



TUGAS AKHIR (TM-141585)

**ANALISIS TEGANGAN DAN TEMPERATUR
PADA PENGGURDIAN BAJA EMS 45 DENGAN
MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**YANUAR BUDI PRATAMA
NRP. 2110 100 124**

Dosen Pembimbing
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

**JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016**



FINAL PROJECT (TM-141585)

**FINITE ELEMENT ANALYSIS OF STRESS AND
TEMPERATURE IN DRILLING OF EMS 45
STEEL**

YANUAR BUDI PRATAMA
NRP. 2110 100 124

Academic Advisor
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2016

**ANALISIS TEGANGAN DAN TEMPERATUR PADA
PENGURDAN BAJA EMS 45 DENGAN
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
YANUAR BUDI PRATAMA
NRP. 2110100124

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D. 
NIP. 1953 05 16 197803 1001 (Pembimbing I)
2. Ir. Bambang Pramujati, M.Sc.Eng, Ph.D. 
NIP. 1969 12 03 199403 1001 (Penguji I)
3. Ir. Winarto, DEA.
NIP. 1960 12 13 198811 1001 (Penguji II)
4. Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.
NIP. 1960 06 23 198803 1002 (Penguji III)



SURABAYA
Juli, 2016

ANALISIS TEGANGAN DAN TEMPERATUR PADA PENGURDIAN BAJA EMS 45 DENGAN MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama mahasiswa : Yanuar Budi Pratama
NRP : 2110100124
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen pembimbing : Ir. Bobby O. P. S., M.Sc., Ph.D

ABSTRAK

Pada proses gurdi, kinerja yang biasa dievaluasi adalah gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan, dan kebulatan lubang. Variabel-variabel proses yang mempengaruhi gaya tekan dan torsi adalah feeding, diameter pahat, dan sudut ujung pahat. Kekasaran permukaan dan kebulatan lubang dipengaruhi oleh kecepatan potong dan gerak makan. Evaluasi terhadap kinerja-kinerja dari proses gurdi biasanya dilakukan secara eksperimen. Salah satu pengembangan dari perangkat lunak untuk melakukan evaluasi terhadap kinerja-kinerja tersebut adalah perangkat lunak ABAQUS.

Suatu penelitian untuk menganalisis tegangan dan temperatur maksimum pada pahat gurdi telah dilakukan dengan cara simulasi disertai eksperimen verifikasinya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari variabel-variabel proses kecepatan spindle, point angle, feeding, serta jenis pahat terhadap gaya tekan dan torsi yang terjadi. Selain itu juga untuk mengetahui distribusi-distribusi dari tegangan dan temperatur pada pahat gurdi. Material benda kerja yang digunakan adalah baja EMS 45. Masing-masing variabel yang diteliti memiliki dua level, kecuali kecepatan spindel yang memiliki satu level. Proses gurdi disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak ABAQUS. Eksperimen untuk pengukuran gaya tekan dan torsi

pada proses gurdi juga dilakukan dengan menggunakan dinamometer KISTLER tipe 9272.

Dari eksperimen dan simulasi proses gurdi pada baja EMS 45 didapatkan kesamaan antara data gaya tekan dan torsi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan dan temperatur maksimum terbesar terjadi pada pahat HSS M2 dengan point angle sebesar 134° dan feeding sebesar 0.1 mm/rev.

Kata kunci: gaya tekan, gurdi, tegangan, temperatur, torsi,

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF STRESS AND TEMPERATURE IN DRILLING OF EMS 45 STEEL

Student name : Yanuar Budi Pratama
NRP : 2110100124
Department : Teknik Mesin FTI-ITS
Academic advisor : Ir. Bobby O. P. S., M.Sc., Ph.D

ABSTRACT

In the drilling process, the compressive force, torque, surface roughness, and roundness of holes usually are evaluated. The variables that affect the compressive force and torque is feeding, diameter of the tool drill, and point angle. Surface roughness and roundness hole are affected by cutting speed and feeding. Experiments to evaluate the performances of the drilling process have been done frequently. In this era, the technologies are growing in many aspect especially in computer's software. ABAQUS is the software that can evaluate the performance of drilling process.

A study to analyze the stress and the temperature on tool drill had been conducted by means of simulation with experimental verification. This study aims to determine the effect of process variables spindle speed, point angle, feeding, and the type of tool drill against the compressive force and torque in drilling process. It is also to determine the distributions of stress and temperature on tool drill. Workpiece material in this study is EMS 45 steel. Each of the variables studied has two levels, except the spindle speed that has one level. Drilling process simulated using ABAQUS software. Experiments for measuring the compressive force and torque using a dynamometer Kistler Type 9272.

From the experiments and the simulations on drilling process of EMS 45 steel was found similarities in data compressive force and torque. The simulation results showed that the greatest stress and temperature occurring on the HSS M2 with point angle of 134° and feeding of 0.1 mm/rev.

Keywords: compressive force, drill, stress, temperature, torque,

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar belakang.....	1
1.2. Perumusan masalah.....	3
1.2.1 Batasan masalah.....	3
1.2.2 Asumsi Penelitian.....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Manfaat Penelitian.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1. Tinjauan pustaka.....	5
2.2. Dasar teori.....	6
2.2.1 Proses Gurdi.....	6
2.2.2 Geometri pahat.....	9
2.2.3 Tegangan pada Pahat.....	15
2.2.4 Temperatur pada Pahat.....	17
2.2.5 Metode Elemen Hingga/MEH.....	21
2.2.6 Analisis Regresi.....	27
2.2.5 Pemodelan Matematis untuk Gaya Tekan dan Torsi.....	33
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	35
3.1. Diagram alir penelitian.....	35
3.2. Variabel penelitian.....	37
3.3. Diagram Alir Pemodelan.....	38
3.4. Alat dan Bahan Penelitian.....	41
3.4.1. Alat penelitian.....	41
3.4.2. Bahan penelitian.....	44
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	49

4.1. Data Hasil Eksperimen dan Simulasi Proses Penggurdian.....	49
4.2. Analisis Variabel Proses terhadap Gaya Tekan.....	51
4.3. Analisis Variabel Proses terhadap Torsi.....	54
4.4. Pemodelan Matematis untuk Variabel Proses..	56
4.4.1. Pemodelan Matematis untuk Gaya Tekan.....	56
4.4.2. Pemodelan Matematis untuk Torsi..	60
4.5. Pembahasan.....	67
4.5.1. Perbandingan Gaya Tekan dari Simulasi dan Eksperimen.....	67
4.5.2. Perbandingan Torsi dari Simulasi dan Eksperimen.....	71
4.5.3. Tegangan Maksimum pada Pahat Gurdi Hasil Simulasi.....	74
4.5.4. Temperatur Maksimum pada Pahat Gurdi Hasil Simulasi.....	77
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	83
5.1. Kesimpulan.....	83
5.2. Saran.....	84

DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN
BIODATA PENULIS

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Perkiraan nilai tegangan kompresif yang timbul pada pahat untuk memotong benda kerja.....	16
Tabel 2.2. Parameter hukum Johnson-Cook baja EMS 45.....	23
Tabel 2.3. Parameter hukum Johnson-Cook baja <i>tool steel</i>	23
Tabel 2.4. Parameter teori kegagalan Johnson-Cook untuk baja EMS 45.....	25
Tabel 2.5. ANAVA.....	29
Tabel 3.1. Material <i>properties</i> HSS M2.....	45
Tabel 3.2. Material <i>properties</i> HSS M35.....	45
Tabel 3.3. Material <i>properties</i> baja EMS 45/AISI 1045 (Ye dkk., 2011).....	46
Tabel 4.1. Data hasil eksperimen proses penggurdian.....	50
Tabel 4.2. Data hasil simulasi proses penggurdian.....	51
Tabel 4.3. ANAVA variabel proses terhadap gaya tekan.....	53
Tabel 4.4. Kesimpulan pengaruh variabel proses terhadap gaya tekan.....	54
Tabel 4.5. ANAVA variabel proses terhadap torsi.....	55
Tabel 4.6. Kesimpulan pengaruh variabel proses terhadap torsi.....	56
Tabel 4.7. Hasil ANAVA untuk gaya tekan.....	56
Tabel 4.8. Koefisien regresi untuk model gaya tekan.....	57
Tabel 4.9. Hasil ANAVA untuk torsi.....	61
Tabel 4.10. Koefisien regresi untuk model torsi.....	61
Tabel 4.11. Hasil uji kesamaan antara data gaya tekan hasil eksperimen dan simulasi.....	66
Tabel 4.12. Hasil uji kesamaan antara data torsi hasil eksperimen dan simulasi.....	67

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dalam dunia manufaktur, proses pemesinan mengambil peran yang cukup penting pada pembuatan suatu komponen. Proses pemesinan adalah proses mengubah bentuk benda kerja dari logam maupun nonlogam menjadi suatu komponen atau produk. Proses pemesinan konvensional meliputi bubut, frais, gerinda, dan gaurdi. Pada proses pemesinan konvensional, penggaurdian adalah proses yang paling sering dilakukan, yaitu sekitar 40% dari total *material removal process* (Brinksmeier, 1990). Penggaurdian biasanya digunakan untuk pembuatan lubang baut dan keling pada proses perakitan antara satu komponen dan komponen lainnya.

Galloway (1957) menyebutkan bahwa karena besarnya skala proses penggaurdian yang dilakukan, sedikit peningkatan dalam kinerja pahat secara umum akan memberikan sesuatu yang berguna dan bermanfaat secara ekonomis bagi perusahaan secara individual dan industri rekayasa secara keseluruhan. Selain itu, masalah penggaurdian biasanya menghasilkan limbah produksi yang mahal karena sebagian besar proses penggaurdian berada pada langkah akhir di bagian fabrikasi. Sebagai konsekuensinya, penerapan jenis pahat yang terbatas dan upaya untuk mencari desain pahat yang lebih efisien harus dilakukan.

Cara konvensional sebenarnya telah lama dilakukan untuk mengoptimasi proses penggaurdian melalui uji eksperimen dengan berbagai variasi pengondisian. Dari uji eksperimen dihasilkan luaran-luaran seperti gaya potong, temperatur, keausan pahat, dan kekasaran permukaan yang selanjutnya dianalisa dengan teknik optimasi seperti *design of experiment* (DOE) dan Taguchi atau *Response Surface Methodology*. Memang, uji eksperimen sama pentingnya dengan uji simulasi. Akan tetapi, uji eksperimen untuk memperoleh hasil yang maksimal memerlukan banyak

pengambilan data dan sangat menguras waktu dan biaya pada prosesnya.

Penelitian dan pengembangan pada proses gurdi yang berhubungan dengan model-model analitikal, numerikal, keausan pahat, kehalusan permukaan lubang dan sebagainya telah banyak dilakukan. Armarego and Cheng (1972) telah melakukan analisis pemotongan yang didasarkan pada model pemotongan miring (*oblique cutting*) dari *drill lips* pada *flat rake face drills*. Selain itu, Rubenstein (1991) menampilkan hubungan antara torsi dan gaya tekan dengan variabel proses gerak makan dan variabel konstannya diameter pahat, sedangkan proses gurdinya dilakukan menggunakan beberapa *twist drill* yang memiliki geometri sama. Waluyo (2010) mempresentasikan pengaruh putaran spindle utama mesin gurdi terhadap keausan pahat gurdi dengan menganalisa berat pahat, perubahan sudut mata pahat, dan melakukan visualisasi keausan.

Pada era sekarang ini, dimana terjadi perkembangan komputer yang sangat pesat, pemodelan proses penggurdian juga dilakukan dengan solusi pendekatan numerik (*approximate numerical solution*). Pendekatan ini dapat menyelesaikan pemodelan yang kompleks dengan akurasi tinggi. Metode numerik (*numerical method*) yang saat ini populer untuk melakukan analisis proses pemesinan adalah metode elemen hingga/MEH (*finite element method/FEM*). Dengan menggunakan MEH, suatu masalah yang rumit dibagi menjadi banyak elemen-elemen kecil yang dapat diselesaikan berdasarkan hubungan antara satu elemen dengan elemen yang lain. Strenkowski dkk. (2004) mengembangkan MEH untuk memprediksi torsi dan gaya tekan pada pahat gurdi (*twist drill*). Selain itu, Duan dkk. (2009) melakukan simulasi MEH dan uji eksperimen untuk menganalisa pembentukan geram dan gaya potong pada proses pemesinan *hardened steel* dengan kecepatan tinggi (*high speed machining*).

Bagci (2011) menjelaskan kelebihan MEH dibandingkan dengan metode numerik dan analitis pada proses pemesinan. Beberapa variabel yang sulit untuk diukur, seperti tegangan, regangan, dan

laju regangan (*strain rate*) dapat diperoleh secara kuantitatif. Batas-batas geometri non-linier (*non-linear geometric boundaries*) seperti bentuk geram dapat ditampilkan. Sifat-sifat (*properties*) material dapat diatur sebagai fungsi dari regangan, laju regangan, dan temperatur. Interaksi antara geram dan pahat dapat dimodelkan pada kondisi lekat (*sticking condition*) dan kondisi luncur (*sliding condition*).

Untuk mengetahui lebih lanjut fenomena dari proses pengguridian, maka dilakukan pendekatan MEH untuk memodelkan dan menganalisa distribusi tegangan dan temperatur pada proses pengguridian dengan menggunakan perangkat lunak ABAQUS.

1.2. Perumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana perbandingan antara gaya tekan dan torsi hasil simulasi perangkat lunak ABAQUS dengan hasil eksperimen.
2. Bagaimana cara memodelkan dan menganalisa distribusi tegangan dan temperatur pada pahat gurdi (*twist drill*) dengan menggunakan perangkat lunak ABAQUS.

1.2.1. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Perangkat lunak yang digunakan adalah ABAQUS 6.13.
2. Jenis pahat gurdi yang digunakan adalah *straight twist drill*.
3. Pahat gurdi memiliki 2 alur/*flute*.
4. Pahat gudi terbuat dari HSS M2 dan HSS M35 berdiameter 10 mm.
5. Bahan benda kerja adalah baja EMS 45.

1.2.2. Asumsi Penelitian

Asumsi-asumsi yang diberlakukan pada penelitian ini adalah:

1. Material pahat diasumsikan homogen dan isotropik.

2. Tidak memperhitungkan adanya pengaruh lingkungan seperti korosi dan temperatur dari ruang eksperimen diasumsikan sama dengan temperatur kamar.

1.3. Tujuan Penelitian

Dari permasalahan yang telah dijelaskan, adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Mengetahui dan memahami perbandingan antara gaya tekan dan torsi hasil simulasi perangkat lunak ABAQUS dengan hasil eksperimen.
2. Mengetahui dan memahami cara memodelkan serta menganalisa distribusi tegangan dan temperatur pada pahat gurdi (*twist drill*) dengan menggunakan perangkat lunak ABAQUS.

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai bahan referensi untuk penelitian yang berkaitan dengan analisis distribusi tegangan dan temperatur pada proses gurdi.
2. Sebagai referensi bagi pengguna MEH untuk menyelesaikan permasalahan-permasalahan yang berhubungan dengan geometri dan pembebanan pada pahat dan benda kerja yang umumnya sulit untuk diselesaikan secara matematis pada proses penggurdian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Proses penggurdian adalah adalah proses pembuatan lubang pada benda padat dengan menggunakan pahat yang berputar. Pada proses pemesinan konvensional, penggurdian adalah proses yang paling sering dilakukan yaitu sekitar 40% dari seluruh proses pembuangan material (Brinksmeier, 1990). Pada proses penggurdian, terjadi pembuangan material benda kerja sehingga akan timbul panas yang mengakibatkan suhu di daerah deformasi akan naik. Panas ini sebagian besar terbawa oleh geram, sebagian merambat melalui pahat dan sisanya mengalir melalui benda kerja menuju ke sekeliling. Tekanan yang besar akibat gaya pemotongan serta temperatur yang tinggi mengakibatkan permukaan aktif dari pahat akan mengalami keausan.

Yong dan Jie (2009) melakukan simulasi proses penggurdian pada titanium alloy Ti6Al4V menggunakan pahat berbahan karbida. Pada simulasi ini benda kerja dianggap sebagai *rigid body* dan pahat sangat keras dibandingkan benda kerja. Simulasi dilakukan sebanyak dua kali. Parameter proses simulasi pertama adalah kecepatan spindel sebesar 555 rpm, kecepatan makan sebesar 65 mm/min, dan kedalaman potong 4 mm. Parameter proses simulasi kedua adalah kecepatan spindel sebesar 800 rpm, kecepatan makan sebesar 43 mm/min, dan kedalaman potong 4 mm. Setelah dilakukan simulasi dengan dua macam parameter proses tersebut, diperoleh hasil bahwa tegangan von Mises dan temperatur selama proses penggurdian meningkat pada awalnya. Selanjutnya tegangan von Mises dan temperatur mencapai nilai maksimal saat pahat gudi berada pada kondisi *steady* dan terus menurun saat pahat menembus benda kerja.

Ucun (2016) membuat pemodelan 3D MEH mengenai proses penggurdian Al7075-T6 menggunakan pahat *twist drill* dan

3-flute drill disertai eksperimen validasinya. Parameter proses penggurdian secara eksperimen dan simulasi menggunakan tiga macam gerak makan (0.05, 0.1, 0.2 mm/rev) dan 4 macam kecepatan potong (60, 90, 120, 150 mm/min). Gaya tekan dan torsi hasil simulasi selanjutnya dibandingkan dengan hasil eksperimen. Simulasi yang dilakukan pada penelitian ini juga digunakan untuk mengetahui besarnya tegangan yang timbul di pahat selama proses penggurdian. Hasil penelitian ini menyatakan bahwa ada kecocokan antara gaya tekan dan torsi eksperimen dengan simulasi. Selain itu, dari penelitian ini dapat diketahui bahwa nilai gaya tekan, torsi, dan tegangan pada *twist drill* lebih kecil dari pada *3-flute drill*. Tegangan maksimum pada pahat gurdi terkonsentrasi pada area sekitar *chisel edge* dan *cutting edge*.

Mieszczak dan Lis (2010) melakukan simulasi proses penggurdian untuk mengamati temperatur permukaan pahat gurdi. Diameter pahat yang digunakan sebesar 8 mm dengan kedalaman potong proses gurdi sebesar 10 mm. Parameter proses penggurdian yang digunakan adalah gerak makan sebesar 0.156 mm/putaran dan kecepatan potong 25 m/menit. Setelah dilakukan simulasi diperoleh hasil bahwa temperatur paling ekstrem terjadi pada tepi pahat yaitu sekitar 660°. Selain itu, dari simulasi diperoleh hasil bahwa kecepatan potong pahat gurdi mempunyai pengaruh paling besar terhadap kenaikan temperatur.

2.2. Dasar Teori

2.2.1 Proses Gurdi

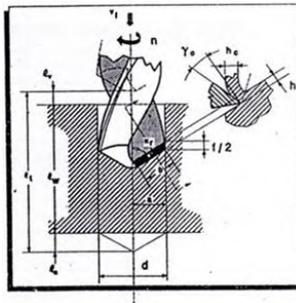
Proses gurdi (*drilling*) adalah proses pembuatan lubang silindris (*cylindrical hole*) pada benda kerja dengan menggunakan pahat gurdi jenis penggurdi puntir (*twist drill*). Pahat gurdi adalah sebuah pahat pemotong yang ujungnya berputar dan memiliki sisi potong dan galur yang berhubungan secara berkesinambungan disepanjang badan pahat gurdi. Galur ini, yang dapat berbentuk lurus atau *helix*, disediakan untuk memungkinkan lewatnya geram dan fluida pendingin. Pada proses ini, pahat gurdi berputar dan

menekan ke bawah untuk melakukan proses pemakanan ke dalam benda kerja. Pada proses pemotongan terjadi gerak relatif dan persinggungan antara pahat dan benda kerja yang menghasilkan geram (Rochim, 1993).

Karakteristik yang membedakan proses gurdi dengan proses pemesinan lainnya adalah (Rochim, 1993):

- Geram harus keluar dari lubang yang dibuat.
- Ketika ukuran geram yang keluar besar dan atau kontinyu dapat menyebabkan masalah.
- Pada pembuatan lubang yang dalam prosesnya sulit.
- Pada proses pembuatan lubang dalam pada benda kerja yang besar biasanya cairan pendingin dimasukkan ke permukaan potong melalui tengah mata gurdi.

Elemen dasar dari proses penggurdian pada material benda kerja ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Elemen dasar proses gurdi (Rochim, 1993)

Menurut Rochim (1993) elemen-elemen dasar proses gurdi, meliputi:

A. Pahat potong

a. Kecepatan Potong

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \text{ (m/menit)} \quad (2.1)$$

b. Gerak makan per mata potong

$$f_z = \frac{V_f}{n.z} \text{ (mm/putaran)} \quad (2.2)$$

c. Kedalaman potong per sisi potong

$$a = \frac{d}{2} \text{ (mm)} \quad (2.3)$$

d. Gerak makan per sisi potong

$$a = \frac{f_z}{2.\sin(K_r)} \text{ (mm/putaran)} \quad (2.4)$$

e. Lebar pemotongan

$$b = \frac{d}{2.\sin(K_r)} \text{ (mm)} \quad (2.5)$$

f. Luas pemotongan

$$A = a.b \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2.6)$$

g. Kecepatan penghasilan geram

$$Z = \frac{\pi.d^2.V_f}{4 \times 1000} \text{ (cm}^3\text{/menit)} \quad (2.7)$$

Dengan:

- d = Diameter pahat potong
 z = Jumlah gigi (mata potong)
 V_f = Kecepatan makan
 K_r = Sudut potong utama

B. Benda kerja

$$L_t = L_v + L_w + L_N \quad (2.8)$$

Dengan:

- L_t = Panjang total langkah pemotongan (mm)
 L_v = Langkah awal pemotongan (mm)
 L_w = Panjang pemotongan benda kerja (mm)

$$L_N > \frac{L_t}{2. \tan(K_r)}$$

C. Mesin perkakas gurdi

a. Putaran poros utama mesin

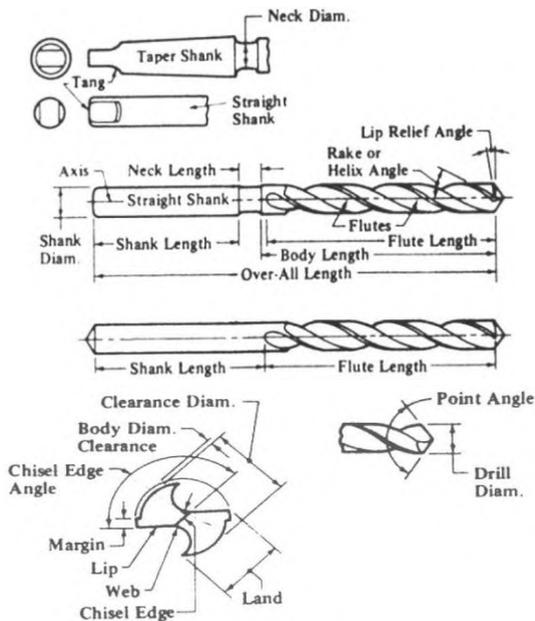
$$n = \frac{1000.V}{\pi.d} \text{ (putaran/menit)} \quad (2.9)$$

b. Waktu pemotongan

$$t_c = \frac{L_t}{V_f} \text{ (menit)} \quad (2.10)$$

2.2.2 Geometri Pahat

Sebagian besar dari proses gurdi dilakukan dengan menggunakan pahat gurdi berjenis *twist drill*. Nama-nama bagian pahat ini ditunjukkan pada Gambar 2.2. Di antara bagian-bagian pahat tersebut yang paling utama adalah sudut *helix* (*helix/rake angle*), sudut ujung pahat/sudut potong utama (*point angle/lip angle*) dan sudut bebas (*clearance angle*).



Gambar 2.2. Geometri pahat gurdi (*twist drill*) (Rochim, 1993)

Bagian-bagian utama dari *twist drill* adalah *body* (badan pahat), *point* (bagian dari ujung yang runcing) dan *shank* (tangkai). *Twist drill* dapat diklasifikasikan menurut materialnya, jenis tangkainya, jumlah *flute*, ukuran diameter dan geometri pahatnya.

Berdasarkan jenis tangkainya, *twist drill* dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Rochim, 1993):

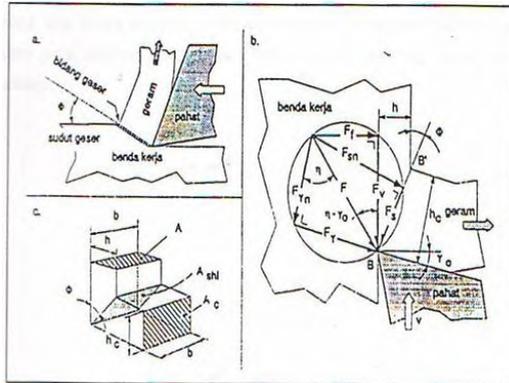
1. *Straight shank drill*, yaitu jenis pahat yang memiliki tangkai berbentuk silinder.
2. *Taper shank drill* yaitu jenis pahat yang memiliki tangkai berbentuk konis, yang sesuai untuk dipasang langsung pada spindel mesin.

