini membahas perilaku lentur pada balok-T tanpa penguatan dan yang diperkuat dengan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) melalui simulasi numerik menggunakan *software* Abaqus. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan CFRP terhadap kapasitas beban, deformasi, dan perilaku keruntuhan balok.

Pemodelan yang dilakukan untuk balok-T tanpa penguatan dan yang diperkuat CFRP disesuaikan dengan model benda uji eksperimental. Simulasi ini difokuskan pada validitas dan akurasi model numerik terhadap hasil pengujian eksperimental.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa model simulasi numerik yang dilakukan mampu merepresentasikan hasil yang cukup baik. Perbandingan hasil simulasi dengan hasil uji eksperimental menunjukkan kesesuaian yang signifikan. Maka bisa disimpulkan bahwa model simulasi yang dikembangkan dapat diandalkan dalam merepresentasikan kondisi nyata pada balok-T tanpa penguatan maupun pada balok-T yang diperkuat dengan CFRP.

**Kata kunci:** balok-T, CFRP *plate*, CFRP *wrap*, penguatan, perilaku lentur, Abaqus, simulasi numerik

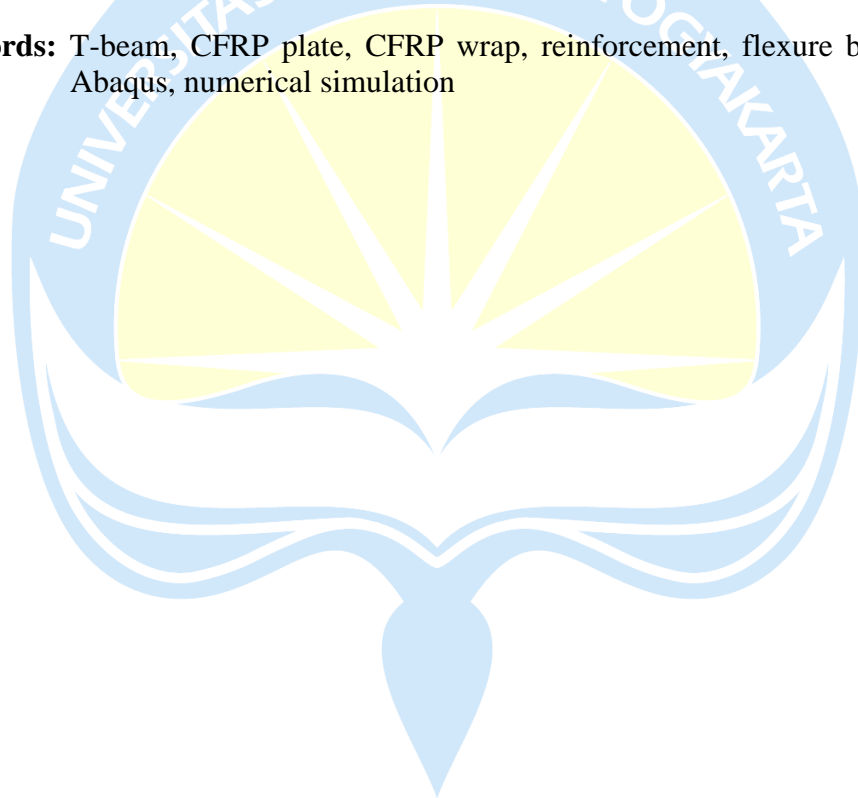
## ABSTRACT

This research examines T-beam without external reinforcement and T-beam reinforced with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). This research was conducted using numerical simulations with Abaqus software. The aim was to analyze the impact of CFRP application on beam's load-bearing capacity, deformation, and failure behavior.

The modeling carried out for both types of beams was adapted to the experimental test specimen model. This simulation focused on the validity and accuracy of the numerical model to the experimental test results.

The study's findings indicated that the numerical simulation model effectively represents the beam's behavior. The comparison between simulation and experimental results showed a significant alignment. Therefore, it can be concluded that the developed simulation model is reliable for both types of T-beams, whether unreinforced or reinforced with CFRP.

