

SKRIPSI

**STUDI NUMERIKAL PENGARUH PEMODELAN
KONTAK PERMUKAAN TERHADAP KEKAKUAN
KOMPRESI BELLEVILLE *SPRING WASHER***



**ALLEN TEODUS MEDHIK
NPM: 6101901070**

PEMBIMBING: Helmy Hermawan Tjahjanto, S.T., M.T., Ph.D.

KO-PEMBIMBING: Wivia Octarena Nugroho, S.T., M.T.

**UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
(Terakreditasi Berdasarkan SK BAN-PT Nomor: 11370/SK/BAN-PT/AK-ISK/S/X/2021)
BANDUNG
AGUSTUS 2023**

SKRIPSI

**STUDI NUMERIKAL PENGARUH PEMODELAN
KONTAK PERMUKAAN TERHADAP KEKAKUAN
KOMPRESI BELLEVILLE *SPRING WASHER***



**ALLEN TEODUS MEDHIK
NPM: 6101901070**

PEMBIMBING: Helmy Hermawan Tjahjanto, S.T., M.T., Ph.D.

KO-PEMBIMBING: Wivia Octarena Nugroho, S.T., M.T.

**UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
(Terakreditasi Berdasarkan SK BAN-PT Nomor: 11370/SK/BAN-PT/AK-ISK/S/X/2021)
BANDUNG
AGUSTUS 2023**

SKRIPSI

**STUDI NUMERIKAL PENGARUH PEMODELAN
KONTAK PERMUKAAN TERHADAP KEKAKUAN
KOMPRESI BELLEVILLE *SPRING WASHER***



**ALLEN TEODUS MEDHIK
NPM: 6101901070**

BANDUNG, 2 AGUSTUS 2023

PEMBIMBING:

**Helmy Hermawan Tjahjanto,
S.T., M.T., Ph.D.**

KO-PEMBIMBING:

**Wivia Octarena Nugroho,
S.T., M.T.**

**UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
(Terakreditasi Berdasarkan SK BAN-PT Nomor: 11370/SK/BAN-PT/AK-ISK/S/X/2021)
BANDUNG
AGUSTUS 2023**

SKRIPSI

**STUDI NUMERIKAL PENGARUH PEMODELAN
KONTAK PERMUKAAN TERHADAP KEKAKUAN
KOMPRESI BELLEVILLE *SPRING WASHER***



**ALLEN TEODUS MEDHIK
NPM: 6101901070**

PEMBIMBING: Helmy Hermawan Tjahjanto,
S.T., M.T., Ph.D.

KO-PEMBIMBING: Wivia Octarena Nugroho,
S.T., M.T.

PENGUJI 1: Dr. Johannes Adhijoso Tjondro

PENGUJI 2: Sisi Nova Rizkiani, S.T., M.T.

**UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
(Terakreditasi Berdasarkan SK BAN-PT Nomor: 11370/SK/BAN-PT/AK-ISK/S/X/2021)
BANDUNG
AGUSTUS 2023**

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama : ALLEN TEODUS MEDHIK
Tempat, tanggal lahir : Bandung, 21 Juni 2001
NPM : 6101901070
Judul Skripsi : **STUDI NUMERIKAL PENGARUH
PEMODELAN KONTAK PERMUKAAN
TERHADAP KEKAKUAN KOMPRESI
BELLEVILLE *SPRING WASHER***

Dengan ini saya menyatakan bahwa karya tulis ini adalah benar hasil karya tulis saya sendiri dan bebas plagiat. Adapun kutipan yang tertuang sebagian atau seluruh bagian pada karya tulis ini yang merupakan karya orang lain (buku, makalah, karya tulis, materi perkuliahan, internet, dan sumber lain) telah selayaknya saya kutip, sadur, atau tafsir dan dengan jelas telah melampirkan sumbernya. Bahwa tindakan melanggar hak cipta dan yang disebut plagiat merupakan pelanggaran akademik yang sanksinya dapat berupa peniadaan pengakuan atas karya ilmiah ini dan kehilangan hak keserjanaan.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran dan tanpa paksaan dari pihak manapun.