Berdasarkan jumlah *flute*, *twist drill* dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Rochim, 1993):

1. *Single flute drill* yaitu pahat yang memiliki satu *flute* dan digunakan untuk proses *drill* pada material plastik.
2. *Two flute drill* yaitu pahat jenis konvensional.
3. *Three flute drill* yaitu pahat jenis *twist drill* yang relatif baru dikembangkan pada proses pemotongan logam.

2.2.3 Gaya Pemotongan pada Proses Gurdi

Pemotongan pada proses pemesinan dianggap sebagai akibat dari timbulnya konsentrasi tegangan yang disebabkan oleh gaya tekan dari mata potong pahat. Tegangan pada benda kerja tersebut mempunyai orientasi yang kompleks dan pada salah satu arah akan menimbulkan tegangan geser yang maksimum. Apabila tegangan geser tersebut melebihi kekuatan bahan benda kerja maka akan terjadi deformasi plastis pada daerah tegangan yang dirambatkan oleh gerakan pahat. Deformasi plastis ini menggeser dan memutuskan material benda kerja diujung pahat pada suatu bidang geser, sehingga terbentuk geram (Rochim, 1993). Gambar 2.3 menunjukkan pembentukan geram akibat tegangan geser yang dilakukan pahat terhadap benda kerja yang diambil dari lingkaran Merchant.



Gambar 2.3. a). Teori pemotongan geram b). Arah gaya-gaya reaksi pemotongan (lingkaran gaya pemotongan) c). Analisa geram (Rochim, 1993)

Gaya potong adalah gaya yang menimbulkan tegangan geser yang menghasilkan deformasi plastis pada bidang geser. Pada perhitungan teoritik diasumsikan bahwa deformasi material benda kerja dalam proses pemotongan terjadi dalam dua dimensi, dan tegangan terdistribusi secara merata pada bidang geser. Berdasarkan analisis geometrik dari lingkaran gaya seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.3.b, persamaan dari gaya potong teoritik F_v adalah:

$$F_v = \frac{F_s \cos(\eta - \gamma_0)}{\cos(\Phi + \eta - \gamma_0)} [N] \quad (2.11)$$

Dengan:

$$F_v = F \cos(\eta - \gamma_0) \quad (2.12)$$

$$F_s = F \cos(\Phi + \eta - \gamma_0) \quad (2.13)$$

F adalah gaya total dan F_s adalah gaya geser yang mendeformasikan material pada bidang geser sehingga melampaui batas elastik. F_s dapat ditentukan dengan menggunakan penampang bidang geser dan tegangan geser yang terjadi, yaitu:

$$F_s = A_{shi} \tau_{shi} \text{ [N]} \quad (2.14)$$

Dengan:

$$A_{shi} = A / \sin \Phi = \text{penampang bidang geser [mm}^2\text{]}$$

Luas pemotongan adalah:

$$A = \frac{d - d_i}{2} \cdot \frac{f}{2} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (2.15)$$

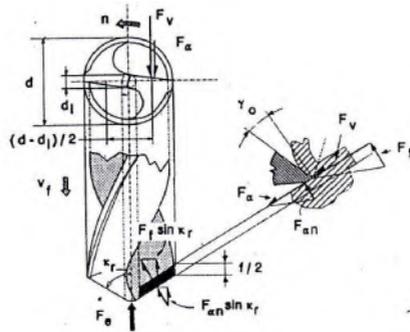
Dengan demikian gaya potong dapat dirumuskan sebagai:

$$F_v = \tau_{shi} A \frac{\cos(\eta - \gamma_0)}{\sin \Phi \cos(\Phi + \eta - \gamma_0)} \text{ [N]} \quad (2.16)$$

$$F_v = \tau_{shi} \cdot \frac{d - d_i}{2} \cdot \frac{f}{2} \cdot \frac{\cos(\eta - \gamma_0)}{\sin \Phi \cos(\Phi + \eta - \gamma_0)} \text{ [N]} \quad (2.17)$$

Pada proses gurdi yang menggunakan pahat dengan dua mata potong, gaya pemotongan pada salah satu mata potong dapat diuraikan menjadi dua komponen, yaitu F_v dan F_f , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. F_f adalah gaya makan yang searah dengan kecepatan makan. Penekanan yang terjadi pada proses gurdi berfungsi untuk melawan gaya ekstruksi yang cukup besar diujung pahat gurdi (karena kecepatan potong diujung pahat gurdi sama dengan nol, maka tidak terjadi pemotongan melainkan penekanan atau ekstruksi benda kerja), serta untuk melawan

gesekan pada bidang utama atau mayor bagi kedua mata potong (Rochim, 1993) .



Gambar 2.4. Gaya pemotongan pada proses gurdi (Rochim, 1993)

Berdasarkan Gambar 2.4, dapat diturunkan persamaan gaya tangensial, yaitu:

$$F_t = F_v + F_a \quad [N] \quad (2.18)$$

F_a adalah gaya gesek pada bidang utama, yang tergantung pada gaya gesek spesifik persatuan panjang aktif mata potong (k_f [N/mm]). Gaya gesek ini dipengaruhi oleh geometri pahat, benda kerja, cairan pendingin, dan kondisi pemotongan. Persamaan gaya gesek adalah:

$$F_a = k_f \frac{d - d_i}{2 \sin K_r} \quad [N] \quad (2.19)$$

Substitusi persamaan (2.17) dan persamaan (2.19) kedalam persamaan (2.18) menghasilkan persamaan gaya tangensial berikut ini:

$$F_t = \tau_{shi} \cdot \frac{d - d_i}{2} \cdot \frac{f}{2} \cdot \frac{\cos(\eta - \gamma_0)}{\sin\Phi \cos(\Phi + \eta - \gamma_0)} + k_f \frac{d - d_i}{2 \sin K_r} \quad [N] \quad (2.20)$$

Dengan:

- τ_{shi} adalah tegangan geser pada bidang geser [N/mm^2]
- γ_0 adalah sudut geram
- η adalah sudut gesek
- Φ adalah sudut geser

Sudut gesek (η) ditentukan oleh koefisien gesek (μ), sedangkan μ dapat dicari dengan membandingkan besar gaya gesek dan gaya normal pada bidang geram. Sudut geser (Φ) ditentukan oleh sudut geram (γ_0). Semakin besar sudut geram, maka sudut geser akan membesar dan menyebabkan penurunan luas bidang geser yang berakibat pada menurunnya gaya potong (Rochim, 1993).

Momen torsi yang diperlukan agar pahat potong dapat berputar adalah:

$$M = F_t \frac{d-d_i}{2} \quad [Nmm] \quad (2.21)$$

Gaya tekan yang diperlukan agar proses pemakanan dapat berlangsung adalah:

$$F_z = 2F_f \sin K_r + 2F_{an} \sin K_r + F_e \quad [N] \quad (2.22)$$

Dengan:

F_z = gaya tekan total untuk dua sisi potong [N]

F_f = gaya makan [N]

$$F_f = F_v \tan(\eta - \gamma_0) \quad (2.23)$$

F_{an} = gaya normal pada bidang utama potong, yang tergantung pada gaya normal spesifik persatuan panjang aktif mata potong (k_n [N/mm]) yang dipengaruhi oleh jenis geometri pahat, benda kerja,

cairan pendingin, dan kondisi pemotongan.

F_e = gaya ekstrusi yang terjadi di ujung pahat potong.
 Sesuai dengan penampang diameter inti d_i dari hasil percobaan, secara umum gaya ini bernilai sekitar 50% sampai 55% dari gaya tekan total [N].

Dengan demikian persamaan gaya tekan total adalah:

$$F_z = 4 \left\{ F_v \tan(\eta - \gamma_0) \sin K_r + k_n \frac{d - d_i}{2} \right\} \text{ [N]} \quad (2.24)$$

$$F_z = 4 \left\{ F_v \tan(\eta - \gamma_0) \sin K_r + k_n \frac{d - d_i}{2} \right\} \text{ [N]} \quad (2.24)$$

2.2.3. Tegangan pada Pahat

Pada proses bubut (*turning*) ada dua macam tegangan utama yang bekerja pada pahat, yaitu sebagai berikut:

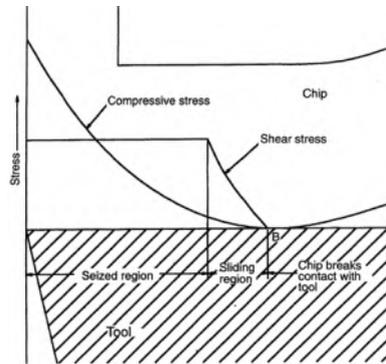
1. Gaya potong yang bekerja pada pahat dengan *rake angle* kecil mengakibatkan adanya tegangan kompresif di sekitar *rake face*. Nilai rata-rata dari tegangan kompresif diperoleh dari gaya tekan (F_c) dibagi dengan area kontak. Area kontak biasanya tidak dapat diketahui secara akurat sehingga bisa timbul *error* dalam memperkirakan besarnya tegangan kompresif. Besarnya nilai tegangan kompresif biasanya sangat tinggi apabila pahat digunakan untuk memotong material dengan kekuatan tinggi. Tabel 2.1 adalah perkiraan tegangan kompresif yang timbul pada pahat ketika digunakan untuk memotong benda kerja.

Tabel 2.1. Perkiraan nilai tegangan kompresif yang timbul pada pahat untuk memotong benda kerja (Trent, 1977)

No	<i>Work material</i>	<i>Cutting force (Fc) [N]</i>	<i>Contact area [mm²]</i>	<i>Mean compressive stress [N/mm²]</i>
1	<i>Iron</i>	1070	3.1	340
2	<i>Copper</i>	4150	13.5	310
3	<i>Titanium</i>	455	0.77	570
4	<i>Steel (medium carbon)</i>	490	0.65	770
5	<i>70/30 brass</i>	500	12.2	420
6	<i>Lead</i>	323	22.5	14

2. Gaya makan (F_f) yang bekerja pada pahat mengakibatkan timbulnya tegangan geser. Nilai rata-rata dari tegangan geser sebanding dengan gaya makan (F_f) dibagi dengan area kontak. Nilai F_f biasanya lebih kecil daripada F_c sehingga tegangan geser yang timbul akan lebih kecil daripada tegangan kompresifnya pada area kontak yang sama.

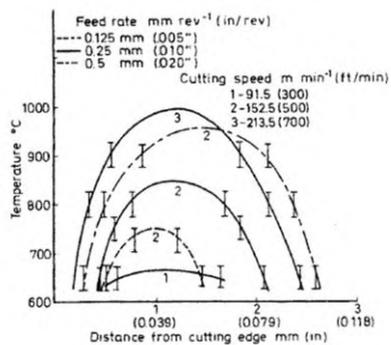
Untuk mengetahui distribusi tegangan kompresif dan geser pada pahat selama proses pemotongan benda kerja dapat dilihat seperti pada Gambar 2.5 :



Gambar 2.5. Model distribusi tegangan pada pahat (Zorev, 1963)

2.2.4. Temperatur pada Pahat

Panas yang timbul di pahat pada proses bubut erat kaitannya dengan performa pahat. Panas ini mempunyai pengaruh yang signifikan dalam membatasi kemampuan suatu pahat pada pengerjaan benda kerja seperti baja dan besi yang memiliki titik leleh tinggi. Pengaruh dari kecepatan potong dan gerak makan terhadap gradien temperatur ditampilkan seperti Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Distribusi temperatur pada pahat (Smart, 1975)

Gambar di atas menjelaskan distribusi temperatur pada rake face pahat pada beberapa kecepatan potong dan gerak makan yang berbeda. Pada gambar di atas terlihat jelas bahwa semakin tinggi gerak makan, maka semakin tinggi pula temperatur pada rake face, terutama rake face yang berjarak 1 mm dari cutting edge.

Kerja/energi mekanik dalam proses pemotongan yang bebas getaran seluruhnya diubah menjadi panas/kalor. Energi mekanik persatuan waktu atau daya mekanik yang diubah menjadi energi panas persatuan waktu tersebut dapat dituliskan sebagai berikut :

$$Q = Q_{sh} + Q_{\gamma} + Q_{\alpha}$$

Dengan:

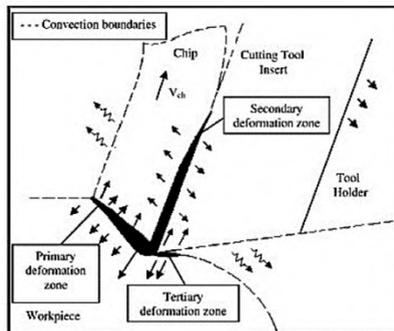
Q = panas total yang dihasilkan perdetik [J/s atau W]

Q_{sh} = panas yang dihasilkan perdetik pada bidang geser [J/s atau W]

Q_{γ} = panas yang dihasilkan perdetik pada bidang geram [J/s atau W]

Q_{α} = panas yang dihasilkan perdetik pada bidang utama [J/s atau W]

Berdasarkan hasil penelitian pada berbagai kondisi pemotongan, prosentase panas yang dihasilkan pada bidang geser (*primary deformation zone*), bidang geram (*secondary deformation zone*), dan bidang utama (*tertiary deformation zone*) masing-masing berkisar diantara harga 80%, 18%, dan 2% (Rochim, 1993), seperti terlihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Ilustrasi model perpindahan panas pada *metal cutting* (Raof dkk., 2016).

Panas tersebut sebagian akan terbawa oleh geram, sebagian mengalir menuju ke pahat dan benda kerja dengan prosentase sebagai berikut:

$$Q = Q_c + Q_s + Q_w \text{ [W]}$$

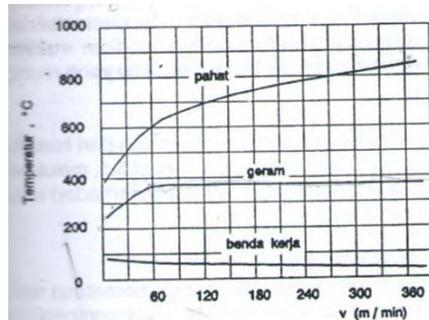
Dengan:

Q_c = panas yang terbawa oleh geram (75%)

Q_s = panas yang merambat melalui pahat (20%)

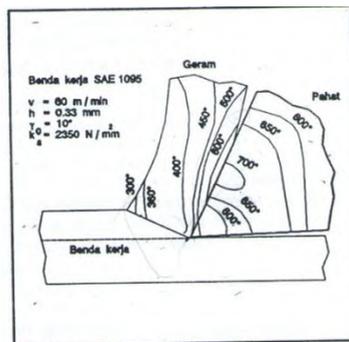
Q_w = panas yang merambat melalui benda kerja (5%)

Meskipun prosentase panas yang terbawa oleh geram sangat tinggi tidaklah berarti bahwa temperatur geram menjadi lebih tinggi daripada temperatur pahat. Panas mengalir bersama-sama geram yang selalu terbentuk dengan kecepatan tertentu, sedangkan panas yang merambat melalui pahat terjadi sebagai proses konduksi panas yang dipengaruhi oleh konduktivitas panas material pahat serta penampang pahat yang relatif kecil. Dengan demikian, temperatur rata-rata pahat akan lebih tinggi (kurang lebih dua kalinya) daripada temperatur rata-rata geram. Gambar 2.8 menunjukkan temperatur pahat (pada bidang geram yang bergesekan dengan geram), temperatur rata-rata geram, serta temperatur benda kerja, sebagai fungsi kecepatan potong dalam mengefreis (Rochim, 1993).



Gambar 2.8. temperatur pahat, geram, dan benda kerja sebagai fungsi dari kecepatan potong pada proses freis (Rochim, 1993)

Distribusi temperatur pada ujung pahat diperlihatkan seperti Gambar 2.9. dari gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa temperatur tertinggi terjadi pada bidang geram pada daerah agak jauh dari mata potong yaitu disekitar lokasi dimana geram yang melengkung mulai berpisah dengan permukaan pahat (Rochim, 1993).



Gambar 2.9. Garis-garis isoterm pada pahat saat proses pemotongan berlangsung

Besarnya panas yang dihasilkan pada proses *turning* dari faktor gaya dan kecepatan sesuai dengan persamaan di bawah ini (Bhojar, 2013):

$$Q_s = F_s V_s = \frac{\tau h V \cos(\alpha_n)}{\sin(\alpha_n) \cos(\phi_n - \alpha_n)} \quad (2.25)$$

$$Q_f = F_f V_c = \frac{\tau h V \cos(\beta_n)}{\cos(\phi_n + \beta_n - \alpha_n) \sin(\phi_n - \alpha_n)} \quad (2.26)$$

$$Q = Q_f + Q_s \quad (2.27)$$

Dengan:

h = ketebalan geram saat belum terpotong,
dipengaruhi kecepatan makan pada *turning*
[mm]

V = kecepatan potong [m/menit]

τ = *shear flow stress* [Mpa]

α_n = *normal rake angle* [°]

β_n = *normal friction angle* [°]

ϕ_n = *normal shear angle* [°]

2.2.5. Metode Elemen Hingga/MEH

MEH adalah suatu metode numerik dengan tujuan untuk memperoleh pemecahan pendekatan dari suatu persamaan diferensial parsial (*partial differential equation* atau PDE). Meskipun cikal bakal teori MEH sudah ada sejak tahun 1940-an, baru pada tahun 1970-an metode ini dirumuskan secara formal. Pada awalnya metode ini digunakan di bidang teknik penerbangan untuk perhitungan kekuatan bangun-raga (*structure*) pesawat pada industri pesawat terbang, tetapi dewasa ini MEH telah diterapkan dalam berbagai persoalan teknik, seperti struktur, dinamika fluida, perpindahan panas, akustik, maupun elektromagnetik.

Pemodelan dari proses pemotongan yang dilakukan secara numerik dengan menggunakan MEH dapat diaplikasikan untuk mensimulasikan proses penggurdian. Sebagai contoh, model numerik dapat digunakan untuk menggambarkan pahat yang kompleks. Salah satu cara untuk menyelesaikan permasalahan

yang berkaitan dengan MEH dan pemodelan pada proses penggurdian dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ABAQUS. Pada simulasi proses penggurdian diaplikasikan beberapa model dan aturan berikut ini (Duan, 2009):

A. Model Material Johnson-Cook

Untuk memodelkan fenomena *thermal* dan *stress* dari proses penggurdian, digunakan hukum material Johnson-Cook. Hukum Johnson-Cook menjabarkan hubungan antara tegangan, regangan, laju regangan, dan temperatur. Persamaannya berdasarkan penelitian dari Johnson dkk. (1983) adalah sebagai berikut:

$$\sigma = [A + B(\varepsilon)^n] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right] \quad (2.28)$$

Dengan:

σ	= von Mises <i>flow stress</i>	[MPa]
ε	= regangan plastis	
$\dot{\varepsilon}$	= laju regangan	[s ⁻¹]
$\dot{\varepsilon}_0$	= laju regangan plastis referensi	[s ⁻¹]
T	= temperatur benda kerja	[°C]
T_{melt}	= temperatur leleh material benda kerja	[°C]
T_{room}	= temperatur kamar	[°C]
A	= <i>yield strength</i>	[MPa]
B	= <i>hardening modulus</i>	[MPa]
C	= koefisien sensitivitas laju regangan	
n	= koefisien <i>hardening</i>	
m	= koefisien <i>thermal softening</i>	

Nilai konstanta A, B, C, n, dan m pada persamaan (2.25) diperoleh dengan melakukan eksperimen laju regangan tinggi yang menggunakan metode *Split Hopkinson Pressure Bar* (SHPB). Untuk material baja EMS 45 dari percobaan Ye dkk. (2011)

diperoleh nilai konstanta A, B, C, n, dan m seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.2:

Tabel 2.2. Parameter hukum Johnson-Cook baja EMS 45

No	Parameter	Nilai
1	<i>Yield strength</i> (A)	553 MPa
2	<i>Hardening modulus</i> (B)	600 MPa
3	Koefisien <i>sensitivitas laju regangan</i> (C)	0.0134
4	Koefisien <i>hardening</i> (n)	0.234
5	Koefisien <i>thermal softening</i> (m)	1

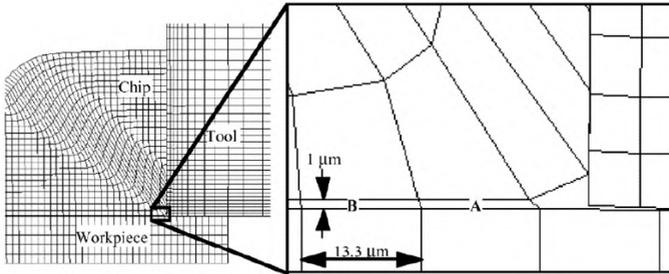
Sedangkan pada *tool steel*, nilai konstanta A, B, C, n, dan m diperoleh dari percobaan SHPB McClain dkk. (2002) seperti pada tabel 2.3:

Tabel 2.3. Parameter hukum Johnson-Cook *tool steel*

No	Parameter	Nilai
1	<i>Yield strength</i> (A)	391.3 MPa
2	<i>Hardening modulus</i> (B)	723.9 MPa
3	Koefisien <i>sensitivitas laju regangan</i> (C)	0.1144
4	Koefisien <i>hardening</i> (n)	0.3067
5	Koefisien <i>thermal softening</i> (m)	0.9276

B. Teori Kegagalan Material

Setelah menggunakan model material Johnson-Cook juga digunakan kriteria kegagalannya. Akibatnya, apabila terjadi kegagalan pada elemen *meshing* penghubung antara elemen A dan B akan dihilangkan dari komputasi (perhitungan) seperti terlihat pada Gambar 2.10 (Jula dkk., 2012).



Gambar 2.10. *Link* elemen pada MEH

Model dinamis kegagalan Johnson-Cook didasarkan pada nilai regangan plastis ekuivalen pada titik-titik integrasi di elemen. Kegagalan ini diasumsikan terjadi ketika nilai parameter kerusakan (D) melebihi 1. Persamaan parameter kerusakan (D) menurut Duan dkk. (2009) adalah sebagai berikut:

$$D = \Sigma \left(\frac{\Delta \varepsilon^{pl}}{\varepsilon_f^{pl}} \right) \quad (2.29)$$

Dengan:

$\Delta \varepsilon^{pl}$ = inkremen dari regangan plastis ekuivalen

ε_f^{pl} = regangan saat kegagalan

ε_f^{pl} diasumsikan bergantung pada laju regangan plastis tak berdimensi $\left(\frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)$, p/q (p adalah *pressure stress* dan q adalah tegangan von Mises), dan temperatur tak berdimensi $\theta = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}$. Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\varepsilon_f^{pl} = \left[d_1 + d_2 \exp \left(d_3 \frac{p}{q} \right) \right] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left(1 + d_5 \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right) \quad (2.30)$$

Dengan:

d_1 - d_5 = parameter-parameter kegagalan yang diukur pada temperatur transisi T dan dibawahnya

$\dot{\epsilon}_0$ = laju regangan referensi

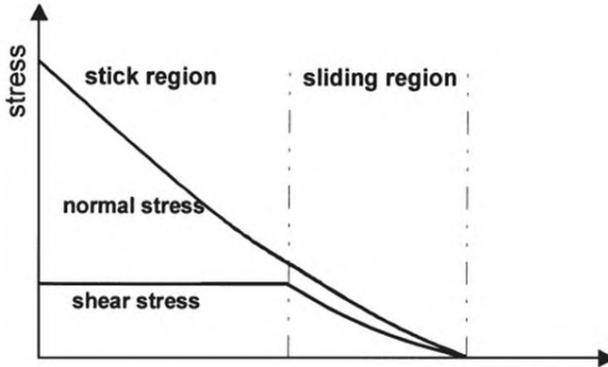
Dari penelitian Duan dkk. (2009) diperoleh nilai d_1 - d_5 untuk baja EMS 45 seperti ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Parameter teori kegagalan Johnson-Cook untuk baja EMS 45

No	Parameter	Nilai
1	d_1	0.06
2	d_2	3.31
3	d_3	-1.96
4	d_4	0.0018
5	d_5	0.58

C. Gesekan antara Pahat dan Geram

Gaya gesek erat kaitannya dengan pembentukan geram dan performa suatu pahat. Pengetahuan akan gaya gesek tersebut berguna untuk mempelajari fenomena-fenomena yang terjadi akibat kontak antara pahat dan geram, sehingga hasil pemodelan pemotongan yang dibuat bisa akurat. Pada *rake face* pahat gurdi ada 2 daerah yang berbeda, yaitu daerah *sticking* dan daerah *sliding*. Zorev (1963) dalam penelitiannya mengemukakan bahwa tegangan geser pada daerah *sliding* mempunyai proporsi yang hampir sama dengan tegangan normal. Tegangan normal mencapai nilai maksimal pada daerah *sticking* dan nilainya lebih besar dibandingkan tegangan geser seperti terlihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Distribusi tegangan pada *rake face* pahat

Berdasarkan hasil studi eksperimen, koefisien gesek secara konstan digunakan pada daerah *sliding* (hukum Coulomb) dan tegangan akibat gesek pada daerah *sticking* dapat dicari melalui pendekatan menggunakan persamaan (Kim dkk, 1999):

$$\tau_f = \mu\sigma_n, \text{ ketika } \tau_f < k \quad (2.31)$$

$$\tau_f = k, \quad \text{ketika } \tau_f \geq k \quad (2.32)$$

Dengan:

- τ_f = tegangan akibat gesek (MPa)
- σ_n = tegangan normal (MPa)
- μ = koefisien gesek
- k = tegangan geser pada geram (MPa)

Model gesekan antara pahat dan benda kerja di atas telah banyak digunakan secara umum pada pemodelan pemotongan/penggurdian menggunakan MEH. Dari pendekatan menggunakan persamaan 2.31 dan 2.32 diperoleh tegangan gesek konstan berasal dari tegangan alir geram. Meskipun begitu, sulit untuk mendapatkan koefisien gesek pada daerah *sliding* dikarenakan

kondisinya sangat berbeda dengan tes koefisien gesek secara konvensional. Permukaan bawah dari geram adalah bentukan baru yang mempunyai sifat *high strain hardening*, kekerasan geram bisa dua kali lipat dari benda kerja akibat terjadi deformasi plastis. Variasi kekerasan inilah yang bisa menimbulkan berubahnya koefisien gesek.