**Keywords:** T-beam, CFRP plate, CFRP wrap, reinforcement, flexure behavior, Abaqus, numerical simulation



## KATA HANTAR

Puji syukur dan hormat penulis haturkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tesis dengan baik yang berjudul “Simulasi Numerik untuk Menganalisis Perilaku Lentur Balok-T dengan Beton Normal yang Diperkuat CFRP”.

Tujuan dari penyusunan Laporan Tesis ini yaitu untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan tinggi program Strata-2 (S-2) pada Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

Penyusun menyadari tanpa ada bantuan, bimbingan, dan petunjuk dari berbagai pihak, penyusun akan mengalami kesulitan. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penyusunan Laporan Tesis ini, antara lain kepada:

1. Keluarga penulis yang senantiasa memberikan dukungan, motivasi, doa, serta semangat selama penyusunan Laporan Tesis ini.
2. Dr. Ir. Junaedi Utomo, M.Eng., selaku Dosen Pembimbing yang bersedia memberikan pengarahan dan meluangkan waktu selama proses penyusunan Laporan Tesis ini.
3. Prof. Ir. AY. Harijanto Setiawan, M.Eng., Ph.D., selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil.
4. Seluruh Dosen Fakultas Teknik Universitas Atma Jaya Yogyakarta yang telah membimbing selama penulis menempuh pendidikan.

5. Seluruh staf Tata Usaha Fakultas Teknik Universitas Atma Jaya Yogyakarta.
6. Seluruh teman-teman yang sudah menghibur dan mendukung selama penyusunan Laporan Tesis ini.
7. Semua pihak yang terlibat dalam penyusunan Laporan Tesis ini yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.





## DAFTAR ISI

JUDUL .....	i
PESETUJUAN TESIS .....	ii
PENGESAHAN TESIS .....	iii
PERNYATAAN.....	iv
INTISARI.....	v
ABSTRACT.....	vi
KATA HANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR .....	xiv
ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN .....	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang .....	1
B. Rumusan Masalah.....	3
C. Batasan Masalah .....	3
D. Tujuan Penelitian .....	4
E. Manfaat Penelitian .....	5
F. Keaslian Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
BAB III LANDASAN TEORI.....	10
A. Balok-T .....	10

B.	CFRP .....	11
1.	CFRP <i>wrap</i> .....	12
2.	CFRP <i>plate</i> .....	13
C.	Penguatan Balok dengan CFRP .....	14
D.	Interaksi CFRP-Beton .....	16
E.	Abaqus .....	18
F.	Validasi Simulasi Numerik dengan Pengujian Eksperimental.....	19
BAB IV METODOLOGI PENELITIAN .....		21
A.	Model Penelitian Eksperimental .....	21
B.	Pemodelan Numerik.....	24
1.	<i>Part</i> .....	25
2.	<i>Property</i> .....	30
3.	<i>Assembly</i> .....	52
4.	<i>Step</i> .....	53
5.	<i>Interaction</i> .....	56
6.	<i>Load</i> .....	60
7.	<i>Mesh</i> .....	61
8.	<i>Job</i> .....	70
9.	<i>Visualization</i> .....	70
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN.....		72
A.	Kurva Beban-Deformasi .....	72
B.	Perilaku Keruntuhan.....	74
1.	Balok-T tanpa penguatan .....	75