(Kutipan pasal 25 ayat 2 UU no. 20 tahun 2003)

Bandung, 2 Agustus 2023



Allen Teodus Medhik

STUDI NUMERIKAL PENGARUH PEMODELAN KONTAK PERMUKAAN TERHADAP KEKAKUAN KOMPRESI BELLEVILLE SPRING WASHER

Allen Teodus Medhik
NPM : 6101901070

Pembimbing: Helmy Hermawan Tjahjanto, S.T., M.T., Ph.D.
Ko-Pembimbing: Wivia Octarena Nugroho, S.T., M.T.

UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
(Terakreditasi Berdasarkan SK BAN-PT Nomor: 11370/SK/BAN-PT/AK-ISK/S/X/2021)
BANDUNG
AGUSTUS 2023

ABSTRAK

Pada pemasangan baut mutu tinggi, terdapat 2 tipe pengencangan sambungan yaitu tipe tumpu dan *slip-critical*. Sambungan tipe tumpu dilakukan dengan pengencangan yang secukupnya dan bila ada transfer gaya maka baut menumpu pada elemen. Kekurangannya adalah kegagalan *fatigue* akibat *slip* yang terjadi berulang kali, oleh karena itu cara untuk mencegah kegagalan tersebut itu dengan memakai sambungan tipe *slip-critical*. Baut mutu tinggi dengan sambungan tipe *slip-critical* dikencangkan dengan tingkat kekencangan tertentu agar *slip* terhentikan akibat penjepitan yang diciptakan gaya friksi. Masalahnya adalah baut yang telah dilakukan *pretension* akan mengalami relaksasi. Upaya untuk mengurangi kondisi relaksasi merupakan pemakaian Belleville *spring washer* yang bertindak sebagai pegas. Kalkulasi terkait *washer* ini masih disederhanakan sehingga tidak mempertimbangkan pengaruh friksi yang ada. Studi ini meninjau dan mengevaluasi rumus dengan analisis numerik yang dilakukan menggunakan program metode elemen hingga Abaqus. Variasi yang dimodelkan dan dianalisis adalah kondisi interaksi Belleville *spring washer* dengan permukaan pelat baja dan konfigurasi *stacking*. Hasil studi menunjukkan bahwa persamaan DIN 2092 layak dipakai sebagai estimasi beban aksial yang dapat diterima *washer* pada defleksi tertentu dengan syarat defleksi tidak melebihi 30% dari tinggi bebas *washer*. Selain itu, kajian lebih terkait pentingnya pengaruh friksi terkait kekakuan *washer* perlu dilakukan karena persamaan DIN 2092 dengan friksi hanya berlaku pada *washer* dengan koefisien friksi di bawah 0,1. Rekomendasi untuk meningkatkan beban aksial yang dapat diterima *washer* dan kekakuan adalah dengan pemakaian konfigurasi *stacking* secara paralel.

Kata Kunci: Belleville *spring washer*, friksi, beban, defleksi, kekakuan, metode elemen hingga

**NUMERICAL STUDY OF THE EFFECTS OF SURFACE
CONTACT MODELING TOWARDS
BELLEVILLE SPRING WASHER'S STIFFNESS OF
COMPRESSION**

**Allen Teodus Medhik
NPM : 6101901070**

**Advisor: Helmy Hermawan Tjahjanto, S.T., M.T., Ph.D.
Co-Advisor: Wivia Octarena Nugroho, S.T., M.T.**

**PARAHYANGAN CATHOLIC UNIVERSITY
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
BACHELOR PROGRAM**

(Accredited by SK BAN-PT Number: 11370/SK/BAN-PT/AK-ISK/S/X/2021)