2.2.6. Analisis Regresi

Analisis statistik yang tepat sangat diperlukan untuk pengambilan keputusan. Saat ini permasalahan-permasalahan statistika tidak lagi menjadi masalah yang rumit karena seiring dengan perkembangan teknologi komputer, pekerjaan statistik sangat terbantu dengan adanya program aplikasi komputer untuk statistik. Langkah terakhir untuk menganalisis secara benar data kontinu adalah menentukan persamaan regresi. Analisis regresi merupakan persamaan prediksi yang bisa berbentuk linear maupun non linear yang bermanfaat untuk menemukan hubungan antara variabel-variabel. Analisis regresi menghitung persamaan prediksi di mana persamaan ini secara matematis bisa memprediksi Y dengan menggunakan data X yang tersedia. Dalam penelitian ini digunakan perangkat lunak *Minitab 17* untuk membantu dalam analisis regresi. Secara umum bentuk persamaan regresi menurut Steel dan Torrie (1980) adalah sebagai berikut:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (2.33)$$

Dengan:

Y = variabel respon

β_0 = intersep

β_i = koefisien parameter model

- X_i = nilai koding variabel bebas
 ε = residual dengan asumsi IIDN $(0, \sigma^2)$

Persamaan taksiran orde pertama adalah:

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i \quad (2.34)$$

Dengan:

- \hat{Y} = nilai taksiran
 b_0 = konstanta
 b_i = taksiran parameter

X_i = Variabel bebas

Persamaan untuk model orde kedua ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (2.35)$$

Pendugaan untuk model orde kedua dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} X_i X_j \quad (2.36)$$

Untuk dapat mengestimasi kontribusi pengaruh dari setiap faktor pada respon sehingga akurasi model yang digunakan dapat ditentukan dapat digunakan analisa varians (ANAVA) yang merupakan teknik perhitungan secara kuantitatif. Tabel ANAVA ditunjukkan pada tabel 2.7 berikut ini.

Tabel 2.5 ANAVA

Sumber Variasi	db	Jumlah Kuadrat	Rata-rata kuadrat	F _{ratio}
Regresi	k	$SS_R = \mathbf{b}'\mathbf{X}'\mathbf{Y} - n\bar{Y}^2$	$MS_R = SS_R / k$	$\frac{MS_R}{MS_E}$
Residual	n-k-1	$SS_E = \mathbf{Y}'\mathbf{Y} - \mathbf{b}'\mathbf{X}'\mathbf{Y}$	$MS_E = SS_E / (n-k-1)$	
Lack of fit	n-k-1-n _e	$SS_{LOF} = SS_E - SS_{PE}$	$MS_{LOF} = SS_{LOF} / (n-k-1-n_e)$	$\frac{MS_{LOF}}{MS_{PE}}$
Pure error	n _e	$SS_{PE} = \sum_{j=1}^m \sum_{u=1}^{n_j} (Y_{ju} - \bar{Y}_j)^2$	$MS_{PE} = SS_{PE} / n_e$	
Total	n-1	$SS_T = \mathbf{Y}'\mathbf{Y} - n\bar{Y}^2$		

Keterangan:

$$\begin{aligned}
 n_e &= (\text{banyak pengulangan}) - 1 \\
 k &= \text{banyak variabel prediktor} \\
 n &= \text{banyak pengamatan} \\
 \text{db} &= \text{derajat bebas}
 \end{aligned}$$

Pengujian Regresi

Beberapa pengujian regresi yang lazim digunakan adalah sebagai berikut:

a. Pengujian Kesesuaian Model

Pengujian model pada koefisien determinasi (R^2).

Pengujian Koefisien Determinasi (R^2)

Koefisien determinasi (R^2) adalah suatu nilai statistik yang dapat digunakan untuk mengetahui apakah ada hubungan pengaruh antara dua variabel (variabel X dan Y). Nilai koefisien determinasi menunjukkan presentase total variasi nilai variabel dependen (Y) yang dapat dijelaskan oleh persamaan regresi yang dihasilkan. Koefisien determinasi nilainya terletak antara $0 < R^2 < 1$. Semakin besar nilai R^2 , maka semakin besar pula pengaruh semua variabel X terhadap variabel Y. Misalnya R^2 dari hasil perhitungan adalah 0,87 atau 87% maka berarti total variasi nilai Y yang dapat dijelaskan oleh model persamaan regresi adalah 87% dan sisanya yaitu 13% adalah variasi nilai variabel Y yang dipengaruhi oleh variabel lain yang berada diluar model.

b. Pengujian Koefisien Regresi

Pengujian koefisien regresi dilakukan secara individu.

Pengujian Koefisien Regresi Secara Individu

Pengujian parameter secara individu digunakan untuk mengetahui seberapa besar sumbangan tiap-tiap parameter variabel bebas terhadap terjadinya perubahan pada variabel respon Y dalam model. Hipotesisnya adalah:

$$H_0 : \beta_i = 0$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0$$

$$t = \frac{b_i}{s(b_i)}$$

Statistik uji: $t = \frac{b_i}{s(b_i)}$ dengan b_i adalah taksiran β_i sedangkan $s(b_i)$ dirumuskan dengan:

$$s(b_i) = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}} \quad (2.37)$$

Penolakan hipotesis dilakukan jika $|t_{hitung}| > t_{n-k-1; \alpha/2}$.

Pengujian Koefisien Regresi Secara Serentak

Hipotesis yang digunakan dalam pengujian parameter regresi secara serentak adalah sebagai berikut:

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 : \text{minimal ada satu } ; j = 1, 2, \dots, k$$

Statistik uji yang digunakan:

$$F_{hitung} = MS_R / MS_E = \frac{SS_R / k}{SS_E / (N - 1 - k)} \quad (2.38)$$

Pada tingkat signifikansi α tertentu, apabila $F_{hitung} > F_{(\alpha; k, n-1-k)}$ maka H_0 ditolak. Dengan demikian secara statistik dapat disimpulkan bahwa variabel-variabel X memberikan sumbangan yang cukup berarti dalam model.

c. Pemeriksaan Asumsi Residual

Residual didefinisikan sebagai selisih antara nilai pengamatan dan nilai dugaannya $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$. Dalam analisis regresi terdapat asumsi bahwa residual bersifat bebas satu sama lain (independen),

mempunyai mean nol dan varians yang konstan σ^2 (identik), serta berdistribusi normal atau $\varepsilon_i \sim IIDN(0, \sigma^2)$. Oleh karena itu dalam setiap pendugaan model harus dilakukan pemeriksaan asumsi tersebut apakah terpenuhi atau tidak.

Pengujian Independen

Uji independen digunakan untuk menjamin bahwa pengamatan telah dilakukan secara acak, yang berarti antar pengamatan tidak ada korelasi (independen). Pemeriksaan asumsi ini dilakukan dengan menggunakan plot ACF (*Auto Correlation Function*). Residual bersifat independen jika nilai korelasi berada dalam

$$\text{interval} \pm \frac{2}{\sqrt{n}} .$$

Pengujian Identik

Pengujian varian identik bertujuan untuk memenuhi apakah residual mempunyai penyebaran yang sama. Hal ini dilakukan dengan memeriksa plot e_i terhadap \hat{Y}_i (secara visual). Jika penyebaran datanya acak (menyebar disekitar garis nol) dan tidak menunjukkan pola-pola tertentu, maka asumsi identik terpenuhi.

Pengujian Distribusi Normal

Normal probability plot pada *software Minitab 15* menyatakan probabilitas dari residual suatu respon. Selain itu, dengan *Kolmogorov-Smirnov normality test* juga dapat digunakan dalam pengujian kenormalan residual. Hipotesa yang digunakan adalah:

H_0 : residual berdistribusi normal.

H_1 : residual tidak berdistribusi normal.

Pada tingkat signifikansi α tertentu, apabila $F_{hitung} > F_{(\alpha; k, n-1-k)}$ maka H_0 ditolak.

2.2.7. Pemodelan Matematis Untuk Gaya Tekan dan Torsi

Karena kompleksnya proses pemesinan, pengembangan analisis model matematika berdasarkan solid mekanik adalah sulit. Oleh karena itu penelitian eksperimental dikembangkan dan digunakan untuk proses-proses analisis. Dengan menggunakan metode statistik (untuk mengolah data percobaan), dapat diperoleh model matematis yang menggambarkan hubungan antara variabel bebas dengan variabel tidak bebasnya. Hubungan antara kondisi pemotongan dengan gaya tekan dan torsi yang terjadi pada proses gurdi ditunjukkan pada persamaan berikut (Rochim, 1993):

$$F = C_1 d^m f^n \quad (2.39)$$

$$M_t = C_2 d^x f^y \quad (2.40)$$

Dengan:

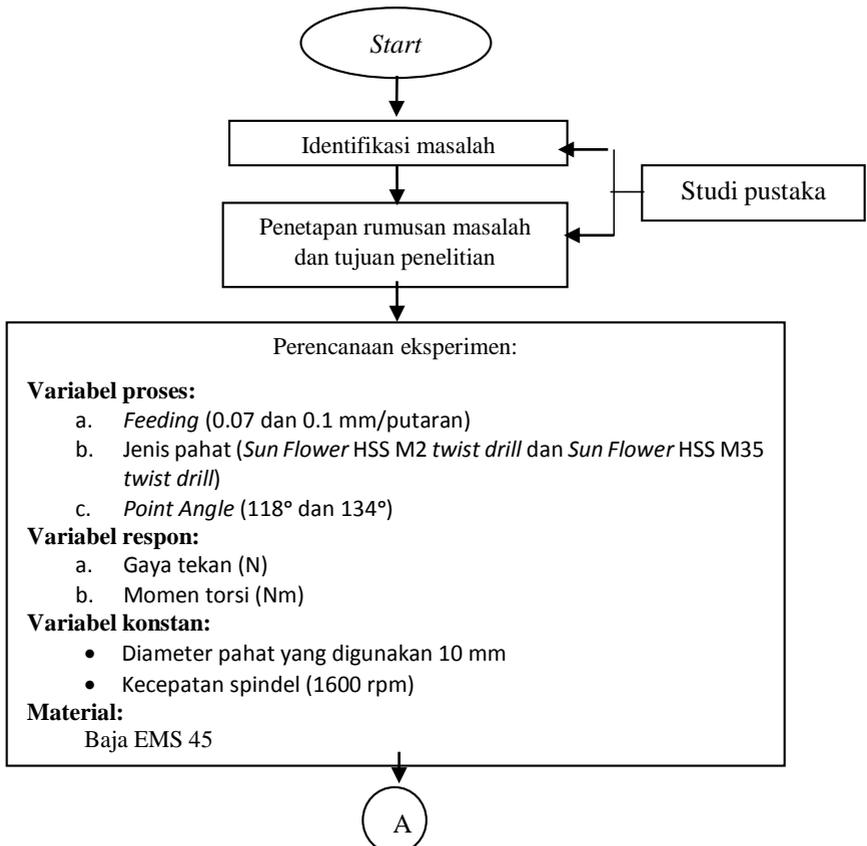
F	= gaya tekan	[N]
M_t	= momen puntir	[N-mm]
d	= diameter	[mm]
f	= gerak makan	[mm/putaran]
C_1, C_2	= konstanta yang harganya dipengaruhi oleh jenis benda kerja dan pemakaian cairan pendingin. Kecepatan potong tidak berpengaruh dan hanya berlaku untuk pahat gurdi dengan geometri tertentu	
x, y, m, n	= pangkat untuk diameter dan gerak	

makan dalam rumus korelasi
momen dan gaya

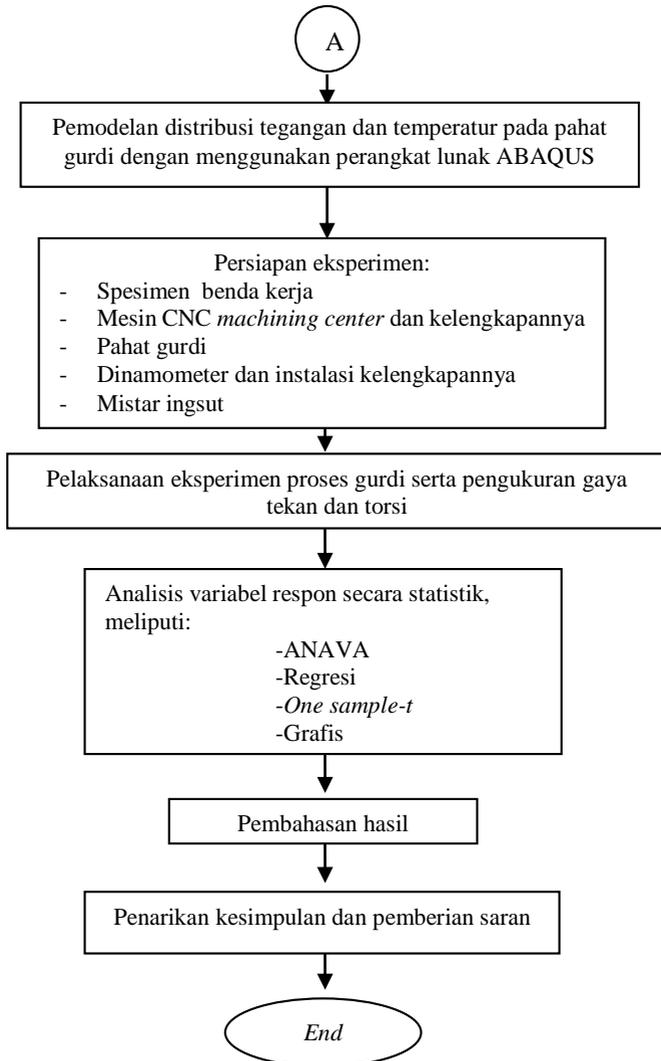
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Tahapan-tahapan yang dilaksanakan untuk menyelesaikan permasalahan pada tugas akhir ini disajikan dalam diagram alir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 berikut ini:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian (lanjutan)

3.2. Variabel Penelitian

Untuk mendapatkan data eksperimen pada proses gurdi pada material EMS 45, maka variabel-variabel yang akan digunakan untuk penelitian adalah sebagai berikut:

1. Variabel Proses

Variabel proses merupakan variabel yang nilainya dapat dikendalikan dan dapat ditentukan berdasarkan pertimbangan tertentu dalam penelitian yang mengarah pada tujuan dari penelitian. Variabel proses yang digunakan pada tugas akhir ini adalah:

- a. *Feeding* (f)
- b. Jenis pahat
- c. *Point angle* (PA)

2. Variabel respon

Variabel respon merupakan variabel yang nilainya tidak dapat ditentukan diawal dan akan dipengaruhi oleh perlakuan yang diberikan. Nilai variabel ini dapat diketahui setelah melakukan eksperimen. Variabel respon yang digunakan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Gaya tekan (N)
- b. Torsi (Nm)

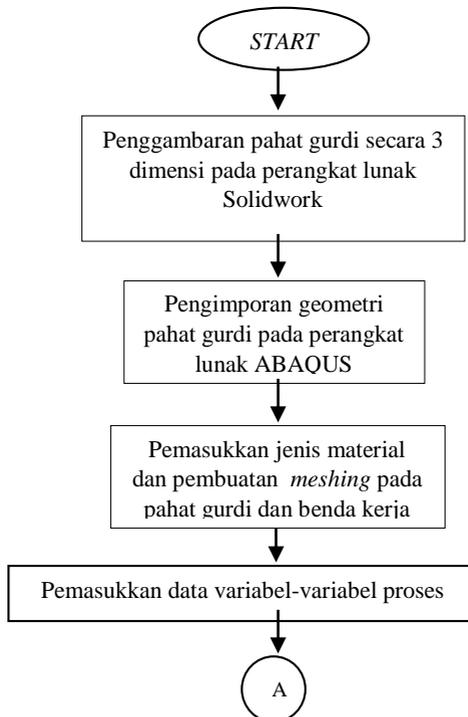
3. Variabel konstan

Variabel konstan merupakan variabel proses yang tidak diteliti. Variabel ini dijaga agar tidak berubah selama proses

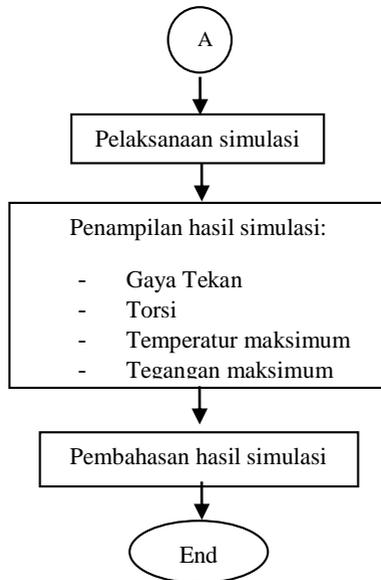
eksperimen sehingga tidak mempengaruhi hasil eksperimen. Variabel konstan yang digunakan pada tugas akhir ini adalah diameter pahat (10 mm) dan kecepatan spindel (1600 rpm).

3.3. Diagram Alir Pemodelan

Langkah-langkah yang dilakukan dalam pemodelan distribusi tegangan pahat gurdi disajikan dalam diagram alir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2 sebagai berikut:

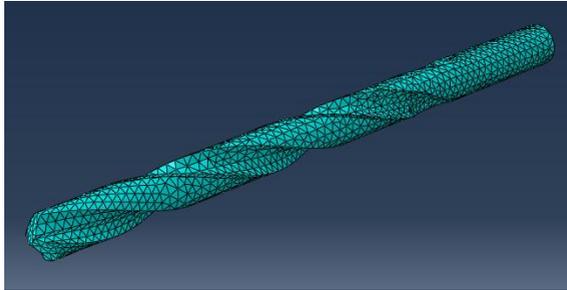


Gambar 3.2. Diagram Alir Pemodelan



Gambar 3.2. Diagram Alir Pemodelan (lanjutan)

Pemodelan distribusi tegangan pahat gurdi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ABAQUS. Kualitas simulasi pahat gurdi diatur dengan menggunakan *mesh*, dimana semakin halus *mesh* yang digunakan maka kualitas simulasi akan baik, tetapi proses komputasi membutuhkan waktu yang lama. *Mesh* yang halus membutuhkan perhitungan MEH yang rumit sehingga penelitian ini hanya menggunakan *auto mesh*. Hasil *meshing* ditunjukkan seperti pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Hasil *auto mesh*

Data variabel proses penggurdian dimasukkan dalam *boundary condition*. Adapun langkah-langkah pada perangkat lunak ABAQUS menurut Amrita dkk. (2010) adalah sebagai berikut:

1. Membuka perangkat lunak ABAQUS pada komputer.
2. *file => import part=> drill.igs.*
3. *Part Module => menggambar benda kerja*
4. *Property Module => memasukkan properties material benda kerja dan pahat gurdi*
5. *Assembly Module => memposisikan pahat gurdi dan benda kerja sesuai dengan posisi proses penggurdian*
6. *Step Module => membuat langkah-langkah analisis (thermal, stress, forces)*
7. *Interaction Module => input jenis kontak antara pahat dan benda kerja (interaksi thermal dan mechanical)*
8. *Load Module => membuat pembebanan spesifik yang diterapkan pada proses penggurdian dan menetapkan boundary conditions*
9. *Mesh Module => melakukan meshing pada benda kerja dan pahat gurdi*
10. *Job Module => memerintahkan software untuk memproses simulasi dari input-input yang telah dimasukkan pada software.*
11. *Visualization Module => menampilkan hasil simulasi dalam bentuk grafik*

3.4. Alat dan Bahan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk memperoleh data respon yang nilainya akan dipengaruhi oleh perlakuan yang diberikan. Penelitian dilakukan di Laboratorium Pemesinan Jurusan Teknik Mesin ITS Surabaya.

3.4.1 Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan adalah:

1. Mesin CNC *milling* EMCO VMC-200

Mesin CNC yang digunakan adalah jenis mesin CNC *milling* dengan merek EMCO VMC-200. Mesin ini memiliki putaran spindle sebesar 0-4500 rpm dan gerak makan sebesar 0-4000 mm/menit. Mesin ini memiliki 3 sumbu, dimana panjang sumbu X adalah sebesar 420 mm, sumbu Y sebesar 330 mm dan sumbu Z sebesar 240 mm. Mesin ini ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Mesin CNC *milling* EMCO VMC-200

2. Dinamometer

Dinamometer yang digunakan adalah dinamometer merek KISTLER tipe 9272, dan ditunjukkan pada Gambar 3.5. Dinamometer ini

berfungsi untuk mengukur gaya tekan (F_z) dan torsi (M_z) saat proses penggurdian.



Gambar 3.5. Dinamometer KISTLER tipe 9272

3. Akusisi data tipe 5697A

Akusisi data digunakan sebagai penghubung dari *charge amplifier* dan dinamometer ke *notebook*, sehingga data dapat ditampilkan pada *notebook*. Akusisi data ditunjukkan pada Gambar 3.6 dan memiliki dimensi 208 mm x 70 mm x 249 mm serta massa seberat 2,15 kg.



Gambar 3.6. Akusisi data tipe 5697A

4. *Charge amplifier* type 5070A

Charge amplifier yang terhubung dengan dinamometer digunakan untuk menampilkan hasil pengukuran gaya-gaya potong dan torsi. *Charge amplifier* ini ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7. Charge amplifier type 5070A

5. Notebook Compaq

Notebook Compaq berfungsi menampilkan dan mengolah data hasil percobaan. *Notebook* sebelumnya sudah *ter-install software* DynoWare dari KISTLER seperti ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8. Compaq

6. Mistar insut

Mistar insut digunakan untuk mengukur dimensi spesimen uji yang memiliki kecermatan 0,02 mm. Mistar insut ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9. Mistar insut

7. *Personal Computer* (PC)

PC yang digunakan untuk simulasi penggurdian menggunakan software Abaqus 6.13 adalah PC dengan spesifikasi tinggi, *memory* RAM sebesar 16 GB dan processor i7. Simulasi dilakukan menggunakan PC dari Lab CAE Teknik Mesin ITS seperti terlihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10

3.4.2 Bahan Penelitian

Pada pelaksanaannya, penelitian ini membutuhkan beberapa bahan penelitian, diantaranya:

1. Pahat gurdi

Pahat gurdi yang digunakan ada 2, terbuat dari material HSS (*High Speed Steel*) M2 dan HSS M35. Pahat tersebut berjenis *twist drill*. Detail geometri pahat gurdi HSS M2 dan HSS M35 adalah sebagai berikut, data selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 1:

a. Pahat Gurdi HSS M2

- Merek dagang = Sun Flower
- Kodifikasi = DIN 338
- Jumlah alur/*flute* = 2 buah
- Diameter = 10 mm
- *Web thickness* = 1.77 mm
- *Helix angle* = 28°
- *Lip clearance angle* = 13°
- *Chisel edge angle* = 140°
- *Point angle* = 118°

Data *Material properties* HSS M2 yang digunakan untuk melakukan simulasi FEM adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 3.1 di bawah ini:

Tabel 3.1 *Material Properties* HSS M2

No	<i>Properties</i>	Nilai
1	<i>Density (ρ)</i>	8100 kg m ⁻³
2	<i>Thermal conductivity (K)</i>	24 W m ⁻¹ K ⁻¹
3	<i>Specific heat (c)</i>	420 J kg ⁻¹ K ⁻¹
4	<i>Modulus of Elasticity</i>	225 GPa
5	<i>Thermal Expansion Ratio</i>	12.1 x 10 ⁻⁶ /K

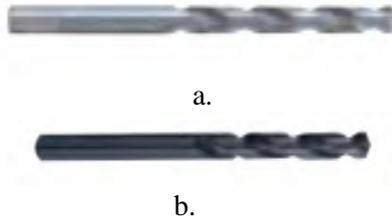
b. Pahat Gurdi HSS M35

- Merek dagang = Sun Flower
- Kodifikasi = DIN 338
- Jumlah alur/flute = 2 buah
- Diameter = 10 mm
- *Web thickness* = 1.72 mm
- *Helix angle* = 29°
- *Lip clearance angle* = 10
- *Chisel edge angle* = 125°
- *Point angle* = 134°

Data *Material properties* HSS M35 yang digunakan untuk melakukan simulasi FEM adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 3.2:

Tabel 3.2 *Material Properties* HSS M35

No	<i>Properties</i>	Nilai
1	<i>Density (ρ)</i>	8000 kg m ⁻³
2	<i>Thermal conductivity (K)</i>	24 W m ⁻¹ K ⁻¹
3	<i>Specific heat (c)</i>	420 J kg ⁻¹ K ⁻¹
4	<i>Modulus of Elasticity</i>	230 GPa
5	<i>Thermal Expansion Ratio</i>	11.6 x 10 ⁻⁶ /K



Gambar 3.11 a.) Pahat HSS M2 b.) Pahat HSS M35

2. Benda Kerja

Benda kerja yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja EMS 45. Baja EMS 45 setara dengan baja AISI 1045 dan nilai-nilai *properties*-nya ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3. *Material properties* baja EMS 45/AISI 1045 (Ye dkk., 2011).