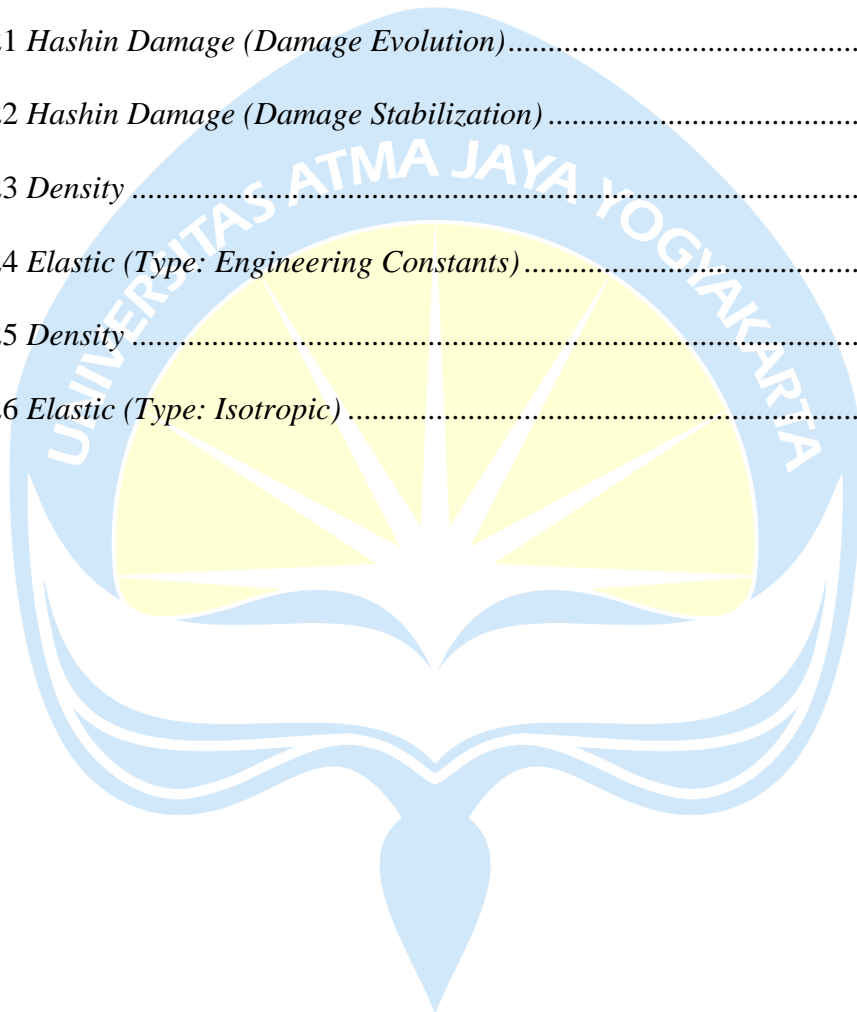
2. Balok-T dengan penguatan CFRP.....	78
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN .....	83
A. Kesimpulan .....	83
B. Saran.....	83
DAFTAR PUSTAKA .....	85



## DAFTAR TABEL

Tabel 1 Spesifikasi Material.....	21
Tabel 2 Spesifikasi CFRP <i>Wrap</i> .....	22
Tabel 3 Spesifikasi CFRP <i>Plate</i> .....	23
Tabel 4 <i>Density</i> .....	32
Tabel 5 <i>Elastic</i> .....	32
Tabel 6 <i>Concrete Damaged Plasticity (Plasticity)</i> .....	32
Tabel 7 <i>Concrete Damaged Plasticity (Compressive Behavior)</i> .....	33
Tabel 8 <i>Compressive Behavior (Concrete Compression Damage)</i> .....	34
Tabel 9 <i>Concrete Damaged Plasticity (Tensile Behavior)</i> .....	35
Tabel 10 <i>Tensile Behavior (Concrete Tension Damage)</i> .....	36
Tabel 11 <i>Density</i> .....	38
Tabel 12 <i>Elastic (Type: Isotropic)</i> .....	38
Tabel 13 <i>Plastic (Hardening: Isotropic)</i> .....	39
Tabel 13 <i>Plastic (Hardening: Isotropic) (lanjutan)</i> .....	40
Tabel 13 <i>Plastic (Hardening: Isotropic) (lanjutan)</i> .....	41
Tabel 14 <i>Density</i> .....	43
Tabel 15 <i>Elastic (Type: Isotropic)</i> .....	43
Tabel 16 <i>Plastic (Hardening: Isotropic)</i> .....	43
Tabel 16 <i>Plastic (Hardening: Isotropic) (lanjutan)</i> .....	44
Tabel 16 <i>Plastic (Hardening: Isotropic) (lanjutan)</i> .....	45
Tabel 17 <i>Density</i> .....	47