**BANDUNG
AUGUST 2023**

ABSTRACT

In the installation of high tensile bolts, there are 2 types of connection fastening. There are the bearing and the slip-critical type. The bearing type connection is done with just enough tightening and if there is a transfer of force, then the bolt will rest in contact with the element. The disadvantage of this type is fatigue failure caused by repeated slips. Therefore, the way to prevent this failure is by using a slip-critical type connection. High tensile bolts with a slip-critical type connection are tightened to a certain extent to prevent slips by frictional force of the clamping. The problem of pretensioned bolts is bolt relaxation. One way to reduce this relaxation is to use the Belleville spring washer, which acts as a spring. The calculations related to this *washer* are still simplified so that it does not take into account the effect of existing friction. This study reviews and evaluates the calculations by numerical analysis performed using the finite element method program, which is Abaqus. The variations that are modeled and analyzed are the interaction condition of the Belleville spring washer with the surface of the steel plate and the stacking configuration. The results of the study show that the DIN 2092 equation is suitable for use as an estimation of the axial load that the washer can handle at a certain deflection if the deflection does not exceed 30% of the washer's free height. Furthermore, more studies related to the importance of friction to the washer's stiffness need to be carried out because the DIN 2092 friction equation only applies to washers with friction coefficient below 0,1. The recommendation to increase the washer's acceptable axial load and stiffness is to use a parallel stacking configuration.

Keywords: Belleville spring washer, friction, load, deflection, stiffness, finite element method

PRAKATA

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat karunia dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Studi Numerikal Pengaruh Pemodelan Kontak Permukaan Terhadap Kekakuan Kompresi Belleville *Spring Washer*”. Skripsi ini menjadi salah satu syarat akademik dalam penyelesaian studi tingkat Sarjana pada Program Studi Teknik Sipil Universitas Katolik Parahyangan.

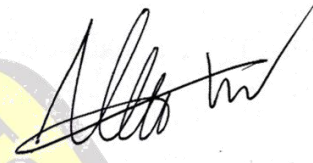
Dalam proses penulisan skripsi ini, penulis menghadapi banyak tantangan dan hambatan, tetapi penulis mampu menyelesaikan skripsi ini berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Helmy Hermawan Tjahjanto, S.T., M.T., PH.D. selaku dosen pembimbing dan Ibu Wivia Octarena Nugroho, S.T., M.T. selaku dosen ko-pembimbing yang senantiasa sabar dalam membimbing, mengarahkan, dan memperluas wawasan penulis selama proses penulisan skripsi dengan baik.
2. Seluruh dosen Program Studi Teknik Struktur Universitas Katolik Parahyangan yang telah menjadi dosen penguji dan memberikan saran selama seminar judul, seminar isi, dan sidang skripsi.
3. Kedua orang tua penulis, Budhi Muliawan Kosasih dan Merry Kusumawati Gandasasmita yang selalu mendoakan dan mendukung penulis.
4. Kakek, nenek, seluruh keluarga penulis, dan Adik, Darren Teodus Medhik yang sering menemani dan memberikan motivasi kepada penulis.
5. Kevin Joe, Hasky Widjaja, Michelle Patricia, Alexander Tommy, Gavyn Rumbajan, Samuel Jemmy, Tio Patrick, Ian Hartono dan teman-teman kuliah lainnya yang telah berjuang bersama penulis selama masa perkuliahan.
6. Edward Tani ally, Matthew Pandojo, Marcello Anthony, Christabel Priscila, Audrey Lois, Jeremy Christiandi, dan teman-teman lainnya yang selalu memberikan semangat kepada penulis.
7. Gilbert Gnaden, Taufan Santoso, Marchel Hartono, Bryan Yehezkiel, Gabriella Sharon, dan Natanael Calvin yang telah membantu penulis selama proses penulisan skripsi.

8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan penulis dan telah berkontribusi dalam penulisan skripsi ini.

Penulis menyadari betul bahwa penulisan skripsi ini masih jauh dari kata sempurna dan banyak sekali kekurangannya. Maka dari itu, penulis berharap menerima kritik dan saran yang membangun dari para pembaca. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi semua pihak yang membutuhkannya. Sekian dan terima kasih.