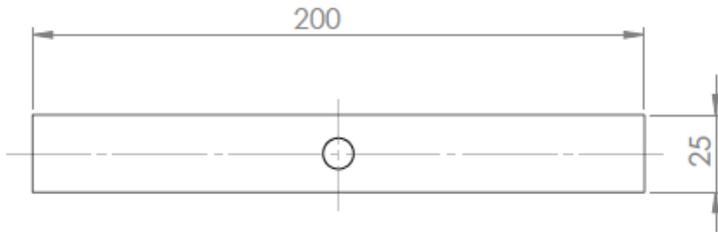
No	<i>Properties</i>	Nilai
1	<i>Density</i> (ρ)	7800 kg m ⁻³
2	<i>Thermal conductivity</i> (K)	38 W m ⁻¹ K ⁻¹
3	<i>Specific heat</i> (c)	420 J kg ⁻¹ K ⁻¹
4	<i>Taylor-Quinney coefficient</i> (β)	0.9
5	<i>Initial yield stress</i> (A)	553 MPa
6	<i>Hardening modulus</i> (B)	600 MPa
7	<i>Strain rate dependency coefficient</i> (C)	0.0134
8	<i>Work-hardening exponent</i> (n)	0.234
9	<i>Thermal softening coefficient</i> (m)	1
10	<i>The reference strain rate</i> (γ_0)	1 s ⁻¹
11	<i>Room temperature</i> (T ₀)	300 K
12	<i>Melting temperature</i> (T _{melt})	1733 K

Benda kerja baja EMS 45 ditunjukkan pada Gambar 3.12.

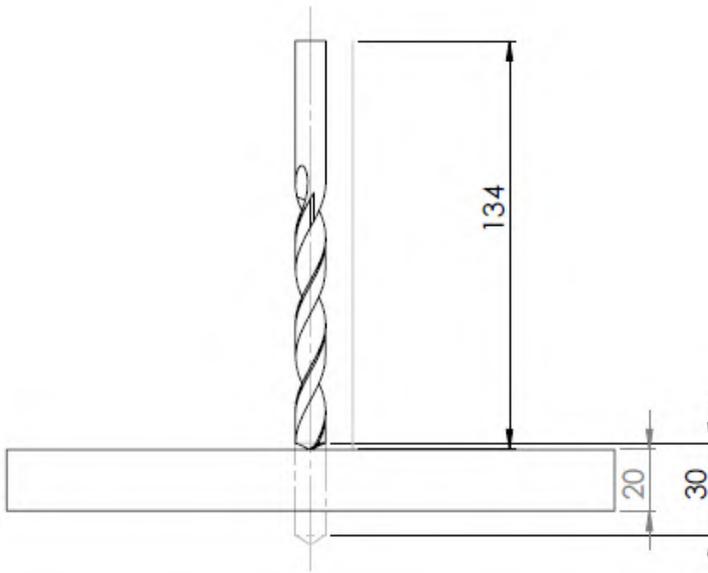


Gambar 3.12. Benda kerja baja EMS 45

Posisi benda kerja dan pahat gurdi baik pada saat simulasi maupun eksperimen proses penggurdian ditunjukkan pada Gambar 3.13. Hasil selengkapnya pada Lampiran 9.



(a)



(b)

Gambar 3.13. Posisi benda kerja dan pahat gurdi saat proses penggurdian a) pandangan atas; b) pandangan samping

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data pada penelitian tugas akhir ini diperoleh dari hasil eksperimen dan simulasi yang dilakukan dengan menggunakan *software* Abaqus 6.13. Simulasi yang telah dilakukan menghasilkan *output* berupa gaya tekan dan torsi proses penggurdian, tegangan maksimum pada pahat gurdi, dan temperatur maksimum pahat gurdi selama proses penggurdian. Eksperimen proses penggurdian yang telah dilaksanakan juga menghasilkan *output* berupa gaya tekan dan torsi. Data gaya tekan dan torsi hasil eksperimen selanjutnya dibandingkan dengan data gaya tekan dan torsi hasil simulasi untuk dilakukan validasi.

Analisis dilakukan dengan memvariasikan besar *feeding* dan PA pada pahat HSS M2 dan HSS M35 dengan kecepatan spindel sebesar 1600 rpm. Data dari hasil eksperimen dan simulasi berupa grafik gaya tekan dan torsi selanjutnya ditampilkan pada lembar Lampiran 2.

4.1. Data Hasil Eksperimen dan Simulasi Proses Penggurdian

Data hasil eksperimen ditampilkan pada Tabel 4.1 dan data hasil simulasi ditampilkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.1. Data hasil eksperimen proses penggurdian

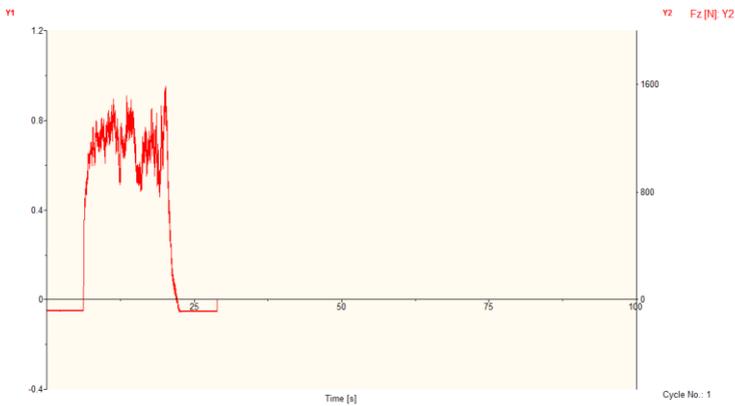
No	Pahat	PA	Feeding	Gaya Tekan (N)	Torsi (N.m)
1	HSS M2	118	0.07	1678	3.391
				1603	3.771
				1588	4.3976
2	HSS M2	118	0.1	2656	4.082
				2566	4.095
				2846	5.98
3	HSS M2	134	0.07	2523	3.591
				2546	3.571
				1719	2.456
4	HSS M2	134	0.1	2675	4.182
				2746	3.995
				2887	3.876
5	HSS M35	118	0.07	1411	4.396
				1652	4.386
				1576	1.3217
6	HSS M35	118	0.1	2143	3.974
				2174	3.753
				2245	4.725
7	HSS M35	134	0.07	1897	4.096
				2041	2.878
				1811	2.224
8	HSS M35	134	0.1	2489	3.591
				2478	3.571
				2357	4.15

Tabel 4.2. Data hasil simulasi proses penggurdian

No	Pahat	PA	Feeding	Gaya Tekan (N)	Torsi (N.m)	Tegangan (MPa)	Temperatur (K)
1	HSS M2	118	0.07	1748.061	3.751277	920.6	685.3
2	HSS M2	118	0.1	2682.921	4.574124	1138	727.97
3	HSS M2	134	0.07	2350.837	3.133893	991.5	702.5
4	HSS M2	134	0.1	2891.273	3.969675	1244	811
5	HSS M35	118	0.07	1634.76	3.347057	884.9	557.7
6	HSS M35	118	0.1	2246.47	4.040634	1042.09	720.1
7	HSS M35	134	0.07	2012.879	2.933297	936.2	646.3
8	HSS M35	134	0.1	2546.355	3.58394	1207	798.9

4.2. Analisis Variabel Proses terhadap Gaya Tekan

Pengukuran gaya tekan pada proses penggurdian baja EMS 45 dilakukan dengan dinamometer. Gaya tekan yang dapat diukur dinamometer pada proses penggurdian adalah gaya yang searah sumbu Z (gaya normal). Contoh hasil pengukuran dinamometer untuk gaya tekan sumbu Z (F_z) ditunjukkan pada Gambar 4.1. Secara lengkap, hasil pengukuran F_z dapat dilihat pada lembar Lampiran 2.



Gambar 4.1. Gaya tekan (F_z) yang terjadi pada eksperimen proses penggurdian baja EMS 45 dengan menggunakan pahat HSS M35, kecepatan spindel 1600 rpm, *feeding* 0.07 mm/rev, dan PA 118°.

Gaya tekan (F_z) hasil pengukuran dinamometer pada proses penggurdian selalu berubah-ubah tergantung variabel proses yang digunakan. Analisis variansi (ANAVA) digunakan untuk mengetahui secara statistik bagian dari variabel proses yang mempunyai pengaruh paling signifikan terhadap gaya tekan (F_z). Hasil dari ANAVA untuk gaya tekan (F_z) ditampilkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. ANAVA variabel proses terhadap gaya tekan

<i>Source</i>	DF	SS	MS	F	<i>P-value</i>
Jenis pahat	1	197087	197087	7.58	0.051
<i>PA</i>	1	224115	224115	8.62	0.043
<i>Feeding</i>	1	935940	935940	36.00	0.004
<i>Error</i>	4	103999	26000		
Total	7	1461142			

Sumber: Hasil Perhitungan

Berdasarkan Tabel 4.3, *P-value* menunjukkan bagian dari variabel proses yang mempunyai pengaruh paling signifikan terhadap gaya tekan (F_z). *P-value* yang lebih kecil dari *level of significant* (α) mengindikasikan bahwa variabel proses tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon. Pada penelitian ini nilai α adalah 5%. Selanjutnya dilakukan penarikan kesimpulan menggunakan *P-value* hasil ANAVA sebagai berikut:

1. Untuk variabel proses jenis pahat.
 $P\text{-value} = 0.051 > \alpha = 0.05$, maka secara statistik tidak ada pengaruh variabel proses jenis pahat terhadap gaya tekan (F_z).
2. Untuk variabel proses PA
 $P\text{-value} = 0.043 < \alpha = 0.05$, maka secara statistik ada pengaruh variabel proses PA terhadap gaya tekan (F_z).
3. Untuk variabel proses *feeding*
 $P\text{-value} = 0.004 < \alpha = 0.05$, maka secara statistik ada pengaruh variabel proses *feeding* terhadap gaya tekan (F_z).

Berdasarkan ANAVA diperoleh *P-value* untuk variabel proses jenis pahat, PA, dan *feeding* yang lebih kecil dari *level of significant* (α). Oleh karena itu, ketiga variabel proses tersebut mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap gaya tekan.

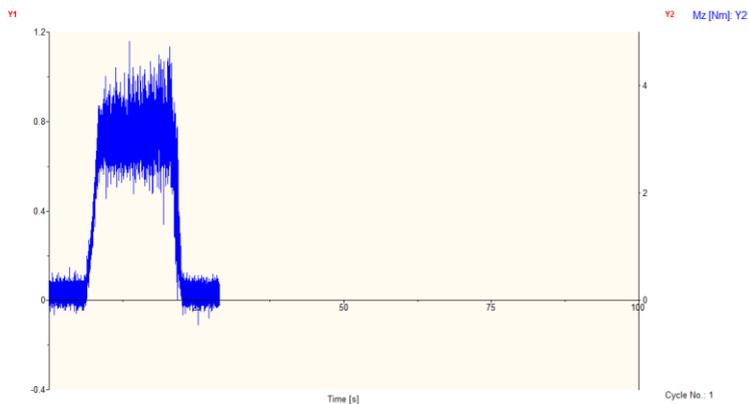
Kesimpulan pengaruh untuk masing-masing variabel proses terhadap gaya tekan ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Kesimpulan pengaruh variabel proses terhadap gaya tekan

Sumber Variasi	Kesimpulan
Jenis pahat	Tidak Berpengaruh
PA	Berpengaruh
<i>Feeding</i>	Berpengaruh

4.3. Analisis Variabel Proses terhadap Torsi

Pengukuran torsi pada proses penggurdian baja EMS 45 dilakukan dengan dinamometer. Contoh hasil pengukuran dinamometer untuk torsi sumbu Z (M_z) ditunjukkan pada Gambar 4.2. Secara lengkap, hasil pengukuran M_z dapat dilihat pada lembar Lampiran 2.



Gambar 4.2. Torsi (M_z) yang terjadi pada eksperimen proses penggurdian baja EMS 45 dengan menggunakan pahat baja HSS M35, kecepatan spindel 1600 rpm, *feeding* 0.07 mm/rev, dan PA 118°.

Torsi (M_z) hasil pengukuran dinamometer pada proses penggurdian selalu berubah-ubah tergantung variabel proses yang digunakan. ANAVA digunakan untuk mengetahui secara statistik bagian dari variabel proses yang mempunyai pengaruh paling signifikan terhadap torsi (M_z). Hasil dari ANAVA untuk torsi (M_z) ditampilkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5. ANAVA variabel proses terhadap torsi

Source	DF	SS	MS	F	<i>P-value</i>
Jenis pahat	1	0.25943	0.25943	16.65	0.015
PA	1	0.51533	0.51533	33.08	0.006
<i>Feeding</i>	1	1.2507	1.2507	80.36	0.001
<i>Error</i>	4	0.06232	0.01558		
Total	7	2.08916			

Sumber: Hasil Perhitungan

Berdasarkan Tabel 4.5, *P-value* menunjukkan bagian dari variabel proses yang mempunyai pengaruh paling signifikan terhadap torsi (M_z). *P-value* yang lebih kecil dari *level of significant* (α) mengindikasikan bahwa variabel proses tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon. Pada penelitian ini nilai α adalah 5%. Selanjutnya dilakukan penarikan kesimpulan menggunakan *P-value* hasil ANAVA sebagai berikut:

1. Untuk variabel proses jenis pahat.
 $P\text{-value} = 0.015 < \alpha = 0.05$, maka secara statistik ada pengaruh variabel proses jenis pahat terhadap torsi (M_z).
2. Untuk variabel proses PA
 $P\text{-value} = 0.005 < \alpha = 0.05$, maka secara statistik ada pengaruh variabel proses PA terhadap torsi (M_z).
3. Untuk variabel proses *feeding*
 $P\text{-value} = 0.001 < \alpha = 0.05$, maka secara statistik ada pengaruh variabel proses *feeding* terhadap torsi (M_z).

Berdasarkan ANAVA diperoleh *P-value* untuk variabel proses jenis pahat, PA, dan *feeding* yang lebih kecil dari *level of significant* (α). Oleh karena itu, ketiga variabel proses tersebut

mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap torsi (M_z). Kesimpulan pengaruh untuk masing-masing variabel proses terhadap torsi (M_z) ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6. Kesimpulan pengaruh variabel proses terhadap torsi (M_z).

Sumber Variasi	Kesimpulan
Jenis pahat	Berpengaruh
PA	Berpengaruh
<i>Feeding</i>	Berpengaruh

4.4. Pemodelan Matematis untuk Variabel Proses

4.4.1. Pemodelan Matematis untuk Gaya Tekan

Hasil regresi untuk gaya tekan dengan menggunakan Minitab 17 disajikan pada Tabel 4.7 dan 4.8. Hasil selengkapnya ada pada Lampiran 7.

Tabel 4.7. Hasil ANAVA untuk gaya tekan

<i>Source</i>	DF	SS	MS	F	<i>P-value</i>
<i>Regression</i>	3	0.17409	0.058029	29.19	0.000
Jenis pahat	1	0.020212	0.020212	10.12	0.005
PA	1	0.03190	0.031897	16.05	0.001
<i>Feeding</i>	1	0.12207	0.122069	61.41	0.000
<i>Error</i>	20	0.03976	0.001988		
Total	23	0.21384			

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4.8. Koefisien regresi untuk model gaya tekan

<i>Predictor</i>	<i>Coef</i>	<i>SE Coef</i>	<i>T-value</i>	<i>P-value</i>
<i>Constant</i>	4.313	0.128	33.81	0.000
Jenis pahat	-0.1924	0.0605	-3.18	0.005
PA	0.2422	0.0724	3.34	0003
<i>Feeding</i>	0.921	0.118	7.84	0.000
S = 0.0445844 R-sq = 81.41% R-sq(adj) = 78.62% R-sq (pred) = 73.23%				

Sumber: Hasil Perhitungan

A. Uji Regresi

1. Uji Koefisien Regresi secara Serempak

Hipotesis untuk uji koefisien regresi secara serempak dari gaya tekan adalah sebagai berikut:

H_0 : Semua β_1 tidak mempunyai pengaruh terhadap gaya tekan.

H_1 : Paling tidak ada satu dari β_1 mempunyai pengaruh terhadap gaya tekan.

Dari Tabel 4.12 di atas terlihat bahwa pada level pengujian dengan $\alpha = 0.05$, *P-value* dari regresi adalah nol atau dapat dikatakan lebih kecil dari pada 0.05, sehingga H_0 ditolak. Hal ini menunjukkan bahwa model dapat diterima secara statistik dan telah mewakili data.

2. Uji Koefisien Regresi secara Individu

Hipotesis yang digunakan untuk uji koefisien secara individu dari gaya tekan adalah sebagai berikut:

H_0 : $\beta_1 = 0$ untuk setiap i

H_1 : $\beta_1 \neq 0$ untuk setiap i

Dari Tabel 4.8 terlihat bahwa pada level pengujian dengan $\alpha = 0.05$, P -value dari jenis pahat, PA, dan *feeding* lebih kecil dari pada 0.05, sehingga H_0 ditolak. Hal ini menunjukkan bahwa jenis pahat, PA, dan *feeding* mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap gaya tekan.

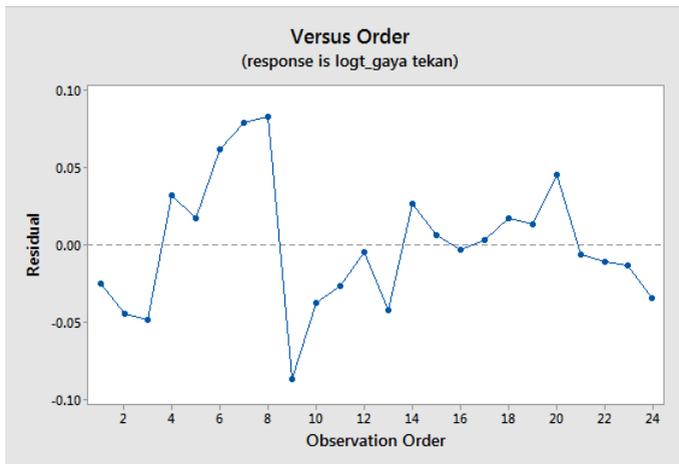
3. Uji Koefisien Determinasi (R^2)

Tabel 4.8 menunjukkan bahwa R^2 untuk persamaan regresi gaya tekan adalah 81.41%. Hal ini menunjukkan bahwa 81.41% variasi dalam Y diterangkan oleh model regresi linier yang digunakan.

B. Uji Asumsi Residual

1. Uji Identik

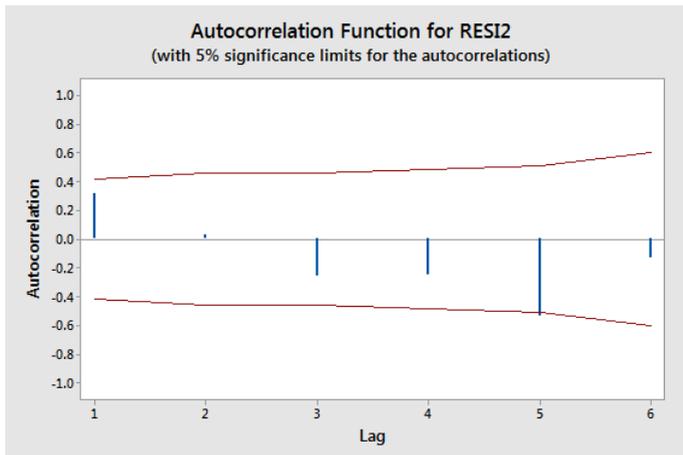
Gambar 4.3 menunjukkan bahwa residual tersebar secara acak di sekitar harga nol dan tidak membentuk pola tertentu. Dengan demikian asumsi residual identik terpenuhi.



Gambar 4.3. Plot residual gaya tekan *versus order*

2. Uji Independen

Pengujian pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *auto correlation function* (ACF). Berdasarkan plot ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.4, tidak ada nilai ACF pada tiap *lag* yang keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antar residual, yang artinya residual bersifat independen.



Gambar 4.4. Plot ACF pada respon gaya tekan

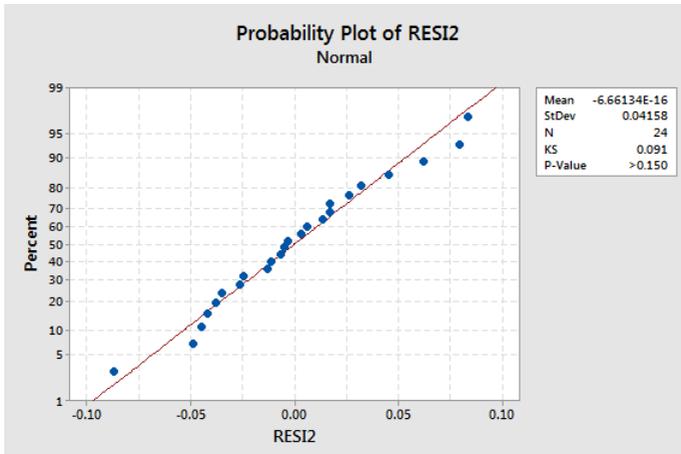
3. Uji Kenormalan

Hipotesis untuk uji kenormalan dari gaya tekan adalah sebagai berikut:

H_0 : Residual berdistribusi normal.

H_1 : Residual tidak berdistribusi normal.

Gambar 4.5 menunjukkan hasil uji kenormalan dari residual dengan menggunakan Kolmogorov-Smirnov *normality test* dapat dilihat bahwa $P\text{-value} > 0.150$ sehingga H_0 diterima. Dengan demikian residual mempunyai distribusi normal dan asumsi normalitas terpenuhi.



Gambar 4.5. Plot uji distribusi normal pada respon gaya tekan

Koefisien regresi hasil perhitungan dapat digunakan untuk membuat model regresi. Oleh karena itu persamaan regresi yang didapatkan untuk gaya tekan adalah:

$$\text{Log } F_z = 4.313 - 0.1924 \log \text{JP} + 0.2422 \log \text{PA} + 0.921 \log f$$

atau

$$F_z = 20558.90596 \text{JP}^{-0.1924} \text{PA}^{0.2422} f^{0.921}$$

Dari persamaan di atas terlihat bahwa *feeding* mempunyai pengaruh paling besar terhadap respon gaya tekan.

4.4.2. Pemodelan Matematis untuk Torsi

Hasil regresi untuk torsi dengan menggunakan Minitab 17 disajikan pada Tabel 4.9 dan 4.10. Hasil selengkapnya ada pada Lampiran 7.

Tabel 4.9. Hasil ANAVA untuk torsi

<i>Source</i>	DF	SS	MS	F	<i>P-value</i>
<i>Regression</i>	3	0.102509	0.034170	2.48	0.091
Jenis pahat	1	0.018174	0.018174	1.32	0.264
<i>PA</i>	1	0.012601	0.012601	0.91	0.0351
<i>Feeding</i>	1	0.71733	0.071733	5.20	0.034
<i>Error</i>	20	0.275778	0.013789		
Total	23	0.378287			

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4.10. Koefisien regresi untuk torsi

<i>Predictor</i>	<i>Coef</i>	<i>SE Coef</i>	<i>T-value</i>	<i>P-value</i>
<i>Constant</i>	1.372	0.336	4.08	0.001
Jenis pahat	-0.183	0.159	-1.15	0.264
<i>PA</i>	-0.152	0.159	-0.96	0.351
<i>Feeding</i>	0.706	0.309	2.28	0.034
S = 0.0117426 R-sq = 27.10% R-sq(adj) = 16.16% R-sq (pred) = 0.00%				

Sumber: Hasil Perhitungan

A. Uji Regresi

1. Uji Koefisien Regresi secara Serempak

Hipotesis untuk uji koefisien regresi secara serempak dari torsi adalah sebagai berikut:

H_0 : Semua β_1 tidak mempunyai pengaruh terhadap torsi

H_1 : Paling tidak ada satu dari β_1 mempunyai pengaruh terhadap torsi.