Tabel 18 <i>Elastic (Type: Isotropic)</i> .....	47
Tabel 19 <i>Plastic (Hardening: Isotropic)</i> .....	48
Tabel 19 <i>Plastic (Hardening: Isotropic)</i> (lanjutan) .....	49
Tabel 19 <i>Plastic (Hardening: Isotropic)</i> (lanjutan) .....	50
Tabel 20 <i>Hashin Damage</i> .....	50
Tabel 21 <i>Hashin Damage (Damage Evolution)</i> .....	51
Tabel 22 <i>Hashin Damage (Damage Stabilization)</i> .....	51
Tabel 23 <i>Density</i> .....	51
Tabel 24 <i>Elastic (Type: Engineering Constants)</i> .....	51
Tabel 25 <i>Density</i> .....	52
Tabel 26 <i>Elastic (Type: Isotropic)</i> .....	52

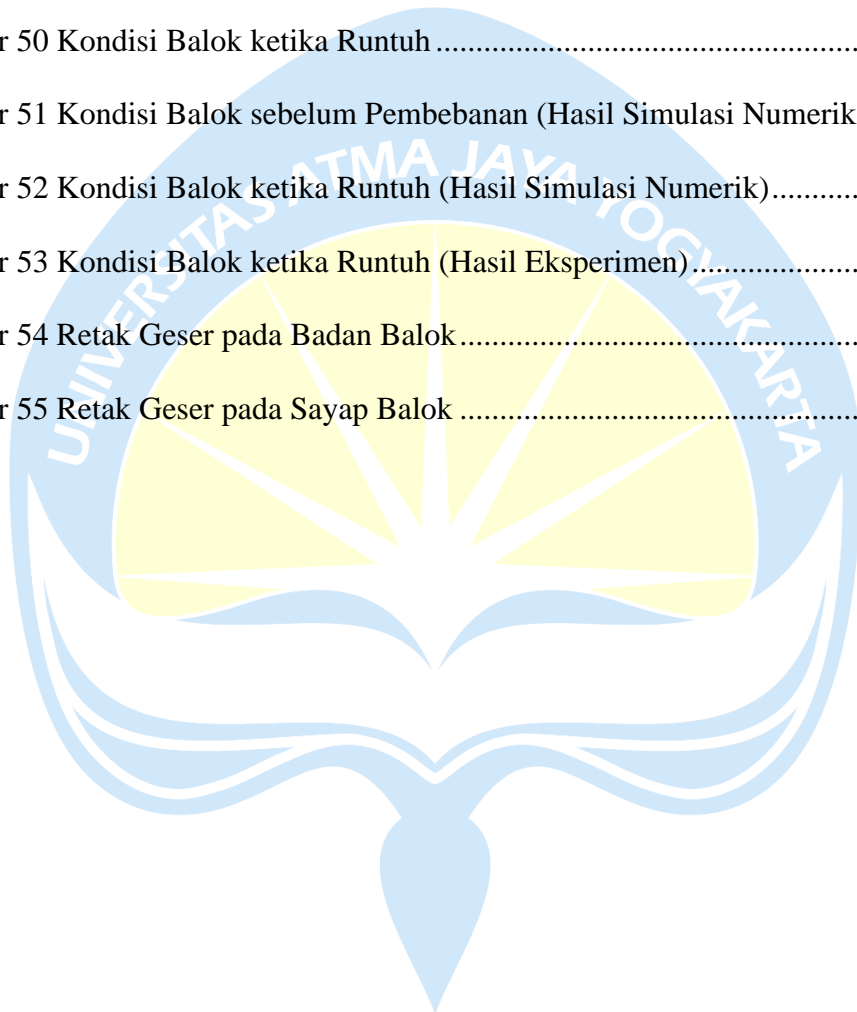


## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 CFRP <i>Wrap</i> .....	13
Gambar 2 CFRP <i>Plate</i> .....	14
Gambar 3 Diagram Regangan dan Tegangan pada Penampang Balok.....	15
Gambar 4 Model Balok tanpa Penguatan.....	22
Gambar 5 Model Balok dengan Penguatan CFRP.....	23
Gambar 6 Simulasi Perilaku <i>High Shear High Moment</i> .....	24
Gambar 7 Balok-T .....	26
Gambar 8 Baja Tulangan .....	27
Gambar 9 Sengkang pada <i>Flange</i> .....	27
Gambar 10 Sengkang pada <i>Web</i> .....	28
Gambar 11 Tumpuan Beban .....	28
Gambar 12 Tumpuan Balok.....	29
Gambar 13 CFRP <i>Wrap</i> .....	29
Gambar 14 CFRP <i>Plate</i> .....	30
Gambar 15 Model Konstitutif <i>Concrete Damage Plasticity</i> .....	31
Gambar 16 Model Konstitutif <i>Isotropic Hardening</i> untuk Baja D19.....	38
Gambar 17 Model Konstitutif <i>Isotropic Hardening</i> untuk Baja D16.....	42
Gambar 18 Model Konstitutif <i>Isotropic Hardening</i> untuk Baja D6.....	47
Gambar 19 Hasil <i>Assembly</i> Balok tanpa Penguatan .....	53
Gambar 20 Hasil <i>Assembly</i> Balok dengan Penguatan CFRP.....	53
Gambar 21 Penempatan <i>Datum Point</i> dan <i>Reference Point</i> .....	54