Bandung, 2 Agustus 2023



Allen Teodus Medhik

6101901070



DAFTAR ISI

LEMBAR PERNYATAAN	i
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
PRAKATA	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR NOTASI	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Inti Permasalahan	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Pembatasan Masalah	4
1.5 Metode Penelitian	5
1.6 Sistematika Penulisan	6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Material Baja	7
2.2 Sambungan Baja	8
2.3 Baut Mutu Tinggi	9
2.4 Belleville <i>Spring Washer</i>	10
2.4.1 <i>Stacking</i>	12
2.4.2 Persamaan Belleville <i>Spring Washer</i>	13
2.5 Metode Elemen Hingga	16

2.5.1 Elemen.....	16
2.5.2 Interaksi	17
2.5.3 <i>Boundary Condition</i>	17
BAB 3 PEMODELAN DAN ANALISIS	18
3.1 Material.....	18
3.2 Geometri.....	20
3.3 <i>Meshing</i>	21
3.4 Perakitan.....	21
3.5 Perletakan	22
3.6 Pembebanan.....	22
3.7 Interaksi	22
3.8 Variasi.....	23
BAB 4 PEMBAHASAN HASIL ANALISIS	25
4.1 Perilaku <i>Washer</i> pada Kondisi Tanpa Friksi	25
4.2 Pengaruh Friksi terhadap Hubungan Beban-Defleksi	26
4.3 Perbandingan Hasil Persamaan dan Analisis Numerik Variasi Friksi	29
4.4 Hasil Analisis Numerik Variasi <i>Stacking</i>	30
4.5 Perbandingan Hasil Persamaan dan Analisis Numerik Variasi <i>Stacking</i> ..	33
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	35
5.1 Kesimpulan.....	35
5.2 Saran.....	36
DAFTAR PUSTAKA	37
LAMPIRAN	39

DAFTAR NOTASI



AISC	: American Institute of Steel Construction
AISI	: American Iron and Steel Institute
ASTM	: American Standard Testing and Material
C	: Konstanta Persamaan DIN 2092
Di	: Diameter Dalam <i>Washer</i> (mm)
Do	: Diameter Luar <i>Washer</i> (mm)
DIN	: Deutsches Institut für Normung
E	: Modulus Elastisitas (MPa)
FEM	: <i>Finite Element Method</i>
h	: Tinggi <i>Washer</i> (mm)
ho	: Tinggi Bebas <i>Washer</i> (mm)
K	: <i>Spring Constant</i> (N/mm)
M	: Konstanta Persamaan J. O. Almen dan A. László
MEH	: Metode Elemen Hingga
n	: Jumlah <i>Washer</i> dalam <i>stacking</i> paralel
P	: Beban Aksial (N)
P'	: Beban Aksial dengan Pengaruh Friksi (N)
PEEQ	: <i>Equivalent Plastic Strain</i>
S	: Defleksi (mm)
SNI	: Standar Nasional Indonesia
t	: Tebal <i>Washer</i> (mm)
α	: Rasio Diameter
ε	: <i>strain</i>
ε_e	: <i>engineering strain</i>
σ	: <i>stress</i>
σ_e	: <i>engineering stress</i>
μ	: Koefisien Friksi
μ_m	: Koefisien Friksi Permukaan <i>Washer</i>
μ_r	: Koefisien Friksi Tepi <i>Washer</i>
ν	: Poisson's Ratio

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Belleville <i>Spring Washer</i> (R. Bhamore dan P.K. Sahu, 2019).....	3
Gambar 1.2 Potongan Belleville <i>Spring Washer</i> pada Baut (Peter R.N. Childs, 2019)	3
Gambar 1.3 Variasi Kondisi Interaksi Belleville <i>Spring Washer</i> dengan Permukaan Pelat Baja	5
Gambar 1.4 Variasi Konfigurasi Tunggal Belleville <i>Spring Washer</i>	5
Gambar 1.5 Variasi Konfigurasi Tersusun Belleville <i>Spring Washer</i>	5
Gambar 2.1 Kurva Tegangan-Regangan Baja (William T. Segui, 2007).....	8
Gambar 2.2 Kurva Tegangan-Regangan Baja (Mina Seif et.al., 2016).....	8
Gambar 2.3 Sambungan Tipe <i>Slip-Critical</i> (William T. Segui, 2007).....	9
Gambar 2.4 Belleville <i>Spring Washer</i> (Ritika Bhamore dan Purushottam Kumar Sahu, 2019)	10
Gambar 2.5 Potongan Belleville <i>Spring Washer</i> (Giammarco Ferrari, 2013) ...	11
Gambar 2.6 Potongan Belleville <i>Spring Washer</i> dengan <i>Contact Flats</i> (Giammarco Ferrari, 2013)	11
Gambar 2.7 Potongan dan Tampak Atas Belleville <i>Spring Washer</i>	12
Gambar 2.8 Konfigurasi <i>Stacking</i> Paralel (Adolf Schnorr, 2003)	13
Gambar 2.9 Konfigurasi <i>Stacking</i> Seri (Adolf Schnorr, 2003).....	13
Gambar 2.10 Konfigurasi <i>Stacking</i> Kombinasi (Adolf Schnorr, 2003).....	13
Gambar 2.11 Perhitungan Luas Lingkaran dengan MEH (Rahardjo, P.P. dan Alvi, S.D., 2019)	16
Gambar 3.1 Pemodelan Potongan Belleville <i>Spring Washer</i>	18
Gambar 3.2 Kurva Tegangan-Regangan Baja <i>Washer</i>	19
Gambar 3.3 Geometri Belleville <i>Spring Washer</i>	20
Gambar 3.4 Geometri <i>Base</i>	20
Gambar 3.5 <i>Meshing Washer</i> dan <i>Base</i> untuk Model I-1-0.....	21