Dari Tabel 4.9 terlihat bahwa pada level pengujian dengan $\alpha = 0.05$, *P-value* dari regresi adalah 0.091 atau dapat dikatakan lebih besar dari pada 0.05, sehingga H_0 gagal ditolak. Hal ini menunjukkan bahwa model tidak dapat diterima secara statistik.

2. Uji Koefisien Regresi secara Individu

Hipotesis yang digunakan untuk uji koefisien secara individu dari torsi adalah sebagai berikut:

$$H_0 : \beta_1 = 0 \text{ untuk setiap } i$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0 \text{ untuk setiap } i$$

Dari Tabel 4.10 terlihat bahwa pada level pengujian dengan $\alpha = 0.05$, P -value dari *feeding* lebih kecil dari pada 0.05, sehingga H_0 ditolak. Hal ini menunjukkan bahwa *feeding* mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap torsi.

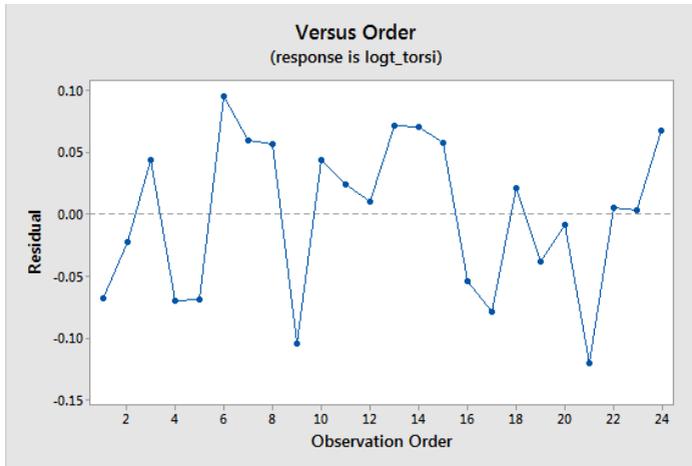
3. Uji Koefisien Determinasi (R^2)

Dari Tabel 4.10 menunjukkan bahwa R^2 untuk persamaan regresi torsi adalah 27.10%. Hal ini menunjukkan bahwa 27.10% variasi dalam Y diterangkan oleh model regresi linier yang digunakan.

B. Uji Asumsi Residual

1. Uji Identik

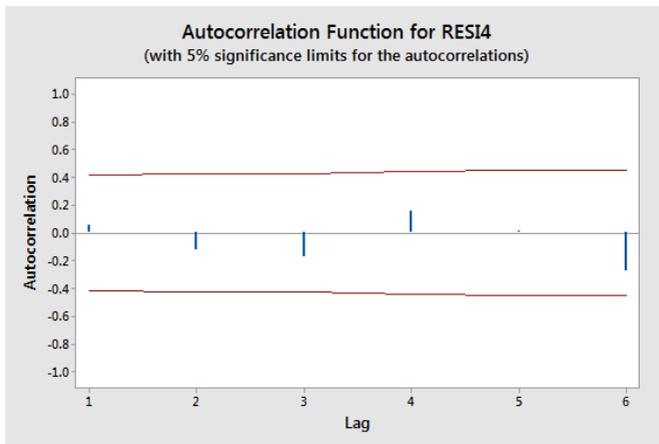
Gambar 4.6 menunjukkan bahwa residual tersebar secara acak di sekitar harga nol dan tidak membentuk pola tertentu. Dengan demikian asumsi residual identik terpenuhi.



Gambar 4.5. Plot residual torsi *versus order*

2. Uji Independen

Pengujian pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *auto correlation function* (ACF). Berdasarkan plot ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.6, tidak ada nilai ACF pada tiap *lag* yang keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antar residual, yang artinya residual bersifat independen.



Gambar 4.6. Plot ACF pada respon torsi

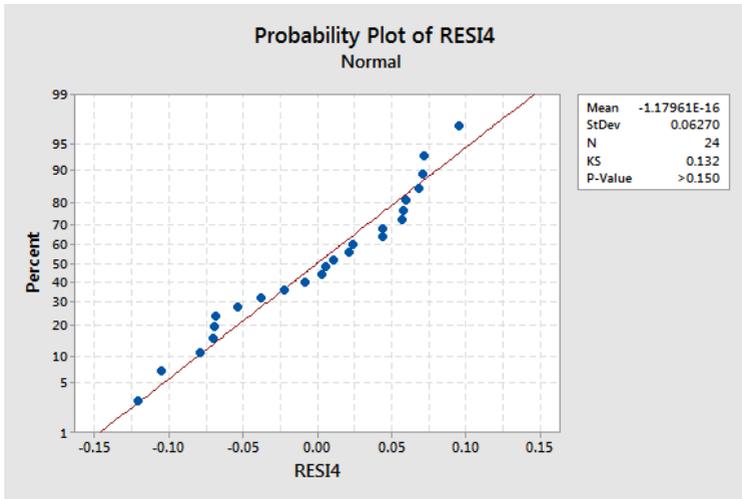
3. Uji Kenormalan

Hipotesis untuk uji kenormalan dari torsi adalah sebagai berikut:

H_0 : Residual berdistribusi normal.

H_1 : Residual tidak berdistribusi normal.

Gambar 4.7 menunjukkan hasil uji kenormalan dari residual dengan menggunakan Kolmogorov-Smirnov *normality test* dapat dilihat bahwa $P\text{-value} > 0.150$ sehingga H_0 diterima. Dengan demikian residual mempunyai distribusi normal dan asumsi normalitas terpenuhi.



Gambar 4.7. Plot uji distribusi normal pada respon torsi

Koefisien regresi hasil perhitungan dapat digunakan untuk membuat model regresi. Oleh karena itu persamaan regresi yang didapatkan untuk torsi adalah:

$$\text{Log } M_z = 1.372 - 0.183 \log \text{JP} - 0.152 \log \text{PA} + 0.706 \log f$$

atau

$$M_z = 23.55 \text{JP}^{0.183} \text{PA}^{-0.152} f^{0.706}$$

Dari persamaan di atas terlihat bahwa *feeding* mempunyai pengaruh paling besar terhadap respon torsi.

Untuk membuktikan ada atau tidak adanya kesamaan antara data gaya tekan dan torsi hasil eksperimen dengan data gaya tekan dan torsi hasil simulasi, maka perlu dilakukan validasi secara statistik dengan menggunakan pengujian *one sample-t*. Adapun hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$H_0 : \mu = \mu_0$$

$$H_1 : \mu \neq \mu_0$$

H_0 ditolak jika *P-Value* lebih kecil dari pada $\alpha = 0.05$.

Hasil uji kesamaan antara data gaya tekan hasil eksperimen dan simulasi ditunjukkan pada Tabel 4.11. Hasil selengkapnya ada pada Lampiran 3.

Tabel 4.11. Hasil uji kesamaan antara data gaya tekan hasil eksperimen dan simulasi

Kombinasi	<i>P-value</i>	Keterangan	Kesimpulan
1. (HSS M2, PA = 118, f = 0.07)	0.737	H_0 gagal ditolak	$\mu_{eks} = \mu_{sim}$
2. (HSS M2, PA = 118, f = 0.1)	0.945	H_0 gagal ditolak	$\mu_{eks} = \mu_{sim}$
3. (HSS M2, PA = 134, f = 0.07)	0.777	H_0 gagal ditolak	$\mu_{eks} = \mu_{sim}$
4. (HSS M35, PA = 134, f = 0.1)	0.189	H_0 gagal ditolak	$\mu_{eks} = \mu_{sim}$
5. (HSS M35, PA = 118, f = 0.07)	0.340	H_0 gagal ditolak	$\mu_{eks} = \mu_{sim}$
6. (HSS M35, PA = 118, f = 0.1)	0.189	H_0 gagal ditolak	$\mu_{eks} = \mu_{sim}$
7. (HSS M35, PA = 134, f = 0.07)	0.287	H_0 gagal ditolak	$\mu_{eks} = \mu_{sim}$
8. (HSS M35, PA = 134, f = 0.1)	0.131	H_0 gagal ditolak	$\mu_{eks} = \mu_{sim}$

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.11 menunjukkan bahwa nilai *P-value* untuk uji kesamaan antara data gaya tekan hasil eksperimen dan simulasi pada kombinasi 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, dan 8 adalah lebih besar dari pada $\alpha = 0.05$. Oleh karena itu dapat dinyatakan bahwa data gaya tekan hasil eksperimen dan simulasi pada kombinasi 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, dan 8 adalah sama.

Hasil uji kesamaan antara data torsi hasil eksperimen dan simulasi ditunjukkan pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12. Hasil uji kesamaan antara data torsi hasil eksperimen dan simulasi

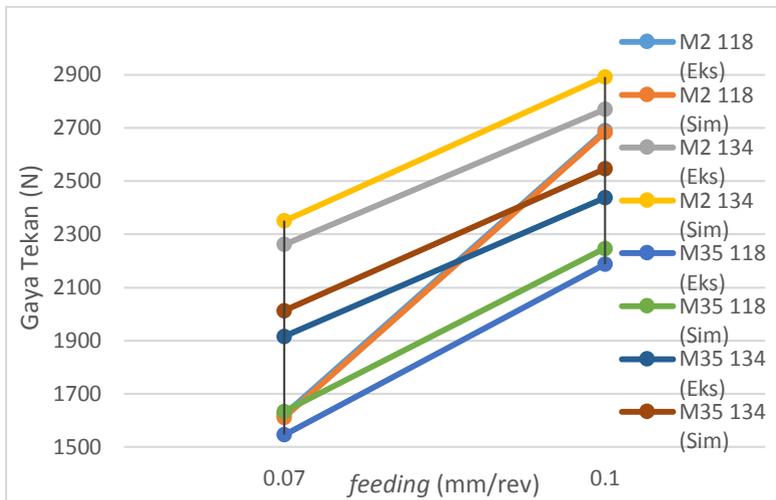
Kombinasi	<i>P-value</i>	Keterangan	Kesimpulan
1. (HSS M2, PA = 118, f = 0.07)	0.134	H ₀ gagal ditolak	$\mu_{eks} = \mu_{sim}$
2. (HSS M2, PA = 118, f = 0.1)	0.357	H ₀ gagal ditolak	$\mu_{eks} = \mu_{sim}$
3. (HSS M2, PA = 134, f = 0.07)	0.283	H ₀ gagal ditolak	$\mu_{eks} = \mu_{sim}$
4. (HSS M35, PA = 134, f = 0.1)	0.529	H ₀ gagal ditolak	$\mu_{eks} = \mu_{sim}$
5. (HSS M35, PA = 118, f = 0.07)	0.712	H ₀ gagal ditolak	$\mu_{eks} = \mu_{sim}$
6. (HSS M35, PA = 118, f = 0.1)	0.194	H ₀ gagal ditolak	$\mu_{eks} = \mu_{sim}$
7. (HSS M35, PA = 134, f = 0.07)	0.659	H ₀ gagal ditolak	$\mu_{eks} = \mu_{sim}$
8. (HSS M35, PA = 134, f = 0.1)	0.291	H ₀ gagal ditolak	$\mu_{eks} = \mu_{sim}$

Tabel 4.12 menunjukkan bahwa nilai *P-value* untuk uji kesamaan antara data torsi hasil eksperimen dan simulasi pada kombinasi 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, dan 8 adalah lebih besar dari pada $\alpha = 0.05$. Oleh karena itu dapat dinyatakan bahwa data torsi hasil eksperimen dan simulasi pada kombinasi 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, dan 8 adalah sama. Dari uji *one sample-t* yang telah dilakukan menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan gaya tekan dan torsi antara hasil eksperimen dengan simulasi.

4.5. Pembahasan

4.5.1. Perbandingan Gaya Tekan dari Simulasi dan Eksperimen

Simulasi dan eksperimen pada proses penggurdian baja EMS 45 dengan menggunakan pahat HSS M2 dan HSS M35 menghasilkan data gaya tekan seperti ditampilkan pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9.



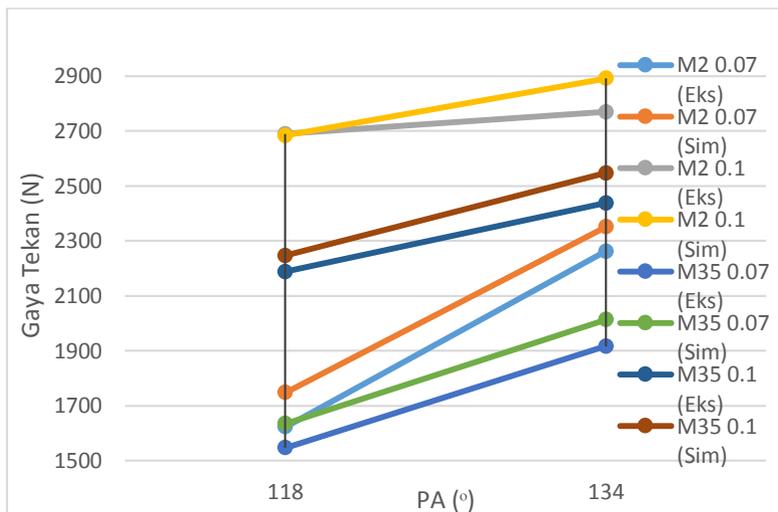
Gambar 4.8. Grafik perbandingan gaya tekan eksperimen dan simulasi variasi *feeding*

Dari gambar 4.8 terlihat bahwa gaya tekan hasil eksperimen dan simulasi mempunyai kemiripan. Tren grafik menunjukkan kesamaan baik pada pahat gurdi HSS M2 maupun HSS M35. Gaya tekan terendah pada pengguridian dengan pahat HSS M2 secara eksperimen adalah pada parameter proses $f = 0.07$ mm/rev dan $PA = 118^\circ$, yaitu sebesar 1623 N. Selanjutnya gaya tekan mencapai nilai maksimal pada parameter proses $f = 0.1$ mm/rev dan $PA = 134^\circ$, yaitu sebesar 2769.333 N. Pada simulasi, gaya tekan juga berada pada posisi terendah pada parameter proses $f = 0.07$ mm/rev dan $PA = 118^\circ$, yaitu sebesar 1612.206 N dan terus naik hingga mencapai nilai tertinggi pada parameter proses $f = 0.1$ mm/rev dan $PA = 134^\circ$, yaitu sebesar 2891.2729 N.

Pada eksperimen pengguridian menggunakan pahat HSS M35 gaya tekan terendah dicapai pada parameter proses $f = 0.07$ mm/rev dan $PA = 118^\circ$, yaitu sebesar 1546.33 N, mencapai maksimal pada parameter proses $f = 0.1$ mm/rev dan $PA = 134^\circ$, yaitu sebesar 2437.667 N. Hasil simulasi menunjukkan bahwa

gaya tekan terendah juga dicapai pada parameter proses $f = 0.07$ mm/rev dan $PA = 118^\circ$, yaitu sebesar 1634.76 N dan mencapai nilai maksimal pada parameter proses $f = 0.1$ mm/rev dan $PA = 134^\circ$, yaitu sebesar 2546.3553 N.

Gambar 4.8 menunjukkan bahwa semakin besar *feeding* yang digunakan dalam penggurdian akan membuat gaya tekan semakin besar. Baik eksperimen dan simulasi penggurdian memperlihatkan kenaikan gaya tekan ketika nilai *feeding* diperbesar. Gaya tekan dan torsi berhubungan erat dengan ketebalan geram yang juga dipengaruhi oleh *feeding* (Liao, 2007). Hal ini dikarenakan *feeding* yang tinggi berimplikasi pada meningkatnya ketebalan geram yang terbentuk, sehingga gaya tekan akan tinggi.



Gambar 4.9. Grafik perbandingan gaya tekan eksperimen dan simulasi variasi PA

Berdasarkan Gambar 4.9 terlihat bahwa semakin besar PA, maka akan semakin besar gaya tekan pada proses penggurdian.

Eksperimen dan simulasi penggurdian menunjukkan hal yang sama. PA mempengaruhi penampang geram sebelum terpotong (hb). Semakin kecil PA, tebal geram (h) semakin kecil dan lebar geram (b) semakin lebar, sehingga temperatur pahat akan menurun (Rochim, 1993). Ketebalan geram yang kecil pada penggurdian menggunakan pahat dengan PA kecil mengindikasikan bahwa gaya tekan penggurdian tersebut juga rendah. Oleh karena itu, ada kesamaan antara eksperimen, simulasi, dan dasar teori bahwa semakin kecil PA pahat maka gaya tekannya semakin rendah (semakin besar PA pahat maka gaya tekannya semakin tinggi).

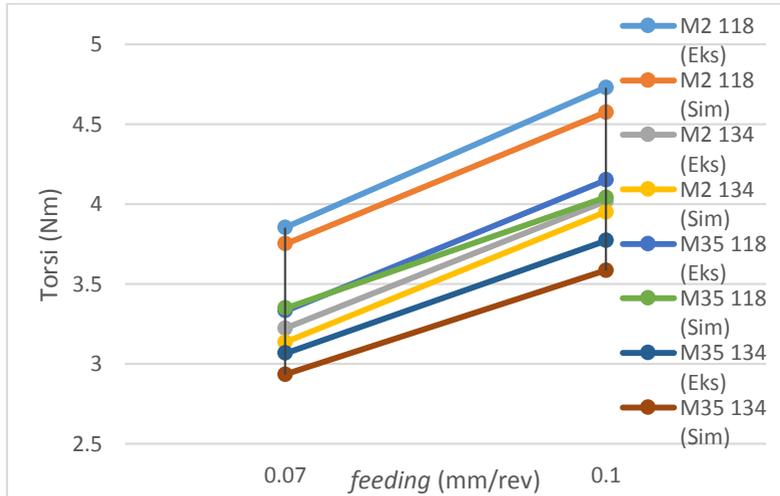
Pemodelan matematis yang telah dilakukan menunjukkan bahwa jenis pahat, *feeding*, dan PA mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap respon (gaya tekan). Persamaan regresi untuk gaya tekan adalah:

$$F_z = 20558.90596 JP^{-0.1924} PA^{0.2422} f^{0.921}$$

Dari persamaan regresi di atas terlihat bahwa *feeding* dan PA mempunyai koefisien yang paling besar, yaitu 0.921 dan 0.2422. Hal ini menunjukkan bahwa *feeding* mempunyai pengaruh paling besar terhadap gaya tekan. Persamaan 2.17, 2.22, dan 2.24 menyatakan bahwa *feeding* mempunyai peranan yang besar terhadap gaya tekan. Koefisien PA bernilai positif sebesar 0.2422 juga menunjukkan bahwa PA berpengaruh terhadap gaya tekan proses penggurdian. Dari persamaan 2.24 menyatakan bahwa semakin besar PA akan memperbesar gaya tekan. Oleh karena itu dari persamaan regresi dan dasar teori dapat dikatakan bahwa semakin besar *feeding* dan PA pada pahat gurdi maka akan memperbesar gaya tekan.

4.5.2. Perbandingan Torsi dari Simulasi dan Eksperimen

Data torsi hasil simulasi dan eksperimen dapat dilihat perbandingannya pada Gambar 4.10 dan 4.11 untuk proses pengguridian menggunakan pahat HSS M2 dan HSS M35.



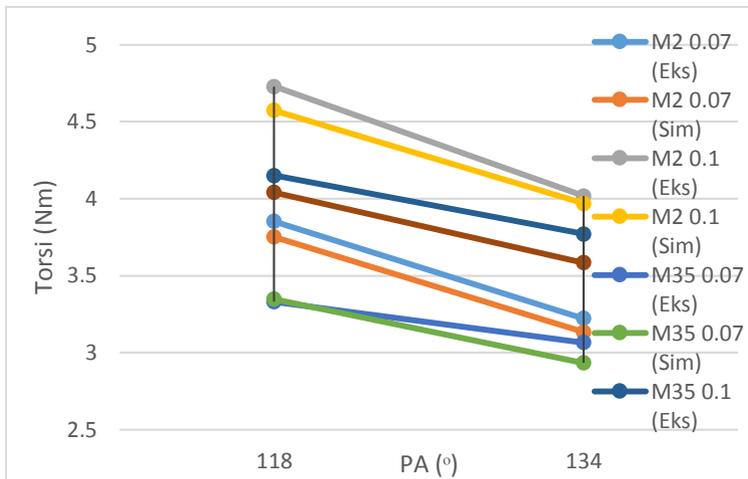
Gambar 4.10. Grafik perbandingan torsi eksperimen dan simulasi variasi *feeding*

Berdasarkan Gambar 4.10 terlihat bahwa torsi hasil eksperimen dan simulasi mempunyai kemiripan. Tren grafik menunjukkan kesamaan baik pada pahat gurdi HSS M2 maupun HSS M35. Pada eksperimen pengguridian menggunakan pahat HSS M2 torsi terendah dicapai pada parameter $f = 0.07$ mm/rev dan $PA = 134^\circ$, yaitu sebesar 3.22156 Nm, mencapai maksimal pada parameter proses $f = 0.1$ mm/rev dan $PA = 118^\circ$, yaitu sebesar 4.2786 Nm. Hasil simulasi menunjukkan bahwa torsi terendah juga dicapai pada parameter proses $f = 0.07$ mm/rev dan $PA = 134^\circ$, yaitu sebesar 3.135 Nm dan mencapai nilai maksimal pada

parameter proses $f = 0.1$ mm/rev dan $PA = 118^\circ$, yaitu sebesar 4.574124 Nm.

Torsi pada penggurdian dengan pahat HSS M35 secara eksperimen mencapai nilai terendah pada parameter proses $f = 0.07$ mm/rev dan $PA = 134^\circ$, yaitu sebesar 3.066 Nm. Selanjutnya torsi mencapai nilai maksimal pada parameter proses $f = 0.1$ mm/rev dan $PA = 118^\circ$, yaitu sebesar 4.15067. Pada simulasi, torsi juga berada pada posisi terendah pada parameter proses $f = 0.07$ mm/rev dan $PA = 134^\circ$, yaitu sebesar 2.933297 Nm dan mencapai nilai tertinggi pada parameter proses $f = 0.1$ mm/rev dan $PA = 118^\circ$, yaitu sebesar 4.040364 Nm.

Gambar 4.10 memperlihatkan bahwa kenaikan *feeding* juga akan memperbesar torsi. Hasil eksperimen dan simulasi penggurdian memperlihatkan kenaikan torsi ketika nilai *feeding* dinaikkan. Gaya tekan dan torsi berhubungan erat dengan ketebalan geram yang juga dipengaruhi oleh *feeding* (Liao, 2007). Hal ini dikarenakan *feeding* yang tinggi berimplikasi pada besarnya ketebalan geram yang terbentuk, sehingga torsi akan naik.



Gambar 4.11. Grafik perbandingan torsi eksperimen dan simulasi variasi PA

Gambar 4.11 menunjukkan bahwa semakin besar PA, maka torsi pada proses penggurdian akan menurun. Eksperimen dan simulasi penggurdian menunjukkan hal yang sama. Dari persamaan 2.20 mengindikasikan bahwa kenaikan PA akan menurunkan torsi pada penggurdian. Oleh karena itu, ada kesesuaian antara eksperimen, simulasi, dan dasar teori bahwa semakin kecil PA pahat maka torsinya semakin besar (semakin besar PA pahat maka torsinya semakin kecil).

Pemodelan matematis yang telah dilakukan menunjukkan bahwa jenis pahat dan *feeding* mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap respon (torsi). Persamaan regresi untuk gaya torsi adalah:

$$M_z = 23.55 JP^{0.183} PA^{-0.152} f^{0.706}$$

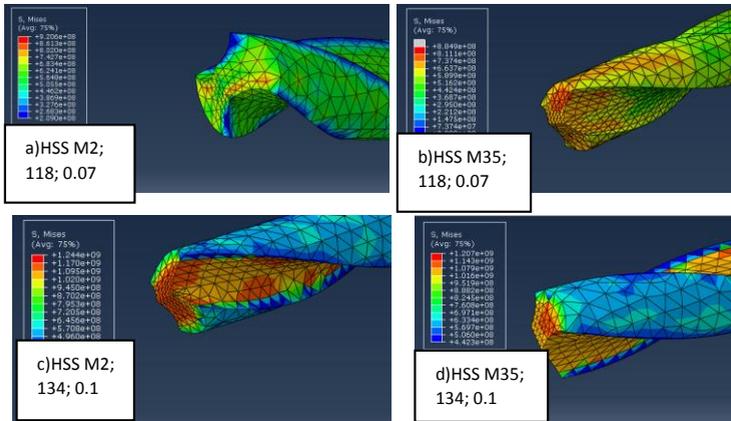
Dari persamaan regresi di atas terlihat bahwa *feeding* (f) mempunyai koefisien yang paling besar, yaitu 0.706. Hal ini menunjukkan bahwa *feeding* mempunyai pengaruh paling besar

terhadap torsi. Persamaan 2.20 dan 2.21 menyatakan bahwa *feeding* mempunyai peranan yang besar terhadap torsi. Dari persamaan regresi dan dasar teori dapat dikatakan bahwa kenaikan *feeding* pada pahat gurdi akan memperbesar torsi.