Gambar 22 <i>Step Manager (Basic)</i> .....	55
Gambar 23 <i>Step Manager (Incrementation)</i> .....	55
Gambar 24 <i>Tangential Behavior</i> .....	57
Gambar 25 <i>Normal Behavior</i> .....	57
Gambar 26 <i>Cohesive Behavior CFRP Wrap</i> .....	58
Gambar 27 <i>Cohesive Behavior CFRP Plate</i> .....	59
Gambar 28 <i>Tangential Behavior</i> .....	60
Gambar 29 <i>Normal Behavior</i> .....	60
Gambar 30 <i>Mesh Balok-T</i> .....	63
Gambar 31 <i>Mesh Baja Tulangan</i> .....	64
Gambar 32 <i>Mesh Sengkang pada Flange</i> .....	65
Gambar 33 <i>Mesh Sengkang pada Web</i> .....	66
Gambar 34 <i>Mesh Tumpuan Beban</i> .....	67
Gambar 35 <i>Mesh Tumpuan Balok</i> .....	68
Gambar 36 <i>Mesh CFRP Wrap</i> .....	69
Gambar 37 <i>Mesh CFRP Plate</i> .....	70
Gambar 38 Kurva Beban-Deformasi dari Abaqus .....	72
Gambar 39 Kurva Hasil Eksperimen dan Hasil Simulasi Numerik.....	73
Gambar 40 Kondisi Leleh Tulangan Tarik .....	75
Gambar 41 Kondisi Balok sebelum Pembebanan.....	76
Gambar 42 Kondisi Balok ketika <i>First Crack</i> .....	76
Gambar 43 Kondisi Balok ketika Runtuh .....	76
Gambar 44 Kondisi Balok sebelum Pembebanan (Hasil Simulasi Numerik).....	77

Gambar 45 Kondisi Balok ketika Runtuh (Hasil Simulasi Numerik).....	77
Gambar 46 Kondisi Balok ketika Runtuh (Hasil Eksperimen).....	78
Gambar 47 Kondisi Leleh Tulangan Tarik .....	78
Gambar 48 Kondisi Balok sebelum Pembebanan.....	79
Gambar 49 Kondisi Balok ketika <i>First Crack</i> .....	79
Gambar 50 Kondisi Balok ketika Runtuh.....	80
Gambar 51 Kondisi Balok sebelum Pembebanan (Hasil Simulasi Numerik).....	80
Gambar 52 Kondisi Balok ketika Runtuh (Hasil Simulasi Numerik).....	81
Gambar 53 Kondisi Balok ketika Runtuh (Hasil Eksperimen).....	81
Gambar 54 Retak Geser pada Badan Balok.....	81
Gambar 55 Retak Geser pada Sayap Balok .....	81





## ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/ Singkatan	Arti	Satuan
%	persen	
®	<i>registered</i>	
Ø	diameter baja tulangan	mm
3D	<i>three-dimensional</i>	
a	tinggi blok tekan ekuivalen	mm
c	tinggi blok tekan	mm
C3D8R	<i>An 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control</i>	
C <sub>cc</sub>	gaya tekan beton	N
CDISP	<i>contact displacements</i>	mm
CDP	<i>Concrete Damage Plasticity</i>	
CF	<i>concentrated force</i>	N
CF	<i>moment</i>	Nmm
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>	
C <sub>sc</sub>	gaya tekan baja tulangan	N
CSDMG	<i>scalar stiffness degradation for cohesive surfaces</i>	
CSTRESS	<i>contact stresses</i>	MPa
D	diameter baja tulangan	mm
DAMAGEC	<i>compressive damage</i>	
DAMAGET	<i>tensile damage</i>	

Lambang/ Singkatan	Arti	Satuan
dkk.	dan kawan-kawan	
$E$	modulus elastisitas	
E1	modulus elastisitas pada arah sumbu 1	MPa
E2	modulus elastisitas pada arah sumbu 2	MPa
E3	modulus elastisitas pada arah sumbu 3	MPa
EBR	<i>Externally Bonded Reinforcement</i>	
<i>et al.</i>	<i>et alia</i>	
$f'_c$	kuat tekan beton	MPa
$fb0$	<i>strength in the biaxial state</i>	MPa
$fc0$	<i>strength in the uniaxial state</i>	MPa
FEM	<i>Finite Element Method</i>	
$f_u$	kuat tarik <i>ultimate</i>	MPa
$f_y$	kuat leleh baja tulangan	MPa
G12	modulus geser pada arah sumbu 1	MPa
G13	modulus geser pada arah sumbu 2	MPa
G23	modulus geser pada arah sumbu 3	MPa
$K$	<i>shear strength ratio</i>	
kN	kilonewton	
Knn	<i>normal stiffness to the work plane coefficient</i>	MPa/mm
Kss	<i>shear stiffness of the work plane coefficient</i>	MPa/mm
Ktt	<i>tangential stiffness to the work plane coefficient</i>	MPa/mm
LE	<i>logarithmic strain components</i>	

Lambang/ Singkatan	Arti	Satuan
mm	<i>millimeter</i>	
MPa	<i>megapascal</i>	
<i>Node-Surf</i>	<i>Node to Surface</i>	
NSM	<i>Near Surface Mounted</i>	
Nu12	koefisien Poisson pada arah sumbu 1	
Nu13	koefisien Poisson pada arah sumbu 2	
Nu23	koefisien Poisson pada arah sumbu 3	
P	beban	N
PE	<i>plastic strain components</i>	
PEEQ	<i>equivalent plastic strain</i>	
PEMAG	<i>plastic strain magnitude</i>	
<i>pre-preg</i>	<i>pre-impregnated</i>	
R3D4	<i>A 4-node 3-D bilinear rigid quadrilateral</i>	
RF	<i>reaction force</i>	N
RF	<i>moment</i>	Nmm
RF2	<i>vertical reaction force</i>	N
RP	<i>Reference Point</i>	
S	<i>stress components and invariants</i>	MPa
S4R	<i>A 4-node doubly curved thin or thick shell, reduced integration, hourglass control, finite membrane strains</i>	
STATUS	<i>status</i>	

Lambang/ Singkatan	Arti	Satuan
<i>Surf-Surf</i>	<i>Surface to Surface</i>	
T2D3	<i>A 2-node linear 3-D truss</i>	
$T_{FRP}$	gaya tarik sumbangan <i>FRP</i>	N
$T_{st}$	gaya tarik baja tulangan	N
U	<i>translation</i>	mm
U	<i>rotation</i>	rad
U2	<i>vertical translation</i>	mm
$\epsilon_{cc}$	regangan tekan beton	
$\epsilon_{FRP}$	regangan tarik sumbangan <i>FRP</i>	
$\epsilon_{sc}$	regangan tekan baja tulangan	
$\epsilon_{st}$	regangan tarik baja tulangan	
$\epsilon_u$	regangan <i>ultimate</i>	