Gambar 3.6 Perakitan Model	21
Gambar 3.7 Perletakan Bagian Atas <i>Base</i>	22
Gambar 3.8 Pembebanan Perpindahan.....	22
Gambar 3.9 Interaksi <i>Elastic Foundation</i>	23
Gambar 3.10 Interaksi <i>Surface-to-Surface Contact</i>	23
Gambar 4.1 Kurva Beban-Defleksi pada Kondisi Tanpa Friksi	25
Gambar 4.2 Kurva Beban-Defleksi <i>Washer</i> dengan Variasi Koefisien Friksi... 27	
Gambar 4.3 Kondisi Leleh Pertama pada Model I-1-0: (a) Posisi pada Kurva Beban-Defleksi; (b) Kontur PEEQ.....	27
Gambar 4.4 Kondisi Leleh Pertama pada Model I-1-0,1: (a) Posisi pada Kurva Beban-Defleksi; (b) Kontur PEEQ.....	28
Gambar 4.5 Kondisi Leleh Pertama pada Model I-1-0,5: (a) Posisi pada Kurva Beban-Defleksi; (b) Kontur PEEQ.....	28
Gambar 4.6 Kondisi Leleh Pertama pada Model I-1-0,57: (a) Posisi pada Kurva Beban-Defleksi; (b) Kontur PEEQ.....	28
Gambar 4.7 Kondisi Leleh Pertama pada Model I-1-0,9: (a) Posisi pada Kurva Beban-Defleksi; (b) Kontur PEEQ.....	29
Gambar 4.8 Perbandingan Hasil Persamaan DIN 2092 dengan Friksi dan Hasil Analisis Numerik sesuai Koefisien Friksi yang Dipakai: (a) Variasi Friksi dengan $\mu = 0,1$; (b) Variasi Friksi dengan $\mu = 0,5$; (c) Variasi Friksi dengan $\mu = 0,57$; (d) Variasi Friksi dengan $\mu = 0,9$	30
Gambar 4.9 Perbandingan Hasil Analisis Numerik Variasi <i>Stacking</i> : (a) Kurva Penuh; (b) Kurva yang Diperbesar.....	31
Gambar 4.10 Kontur <i>Contact Slip</i> pada Konfigurasi <i>Stacking</i> Paralel dengan 2 <i>Washer</i> : (a) <i>Washer</i> Pertama (Bawah); (b) <i>Washer</i> Kedua (Atas)	32
Gambar 4.11 Kontur <i>Contact Slip</i> pada Konfigurasi <i>Stacking</i> Paralel dengan 3 <i>Washer</i> : (a) <i>Washer</i> Pertama (Bawah); (b) <i>Washer</i> Kedua (Tengah); (c) <i>Washer</i> Ketiga (Atas).....	33

Gambar 4.12 Perbandingan Hasil Persamaan dan Analisis Numerik dengan *Stacking Paralel 2 Washer*..... 34

Gambar 4.13 Perbandingan Hasil Persamaan dan Analisis Numerik dengan *Stacking Paralel 3 Washer*..... 34