4.5.3. Tegangan Maksimum pada Pahat Gurdi Hasil Simulasi

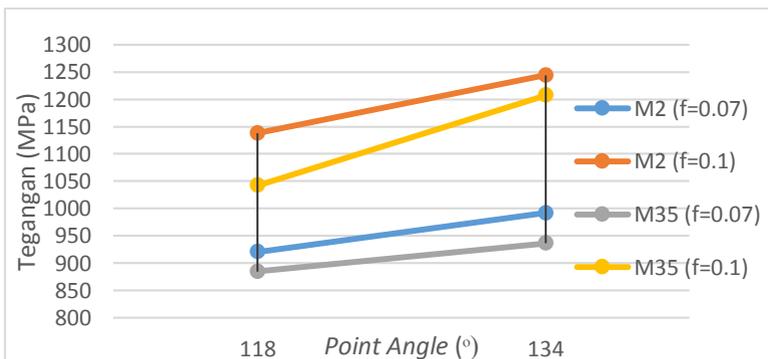
Setelah dilakukan simulasi proses penggurdian baja EMS 45 menggunakan pahat HSS M2 dan M35 dengan variasi *feeding* sebesar 0.07 dan 0.1 mm/rev dan PA sebesar 118° dan 134°, selanjutnya dilakukan analisis tegangan maksimum yang terjadi pada pahat. Pada penelitian tugas akhir ini data yang diperoleh dari simulasi proses penggurdian hanya digunakan untuk memprediksi besarnya tegangan yang timbul pada pahat gurdi.

Tegangan maksimum hasil simulasi pada pahat gurdi HSS M2 dan M35 ditampilkan seperti Gambar 4.12. Hasil selengkapnya ada pada Lampiran 4.



Gambar 4.12. Tegangan maksimum pada pahat gurdi a) HSS M2; PA = 118°; $f = 0.07$ mm/rev. b) HSS M35°; PA = 118°; $f = 0.07$ mm/rev. c) HSS M2; PA = 134°; $f = 0.1$ mm/rev. d) HSS M35; PA = 134°; $f = 0.1$ mm/rev.

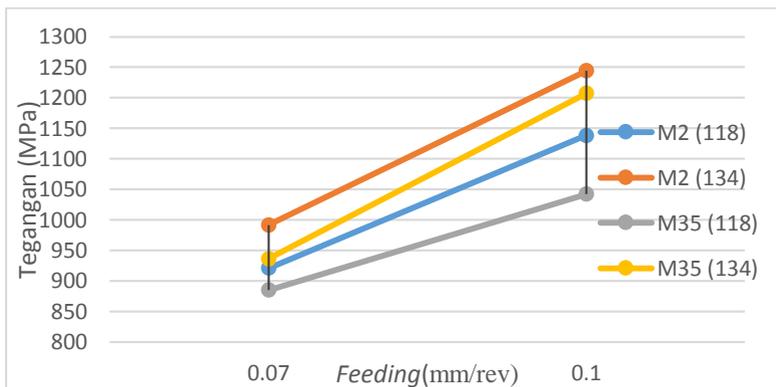
Data tegangan maksimum yang diperoleh dari simulasi selanjutnya disajikan dalam grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13. Grafik tegangan maksimum pahat gurdi hasil simulasi variasi PA

Berdasarkan Gambar 4.13 terlihat bahwa tren grafik menunjukkan kesamaan baik pada pahat gurdi HSS M2 maupun HSS M35. Tegangan maksimum terendah pada pahat HSS M2 terjadi pada parameter proses $PA = 118^\circ$; $f = 0.07$ mm/rev, yaitu sebesar 920.6 MPa. Selanjutnya tegangan maksimum pada pahat gurdi HSS M2 mencapai nilai tertinggi pada parameter proses $PA = 134^\circ$; $f = 0.1$ mm/rev, yaitu sebesar 1244 MPa. Pada pahat gurdi HSS M35, tegangan maksimum pahat gurdi juga berada di posisi terendah pada parameter proses $PA = 118^\circ$; $f = 0.07$ mm/rev, yaitu sebesar 884.9 MPa dan mencapai nilai tertinggi pada parameter proses $PA = 134^\circ$; $f = 0.1$ mm/rev, yaitu sebesar 1207 MPa.

Semakin besar PA, akan memperbesar gaya tekan (F_z) pada gurdi (Rochim, 1993). Tegangan pada pahat erat kaitannya dengan gaya tekan, karena tegangan adalah gaya per satuan luas area kontak. Semakin besar PA suatu pahat gurdi, maka semakin besar pula tegangan yang timbul saat proses penggurdian. Dari Gambar 4.13 terlihat bahwa tegangan maksimum pahat gurdi dengan PA sebesar 134° lebih besar dari pada pahat gurdi dengan PA sebesar 118° dengan *feeding* yang sama.

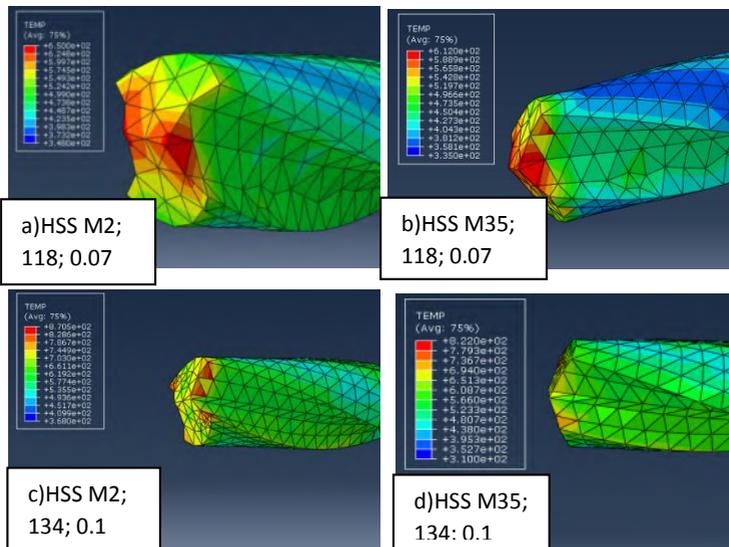


Gambar 4.14. Grafik tegangan maksimum pahat gurdi hasil simulasi variasi *feeding*

Dari simulasi penggurdian menggunakan besaran *feeding* yang bervariasi, ditunjukkan bahwa tegangan maksimum pada pahat terjadi di daerah sekitar *chisel edge* dan *cutting edge* dengan *feeding* yang paling tinggi. Ketebalan geram sebelum terpotong pada penggurdian akan meningkat seiring dengan kenaikan *feeding*. Hal ini menyebabkan *cutting edge* menerima beban yang besar akibat harus memotong benda kerja dengan ketebalan geram yang besar (Ucun, 2016). *Cutting edge* sendiri merupakan bagian pahat yang kritis karena ketebalannya lebih kecil daripada bagian pahat lainnya. Akibatnya, tegangan terbesar pada pahat terkonsentrasi pada bagian *cutting edge*. Dari Gambar 4.14 terlihat bahwa tegangan maksimum pahat gurdi dengan *feeding* 0.1 mm/rev lebih besar dari pada pahat gurdi dengan *feeding* 0.07 mm/rev pada PA yang sama. Hal ini sesuai dengan teori bahwa semakin besar *feeding* pada proses gurdi maka akan memperbesar tegangan pada pahat.

4.5.4. Temperatur Maksimum pada Pahat Gurdi Hasil Simulasi

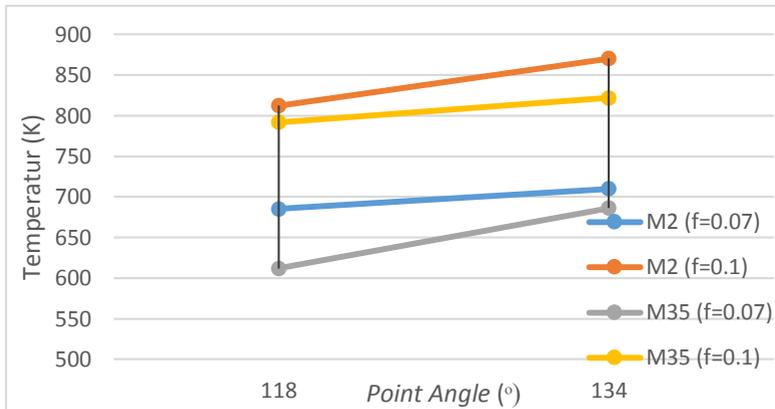
Simulasi pada proses penggurdian baja EMS 45 dengan menggunakan pahat HSS M2 dan HSS M35 menghasilkan distribusi temperatur maksimum pahat gurdi seperti ditampilkan pada Gambar 4.15. Hasil selengkapnya ada pada Lampiran 5.



Gambar 4.15. Temperatur maksimum pada pahat gundi a) HSS M2; PA = 118°; $f = 0.07$ mm/rev. b) HSS M35°; PA = 118°; $f = 0.07$ mm/rev. c) HSS M2; PA = 134°; $f = 0.1$ mm/rev. d) HSS M35; PA = 134°; $f = 0.1$ mm/rev.

Gambar 4.15 memperlihatkan distribusi temperatur pada pahat gundi saat memotong benda kerja. Warna merah menunjukkan bahwa daerah tersebut mengalami panas yang paling tinggi. Temperatur tertinggi di pahat terjadi pada bidang geram yang berada agak jauh dari mata potong (*cutting edge*), yaitu di sekitar lokasi dimana geram yang melengkung mulai berpisah dengan permukaan pahat (Rochim, 1993). Hasil simulasi menunjukkan temperatur maksimum (warna merah) pada pahat terdapat di bagian bidang geram. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa sumber panas pahat pada hasil simulasi ini benar-benar efek dari deformasi plastis pada daerah primer, sekunder, dan tersier dan akibat gesekan antara geram dengan pahat.

Data temperatur maksimum yang diperoleh dari simulasi selanjutnya disajikan dalam grafik seperti ditunjukkan pada Gambar 4.16 dan 4.17.

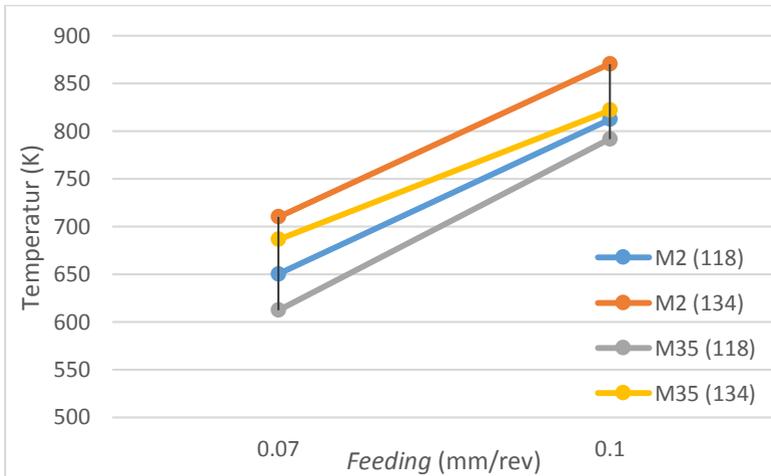


Gambar 4.16. Temperatur maksimum pahat gurdi hasil simulasi variasi PA

Dari Gambar 4.16 yang telah disajikan terlihat bahwa tren grafik menunjukkan kesamaan baik pada pahat gurdi HSS M2 maupun HSS M35. Temperatur maksimum terendah pada pahat HSS M2 terjadi pada parameter proses PA = 118° dan f = 0.07 mm/rev, yaitu sebesar 650 K. Selanjutnya temperatur maksimum pada pahat gurdi HSS M2 mencapai nilai tertinggi pada parameter proses PA = 134°; f = 0.1mm/rev yaitu sebesar 870.5 K. Pada pahat gurdi HSS M35, temperatur maksimum pahat gurdi juga berada pada posisi terendah pada parameter proses PA = 118° dan f = 0.07 mm/rev, yaitu sebesar 612 K dan mencapai nilai tertinggi pada parameter proses PA = 134°; f = 0.1mm/rev, yaitu sebesar 822 K.

PA mempengaruhi penampang geram sebelum terpotong (hb). Semakin kecil PA, tebal geram (h) semakin kecil dan lebar

geram (b) semakin lebar, sehingga temperatur pahat akan menurun (Rochim, 1993). Dari Gambar 4.16 terlihat bahwa temperatur maksimum pahat gundi dengan PA sebesar 118° lebih kecil dari pada pahat gundi dengan PA sebesar 134° dengan besar *feeding* yang sama.



Gambar 4.17. Temperatur maksimum pahat gundi hasil simulasi variasi *feeding*

Persamaan 2.25 dan 2.26 dan Gambar 4.17 menunjukkan bahwa kenaikan *feeding* akan memperbesar temperatur. Semakin besar *feeding* yang digunakan, maka temperatur maksimum pada pahat gundi akan naik. Ketebalan geram sebelum terpotong pada penggurdian akan meningkat seiring dengan kenaikan *feeding*. Oleh karena itu, temperatur pahat akan naik. Daerah yang mempunyai temperatur paling besar selama proses penggurdian adalah bidang geram (*rake face*). Hasil simulasi memperlihatkan bahwa temperatur maksimum pahat saat proses penggurdian terletak pada bidang geram (*rake face*), sehingga dapat dikatakan bahwa hasil simulasi sesuai dengan teori. Bidang geram pada pahat adalah daerah yang mempunyai temperatur paling tinggi,

karena pada daerah ini terjadi gesekan antara geram dan pahat. Sebenarnya, geram yang bergesekan pada pahat temperaturnya sudah tinggi. Akan tetapi, bidang geram pada pahat temperaturnya lebih tinggi. Hal ini dikarenakan panas yang merambat pada pahat terjadi sebagai proses konduksi panas yang dipengaruhi oleh konduktivitas panas material pahat dan penampang pahat yang relatif kecil (Rochim, 1993).

LAMPIRAN 1

Spesifikasi Pahat Gurdi HSS M2 dan HSS M35 (d = 10 mm)

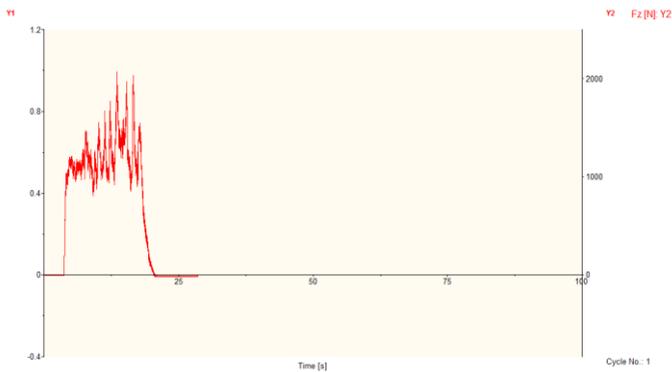
Parameter	Drill Putih		
	Spesifikasi	HSS M2	HSS M35
Web thickness (mm)	1.38 – 1.6	1.77	1.72
Helix angle (°)	29 - 31	28	29
Lip clearance angle (°)	11 - 15	13	10
Chisel edge angle (°)	125 - 135	140	125
Point angle (°)	116 - 120	118	134
Split point	tidak		
Material grade	M2		
Heat treatment	1200 °C/ Tempering 3x		
Hardness VHN 30 kg	792 - 869	845	900
Chemical composition grade HSS M2			
Carbon (%)	0.78 – 0.88	0.86	0.96
Silicon (%)	0.2 – 0.45	0.352	0.35
Manganese (%)	0.15 – 0.45	0.32	0.402
Chromium	3.75 – 4.5	4.490	5.23
Molybdenum (%)	4.5 – 5.5	4.88	4.9
Vanadium (%)	1.75 – 2.2	1.87	1.89
Tungsten (%)	5.5 – 6.75	4.87	4.76
Posphorus (%)	0.03 max	0.034	0.03
Sulfur (%)	0.03 max	0.01	0.005

LAMPIRAN 2

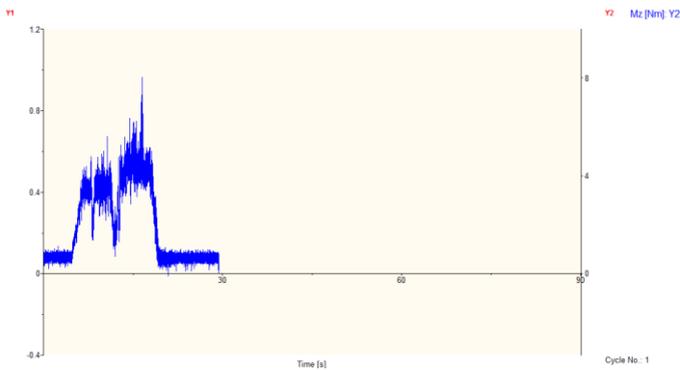
A. GRAFIK GAYA TEKAN DAN TORSI EKSPERIMEN

1. Pahat = HSS M2; PA = 118; $f = 0.07$; RPM = 1600

a. Replikasi 1

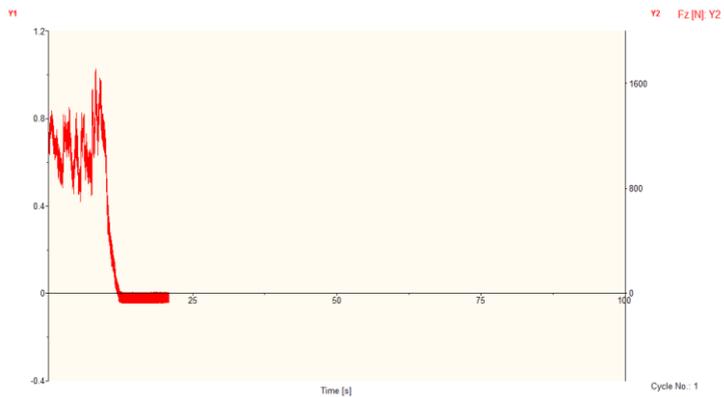
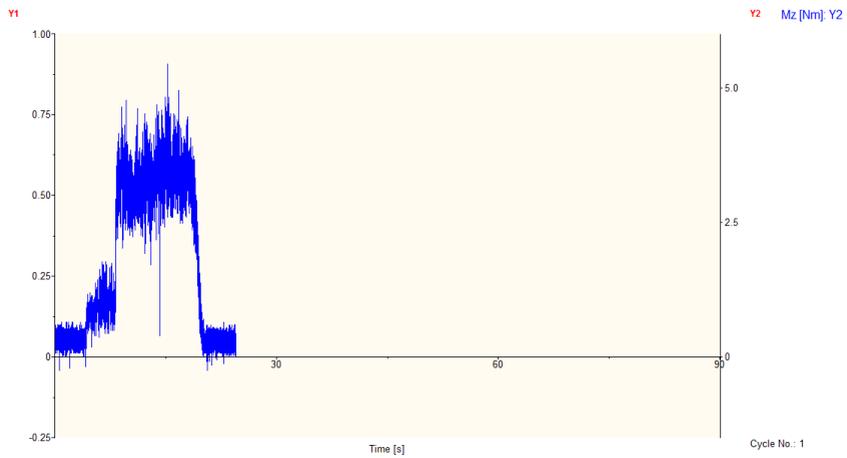


Gaya tekan (F_z)

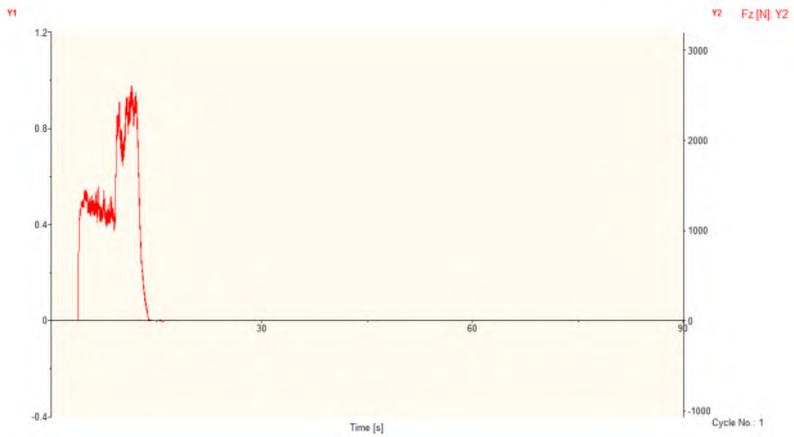
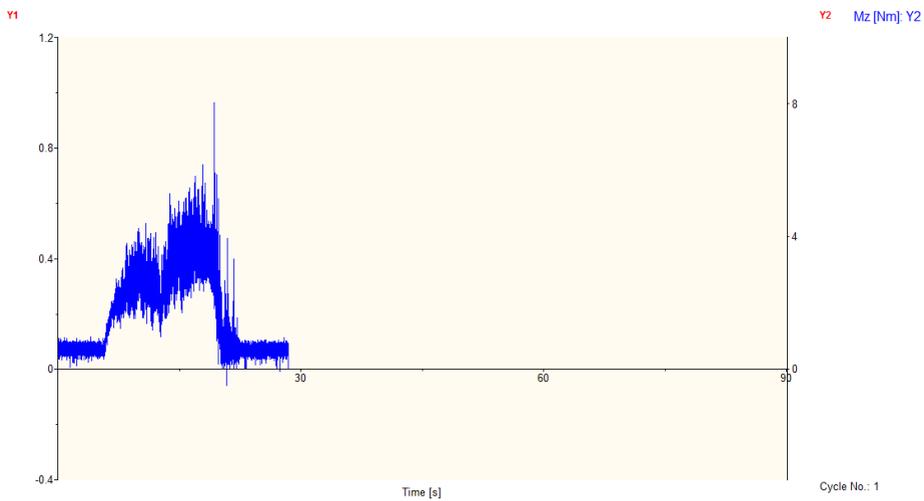


Torsi (M_z)

b. Replikasi 2

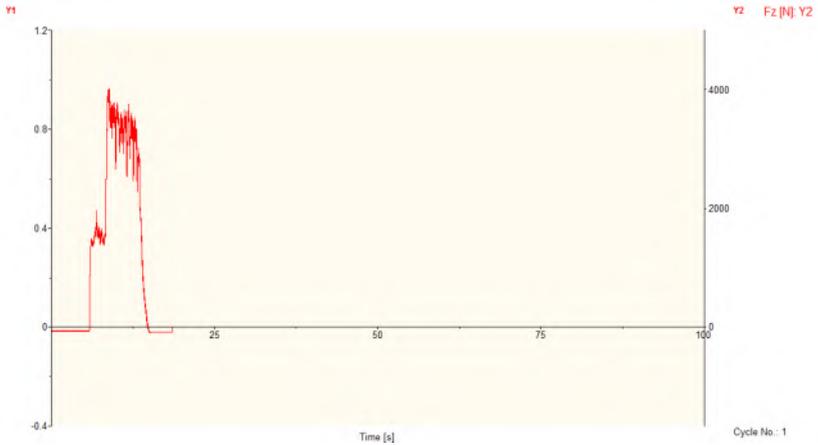
Gaya tekan (F_z)Torsi (M_z)

c. Replikasi 3

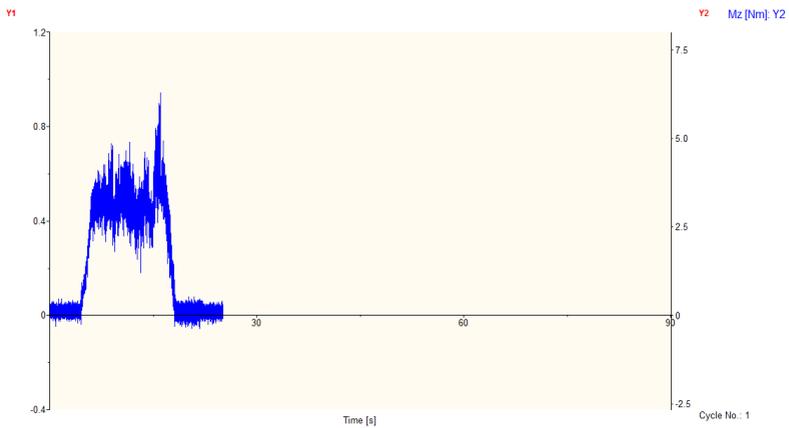
Gaya tekan (F_z)Torsi (M_z)