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tipe Belleville <i>Spring Washer</i> (DIN 2093, 2006)	11
Tabel 2.2 Grup Belleville <i>Spring Washer</i> (DIN 2093, 2006)	11
Tabel 3.1 Nilai Tegangan-Regangan Baja <i>Washer</i>	19
Tabel 3.2 Nomenklatur Model	24
Tabel 4.1 Perbandingan Peningkatan Kekakuan <i>Washer</i> dengan Variasi Koefisien Friksi	26



DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 ANALISIS SENSITIVITAS 39



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemakaian material baja dalam bidang konstruksi semakin meningkat dari masa ke masa. Material baja yang berunsur utama besi dan karbon merupakan material struktur yang dapat didaur ulang tanpa mengurangi kekuatannya. Berdasarkan American Iron and Steel Institute (AISI), baja dikategorikan sebagai material yang paling sering didaur ulang sehingga tingkat efisiensinya tinggi. Selain itu, material baja dapat diproduksi dalam jumlah besar dengan kualitas seragam, cepat proses pemasangannya, dan mudah disambung. Struktur baja dirancang dengan pertimbangan aspek keselamatan dan ekonomis.

Komponen-komponen struktur baja memerlukan sistem sambungan dengan alat penyambung agar setiap bagian elemen terhubung satu dengan yang lainnya. Alat-alat penyambung yang dipakai dalam struktur baja adalah paku keling (*rivet*), baut (*bolt*), dan las (*weld*). Sambungan baut mengharuskan komponen struktur bajanya dilubangi agar bisa dipasang baut. Terdapat dua tipe baut, yakni baut mutu normal dan baut mutu tinggi. Baut mutu normal atau disebut juga *unfinished bolt* merupakan baut yang terbuat dari baja karbon rendah (klasifikasi ASTM A307), sedangkan baut mutu tinggi atau disebut juga *high tension bolt* (HTB) merupakan baut dengan mutu baja tinggi yang dapat dipasang dengan tingkat kekencangan tertentu (klasifikasi ASTM A325 dan A490).

Dalam pemasangan baut mutu tinggi, terdapat 2 tipe pengencangan sambungan, yaitu sambungan tipe tumpu (*bearing type connector*) dan sambungan tipe *slip-critical*. Sambungan tipe tumpu berarti pengencangan sambungannya dikencangkan secukupnya (*snug-tight*) dengan kekuatan manual. Baut pada sambungan tipe tumpu bertumpu terhadap elemen yang disambung dan transfer gaya itu terjadi setelah adanya deformasi. Masalah yang sering terjadi pada sambungan tipe tumpu ini adalah kekuatan lelah (*fatigue*) yang diakibatkan adanya *slip* atau deformasi antar elemen yang disambung secara berulang-ulang.

Kegagalan *fatigue* akibat *slip* dapat dicegah dengan pemakaian sambungan tipe *slip-critical* atau disebut juga tipe friksi. Baut mutu tinggi dengan sambungan tipe ini dipasang dan dikencangkan dengan tingkat kekencangan tertentu yang melebihi kondisi kencang secukupnya (*pretensioning*). Akibat pengencangan tersebut, terjadi gaya tarik pada baut, gaya normal pada elemen yang disambung, dan penjepitan (*clamping*). *Clamping* tersebut menciptakan gaya friksi antara permukaan elemen yang disambung dan gaya itulah yang mencegah terjadinya *slip*. Selain itu, permukaan elemen yang disambung pada tipe *slip-critical* dipersiapkan khusus agar permukaannya memiliki friksi tertentu.