2. Pahat = HSS M2; PA = 118; $f = 0.1$; RPM = 1600

a. Replikasi 1

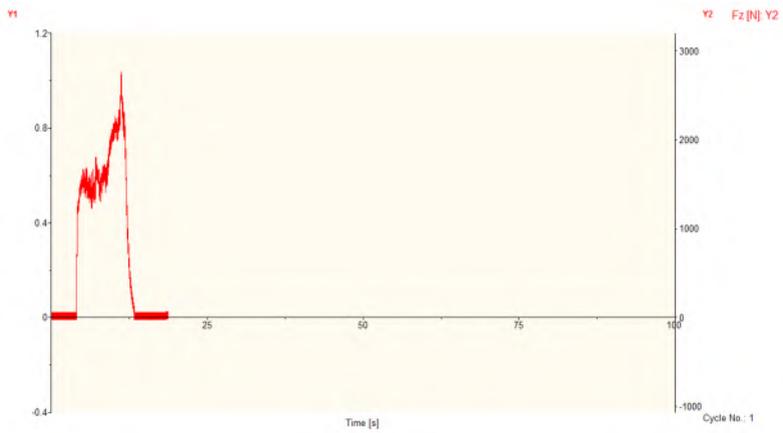
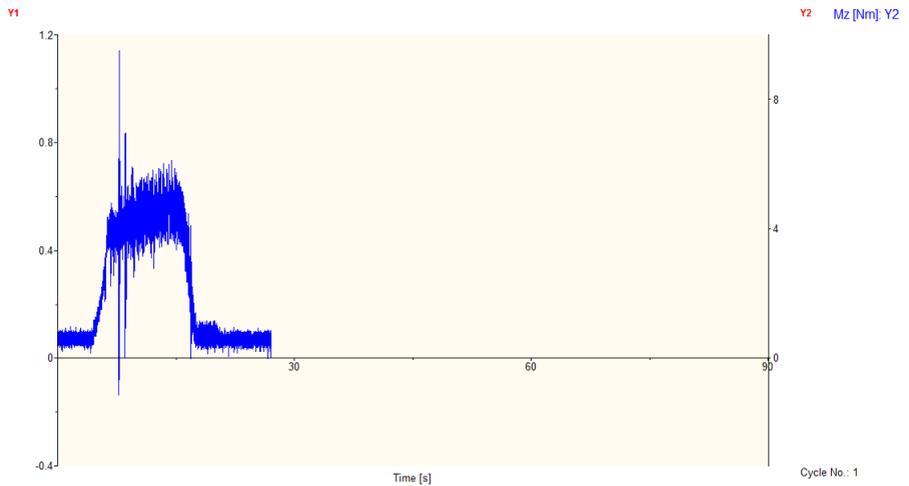


Gaya tekan (F_z)

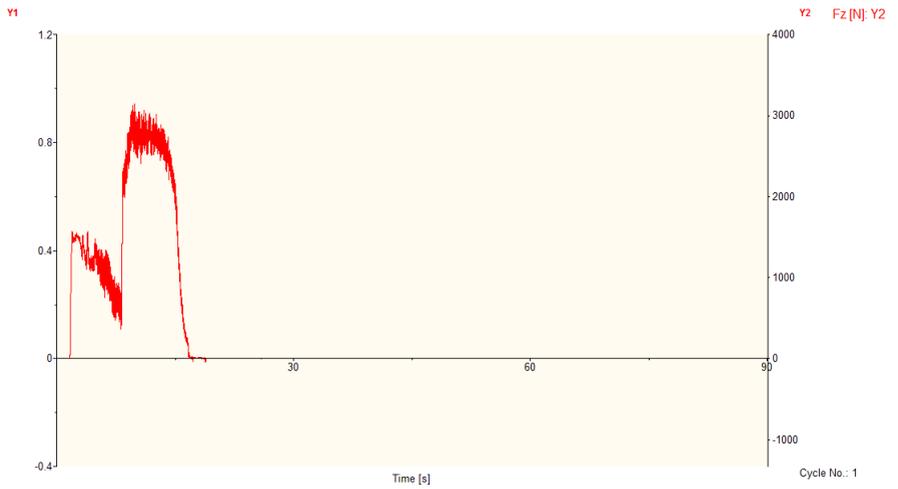
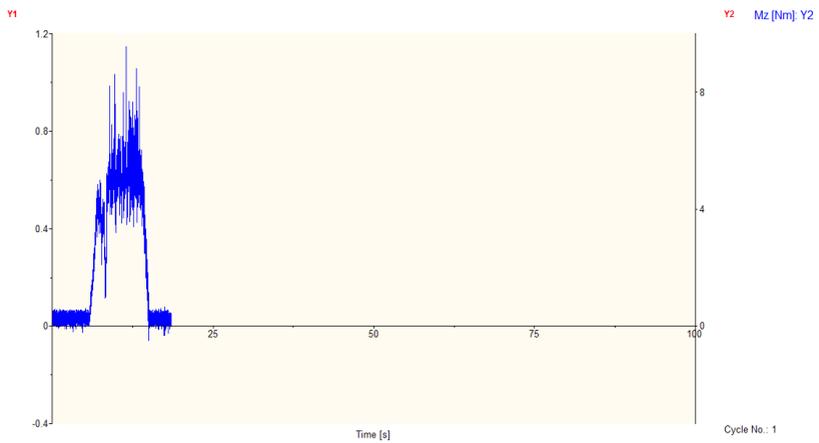


Torsi (M_z)

b. Replikasi 2

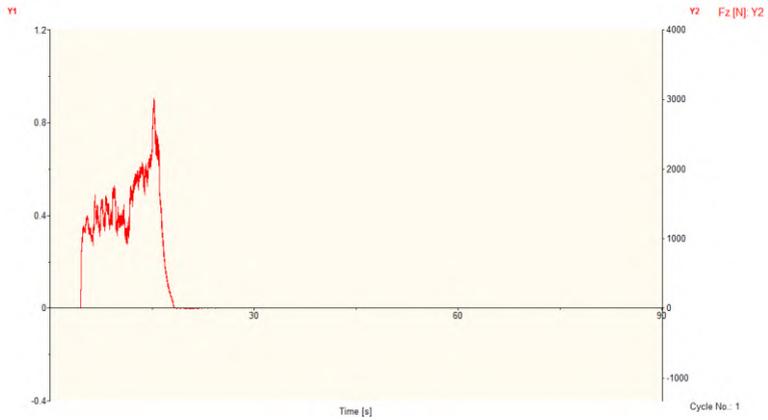
Gaya tekan (F_z)Torsi (M_z)

c. Replikasi 3

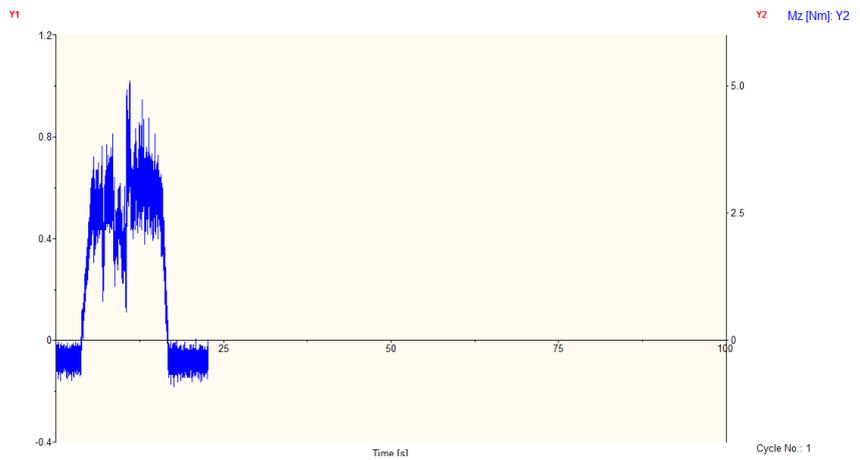
Gaya tekan (F_z)Torsi (M_z)

3. Pahat = HSS M2; PA = 134; $f = 0.07$; RPM = 1600

a. Replikasi 1

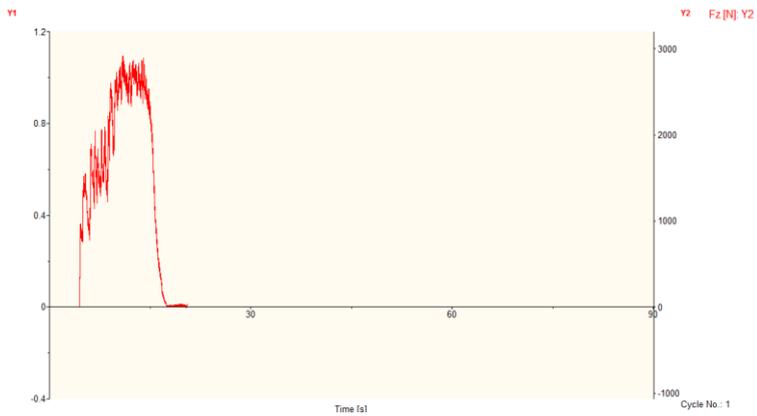
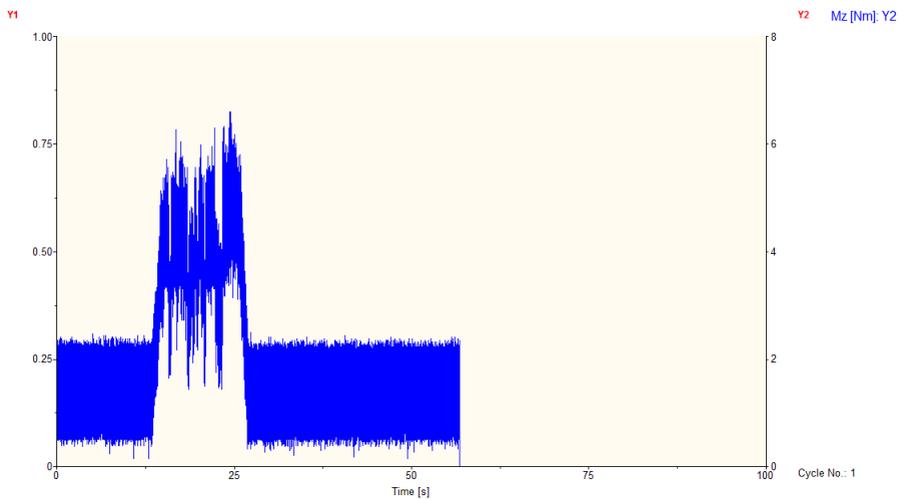


Gaya tekan (F_z)

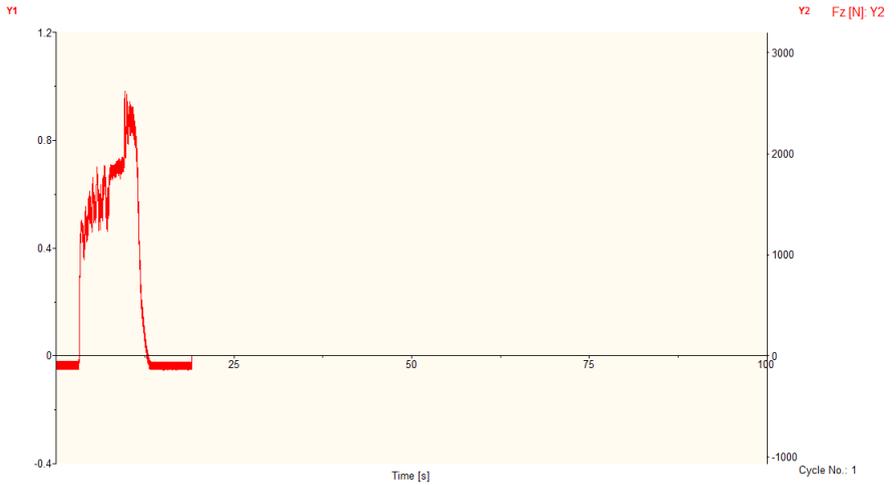
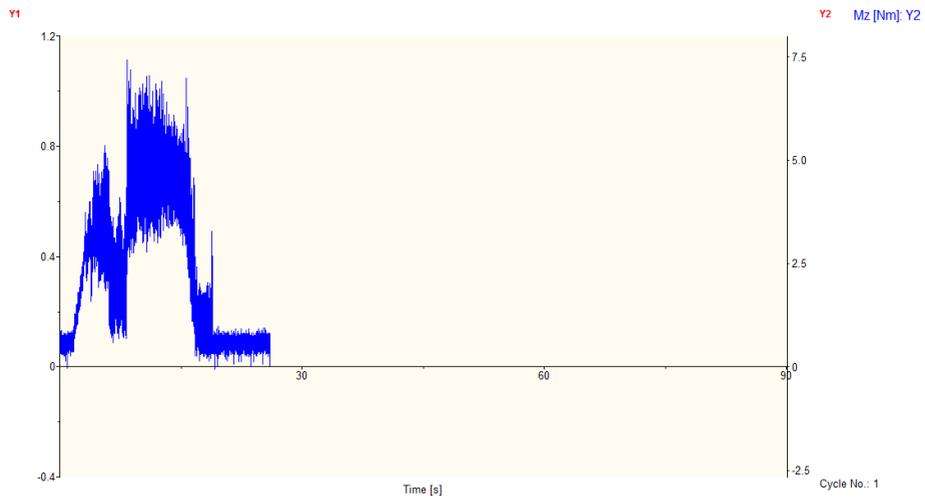


Torsi (M_z)

b. Replikasi 2

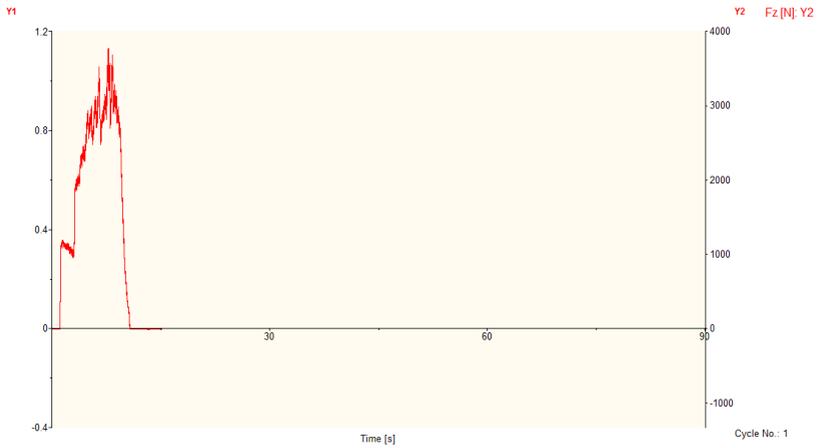
Gaya tekan (F_z)Torsi (M_z)

c. Replikasi 3

Gaya tekan (F_z)Torsi (M_z)

4. Pahat = HSS M2; PA = 134; $f = 0.1$; RPM = 1600

a. Replikasi 1

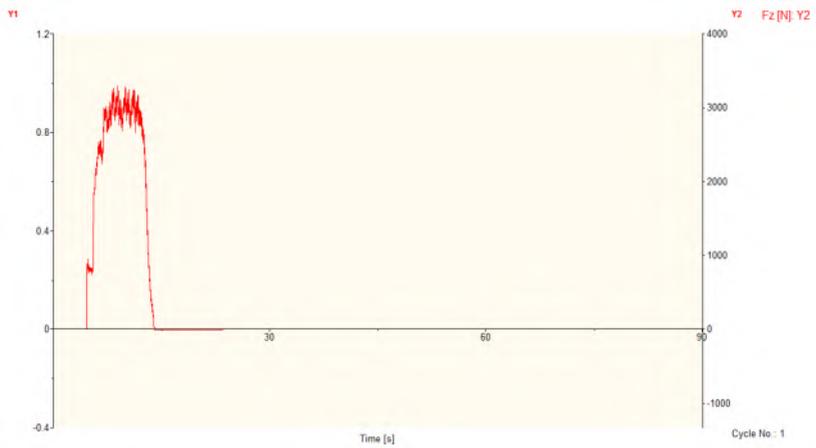
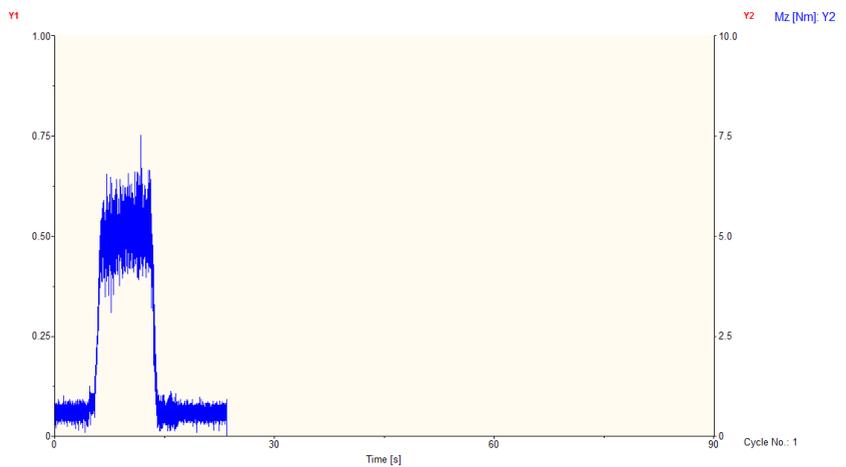


Gaya tekan (F_z)

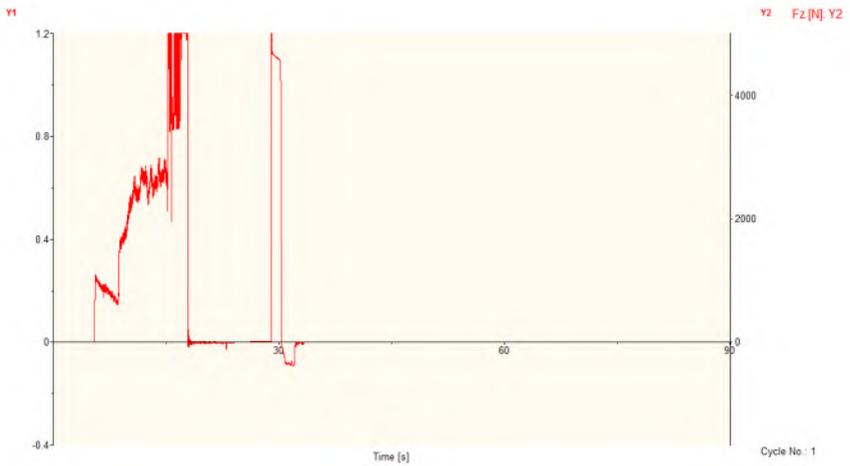
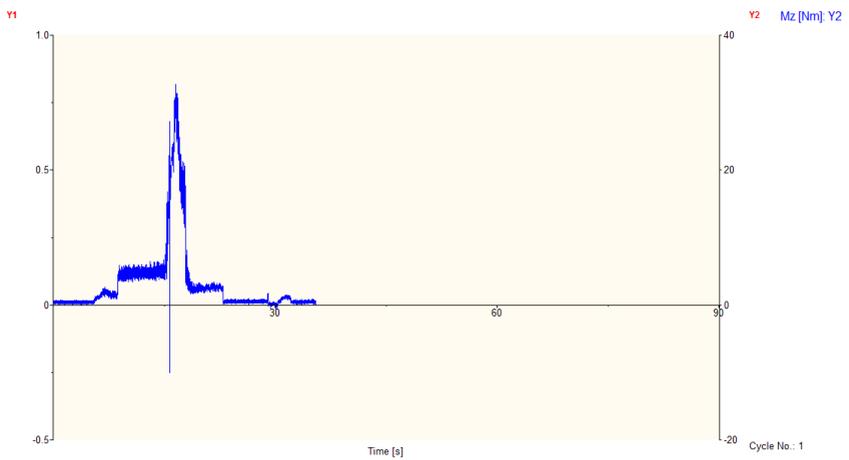


Torsi (M_z)

b. Replikasi 2

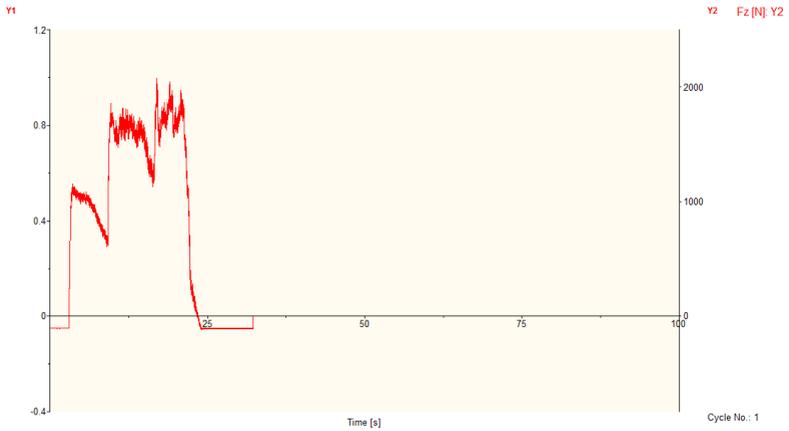
Gaya tekan (F_z)Torsi (M_z)

c. Replikasi 3

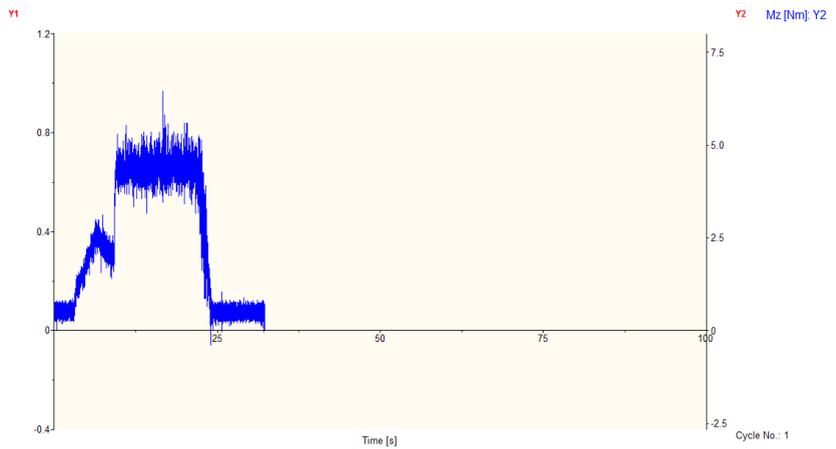
Gaya tekan (F_z)Torsi (M_z)

5. Pahat = HSS M35; PA = 118; $f = 0.07$; RPM = 1600

a. Replikasi 1

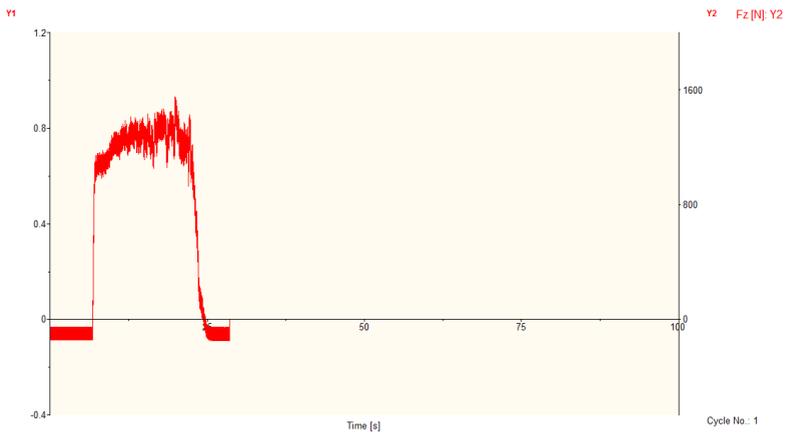
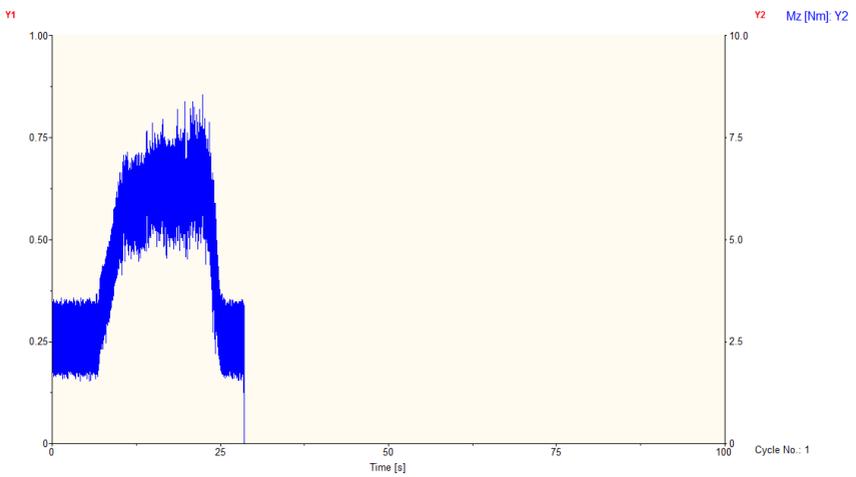


Gaya tekan (F_z)