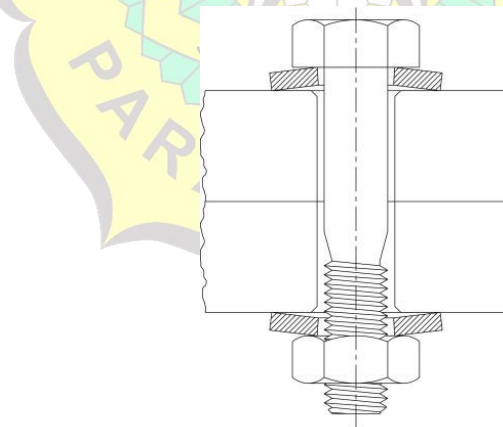
Pencegahan *slip* berarti mengurangi kemungkinan keruntuhan akibat *fatigue*. Tipe *slip-critical* memang memiliki keunggulannya dibandingkan tipe tumpu, tetapi ada juga beberapa hal yang harus dipertimbangkan. Terdapat beberapa metode pengencangan baut mutu tinggi, yakni *turn-of-nut method*, *twist-off-type bolts method*, *calibrated wrench tightening method*, dan *direct tension indicators method*. Menurut evaluasi Jacques Berenbak (2012), tingkat akurasi dari masing-masing metode pengencangan baut itu berbeda. Berdasarkan evaluasi tersebut, *torque method* memiliki tingkat akurasi 79,4%, *combined method* memiliki tingkat akurasi 100%, *HRC method* memiliki tingkat akurasi 81%, dan *DTI method* memiliki tingkat akurasi lebih dari 95%. Berdasarkan tesis Martin Paul Nijgh (2016), baut yang telah dilakukan *pretension* akan mengalami kondisi relaksasi atau penurunan tegangan.

Salah satu cara untuk mengurangi kondisi relaksasi pada baut adalah dengan memakai *spring washer*. *Spring washer* merupakan cincin baut yang tidak datar melainkan berbentuk kerucut (*conical*) seperti yang terdapat pada Gambar 1.1. Pada penelitian ini, Belleville *spring washer* diambil sebagai objek penelitian. Fungsi utama dari Belleville *spring washer* adalah untuk menyerap beban dan sekaligus bertindak sebagai pegas. Setelah ada pembebanan, Belleville *spring washer* pun mengalami kompresi.



Gambar 1.1 Belleville *Spring Washer* (R. Bhamore dan P.K. Sahu, 2019)

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengusulkan kalkulasi terkait Belleville *spring washer*. Persamaan J. O. Almen dan A. László (1936) tidak mempertimbangkan pengaruh friksi yang ada pada ujung Belleville *spring washer*. Selain itu, persamaan DIN 2092 (2006) tidak memberikan hasil yang signifikan akibat pengaruh friksi yang terlalu sederhana menurut Adolf Schnorr (2003). Efek friksi ini perlu ditinjau karena pada saat terjadi pembebanan, Belleville *spring washer* akan membuka dan menghasilkan pergeseran. Pergeseran tersebut menghasilkan friksi yang bisa mempengaruhi persamaan tersebut. Oleh karena itu, studi ini akan meninjau dan mengevaluasi rumus tersebut dengan analisis numerik. Pada pemakaian konfigurasi *stacking*, *washer* itu disusun sebagai *stacking* agar kekakuannya dapat ditingkatkan secara terkontrol, sedangkan jika diubah tebalnya saja akan mempengaruhi kekakuannya dalam skala besar.



Gambar 1.2 Potongan Belleville *Spring Washer* pada Baut (Peter Childs, 2019)

1.2 Inti Permasalahan

Studi pengaruh pemodelan kontak permukaan terhadap kekakuan kompresi Belleville *spring washer* dilakukan demi menemukan signifikansi pengaruh efek friksi yang diabaikan pada beberapa kalkulasi. Perhitungan kekakuan yang tersedia

masih disederhanakan sehingga tidak mempertimbangkan pengaruh friksi yang ada pada ujung Belleville *spring washer*. Pada saat terjadi pembebanan, Belleville *spring washer* akan membuka dan terjadi pergeseran yang mengakibatkan friksi. Studi ini akan meninjau dan mengevaluasi rumus dengan analisis numerik.

1.3 Tujuan Penelitian

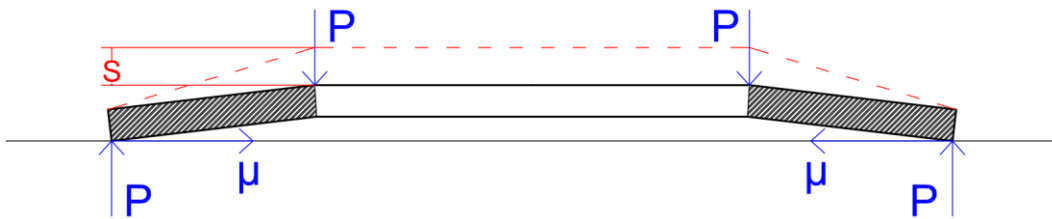
Tujuan dari penelitian skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Mempelajari perhitungan kekakuan Belleville *spring washer* dan menguraikan parameter yang ada dalam perhitungan.
2. Melakukan pemodelan dan analisis kekakuan kompresi Belleville *spring washer* secara numerik, serta meninjau efek friksi yang terjadi pada kontak antara permukaan elemen yang disambung dan Belleville *spring washer*.
3. Memberi rekomendasi kekakuan terhadap pemakaian Belleville *spring washer* pada sambungan komponen struktur baja.

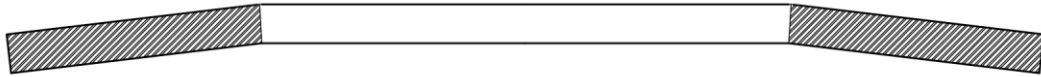
1.4 Pembatasan Masalah

Lingkup penelitian dalam skripsi ini memiliki batasan sebagai berikut:

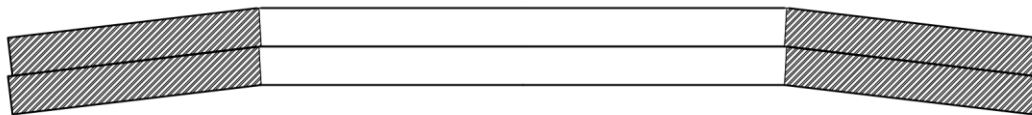
1. Analisis elemen hingga 3D nonlinear Belleville *spring washer* menggunakan program ABAQUS.
2. Spesifikasi material Belleville *spring washer* mengacu pada standar DIN 2093.
3. Belleville *spring washer* dimodelkan dengan menggunakan elemen *solid*.
4. Beban diaplikasikan sebagai peralihan yang mengakibatkan kompresi pada Belleville *spring washer*.
5. Parameter yang dievaluasi mencakup: hubungan beban dan defleksi kompresi; distribusi regangan plastis; dan kesesuaian dengan persamaan perhitungan beban kompresi.
6. Variasi Belleville *spring washer* yang dimodelkan dan dianalisis adalah kondisi interaksi Belleville *spring washer* dengan permukaan pelat baja (Gambar 1.3); serta konfigurasi tunggal (Gambar 1.4) dan konfigurasi tersusun atau *stacking* (Gambar 1.5).



Gambar 1.3 Variasi Kondisi Interaksi Belleville *Spring Washer* dengan Permukaan Pelat Baja



Gambar 1.4 Variasi Konfigurasi Tunggal Belleville *Spring Washer*



Gambar 1.5 Variasi Konfigurasi Tersusun Belleville *Spring Washer*

1.5 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur merupakan metode penelitian yang dilakukan dengan mengumpulkan dan mempelajari daftar pustaka seperti buku, jurnal, artikel, dan penelitian yang sudah ada untuk referensi penelitian.

2. Studi Analisis

Studi analisis merupakan metode penelitian yang dilakukan dengan melakukan analisis terhadap permasalahan penelitian. Perangkat lunak yang dipakai sebagai alat bantu analisis adalah Abaqus CAE.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang dilakukan dalam skripsi ini adalah sebagai berikut:

BAB 1 Pendahuluan

Bab ini berisi latar belakang, inti permasalahan, tujuan penelitian, pembatasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penulisan dari skripsi.

BAB 2 Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi landasan teori yang dipakai sebagai acuan pemodelan dan analisis dalam studi ini.

BAB 3 Pemodelan dan Analisis

Bab ini berisi pemodelan dan analisis pengaruh efek friksi pada Belleville *spring washer* dengan variasi yang ditentukan.

BAB 4 Pembahasan Hasil Analisis

Bab ini berisi pembahasan hasil analisis pengaruh efek friksi dan konfigurasi jumlah *washer* pada Belleville *spring washer* dengan bantuan program ABAQUS.

BAB 5 Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi kesimpulan akhir dan saran berdasarkan hasil yang didapatkan melalui studi.