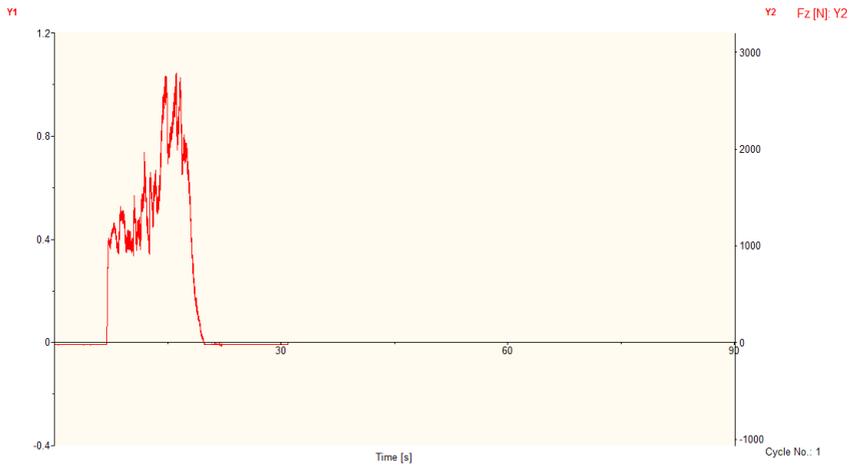
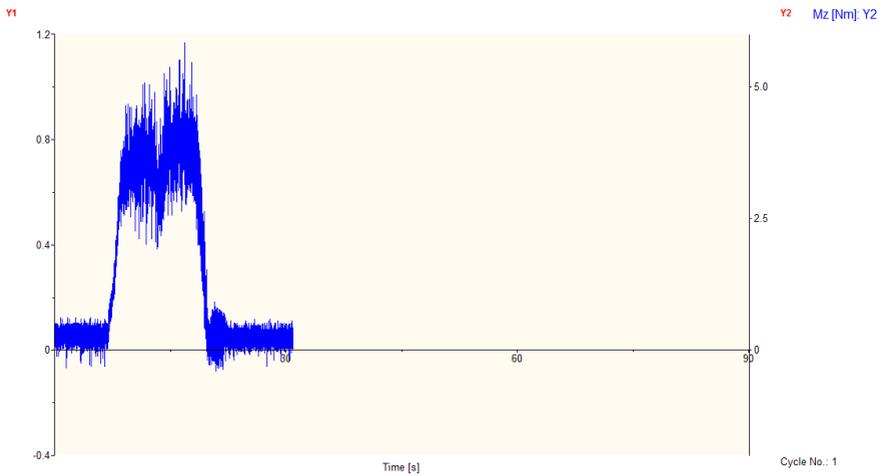


Torsi (M_z)

b. Replikasi 2

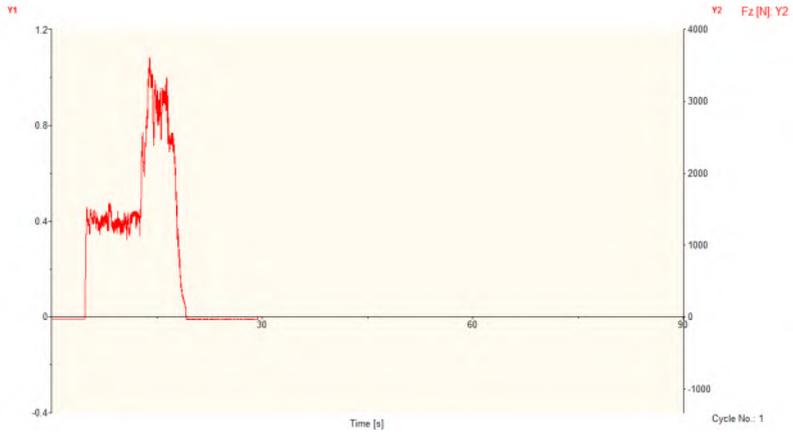
Gaya tekan (F_z)Torsi (M_z)

c. Replikasi 3

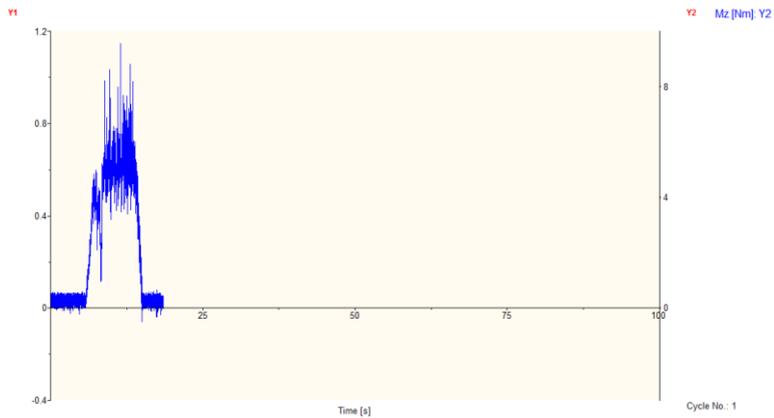
Gaya tekan (F_z)Torsi (M_z)

6. Pahat = HSS M35; PA = 118; $f = 0.1$; RPM = 1600

a. Replikasi 1

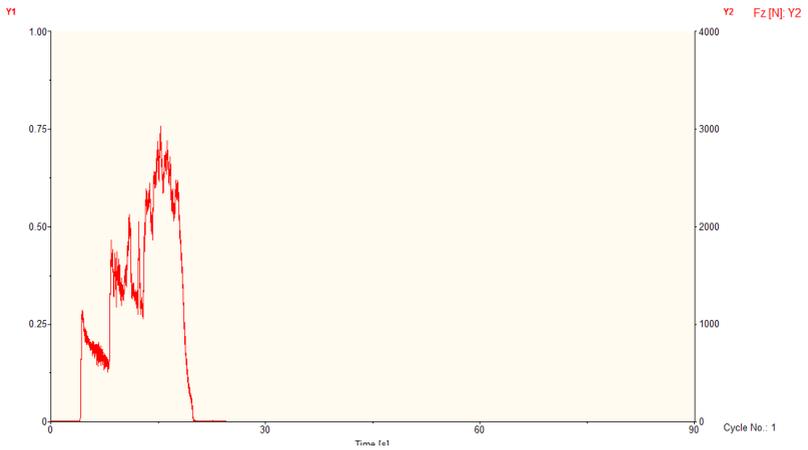
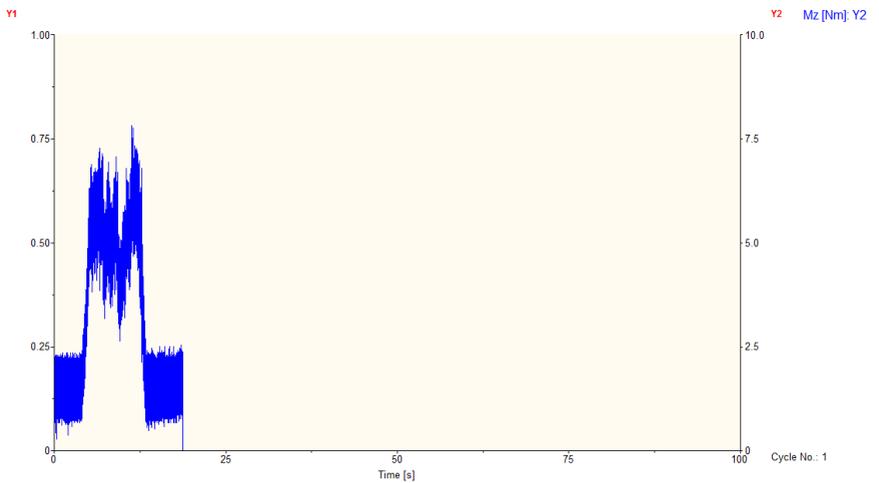


Gaya tekan (F_z)

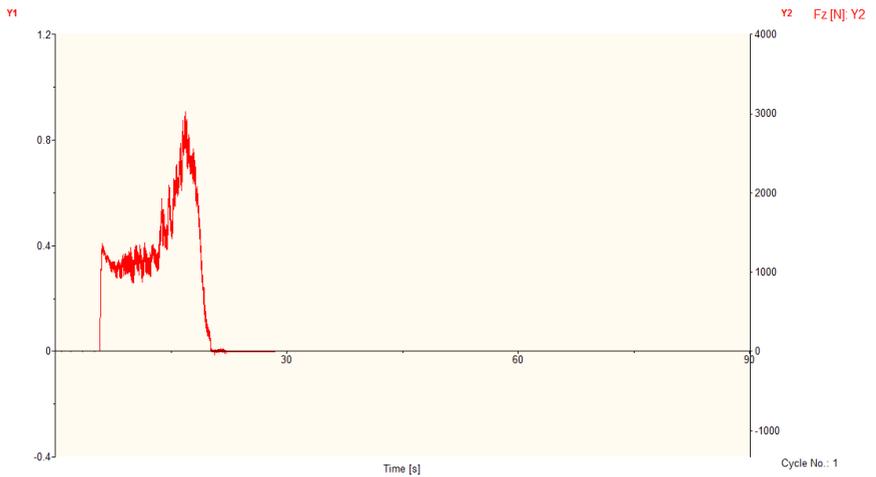
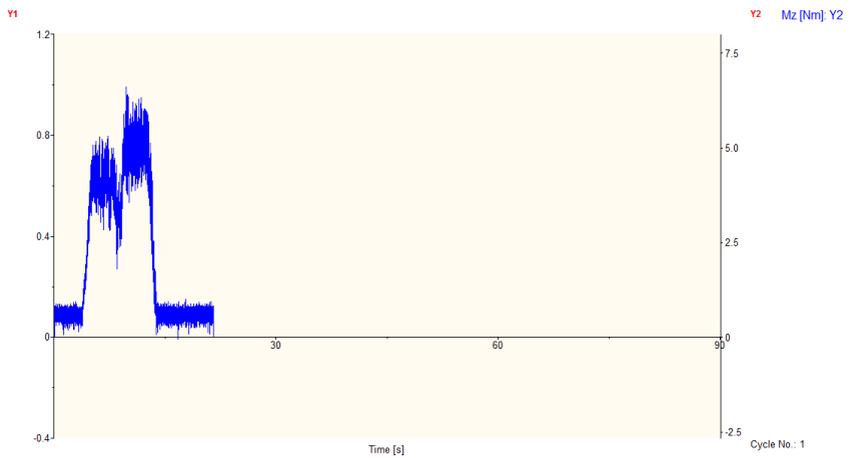


Torsi (M_z)

b. Replikasi 2

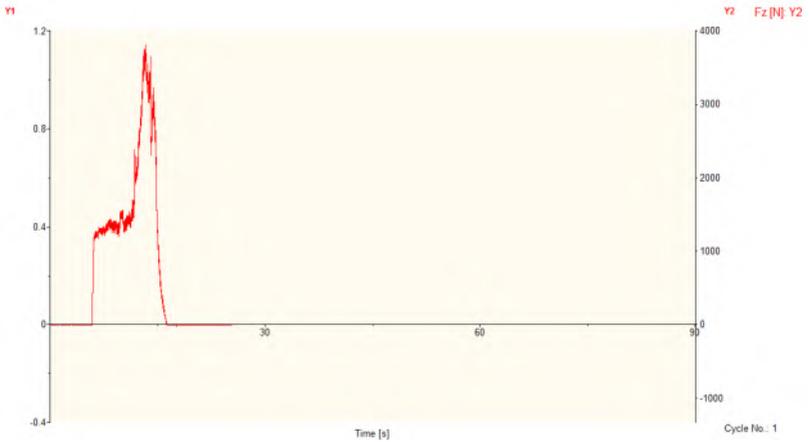
Gaya tekan (F_z)Torsi (M_z)

c. Replikasi 3

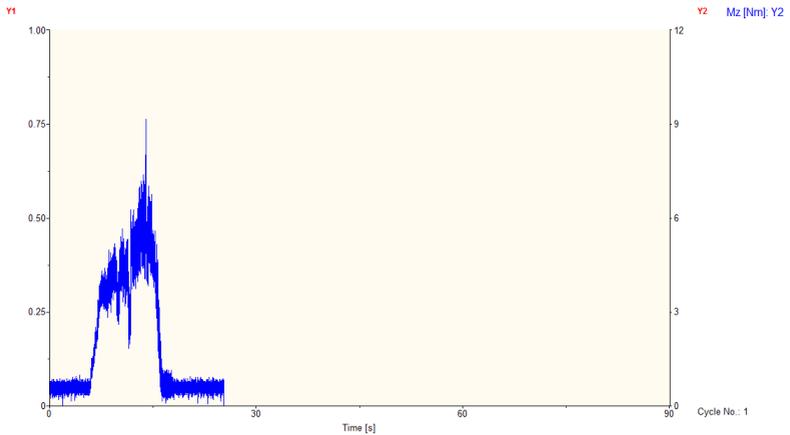
Gaya tekan (F_z)Torsi (M_z)

7. Pahat = HSS M35; PA = 134; $f = 0.07$; RPM = 1600

a. Replikasi 1

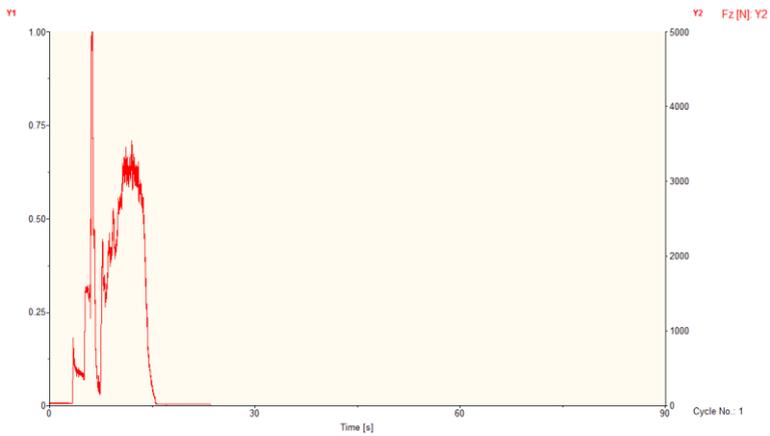
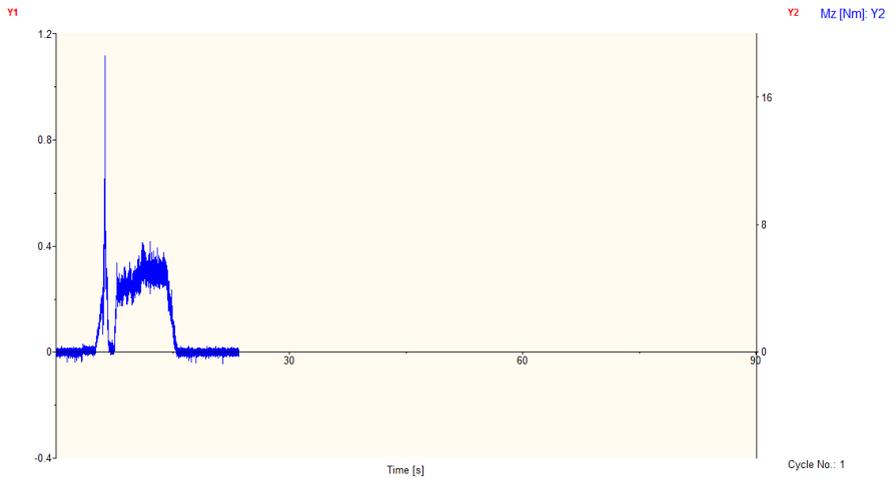


Gaya tekan (F_z)

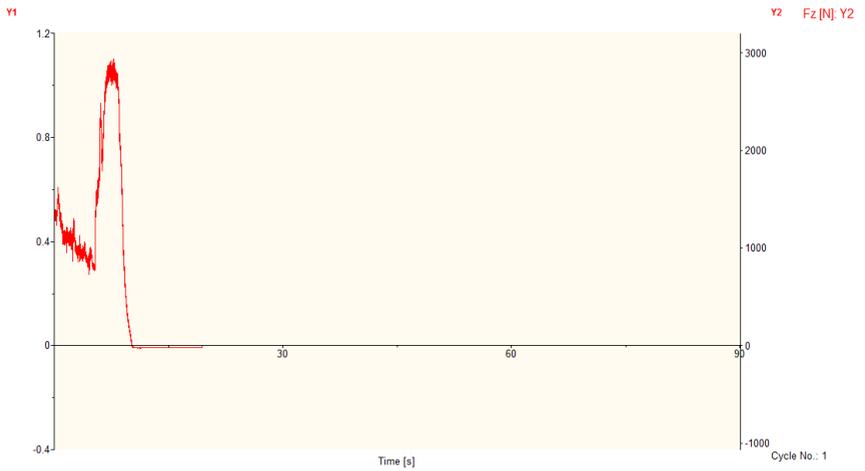
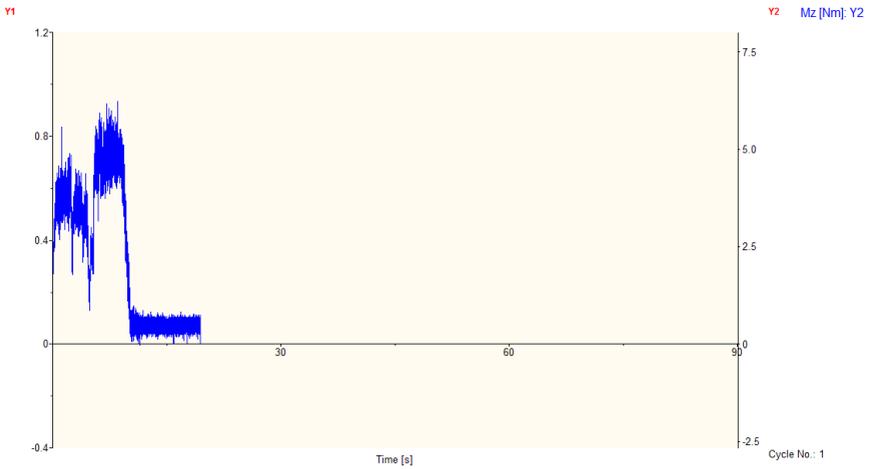


Torsi (M_z)

b. Replikasi 2

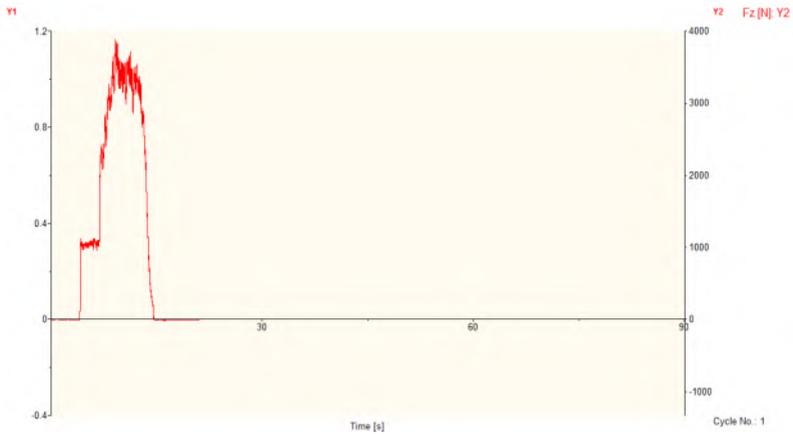
Gaya tekan (F_z)Torsi (M_z)

c. Replikasi 3

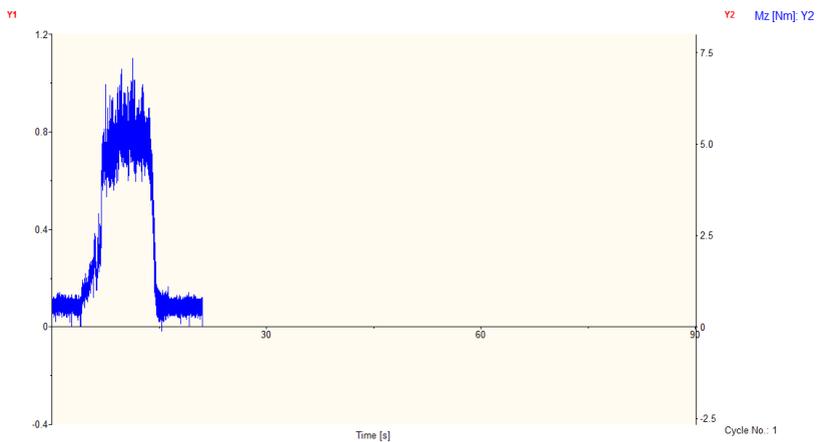
Gaya tekan (F_z)Torsi (M_z)

8. Pahat = HSS M35; PA = 134; $f = 0.07$; RPM = 1600

a. Replikasi 1

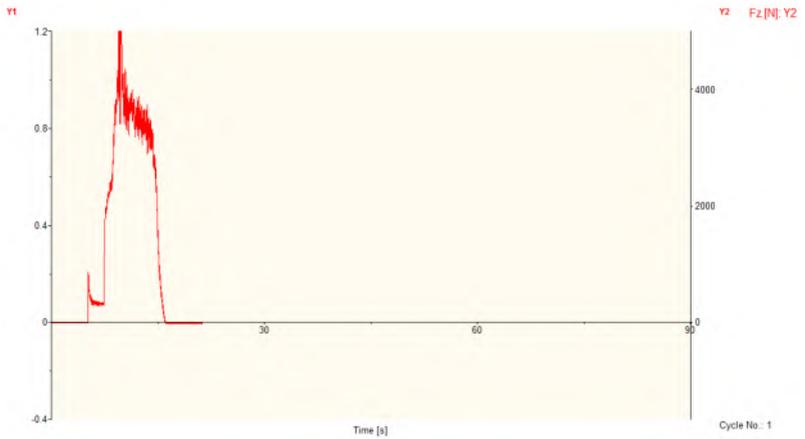
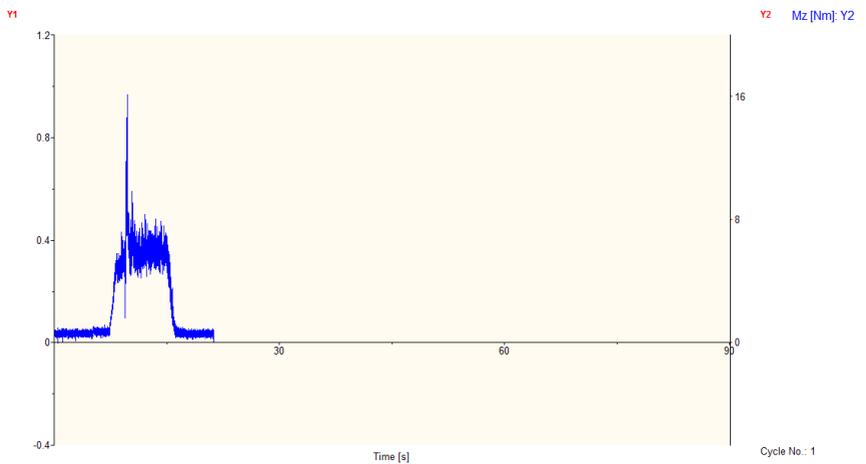


Gaya tekan (F_z)

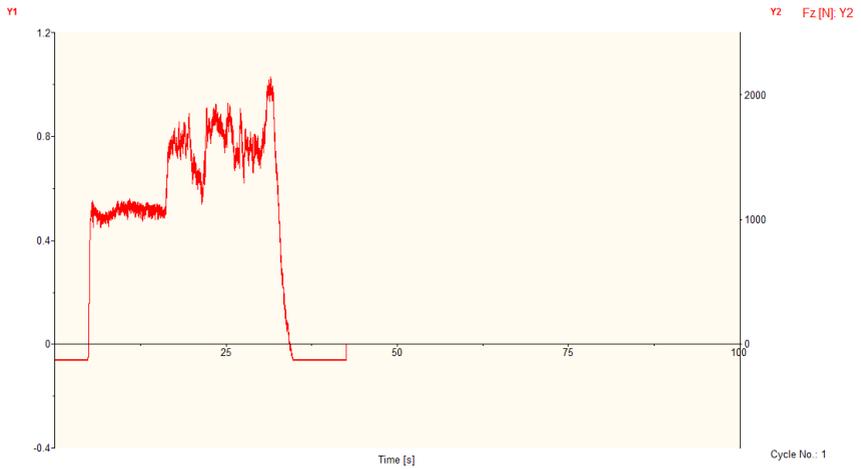
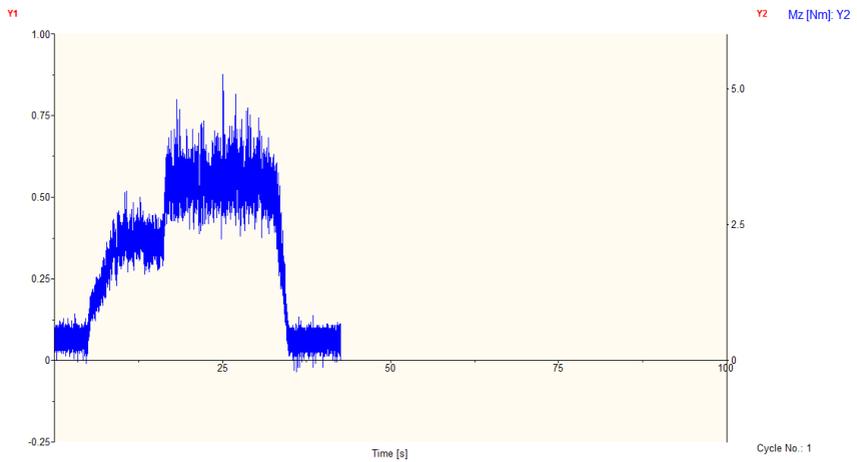


Torsi (M_z)

b. Replikasi 2

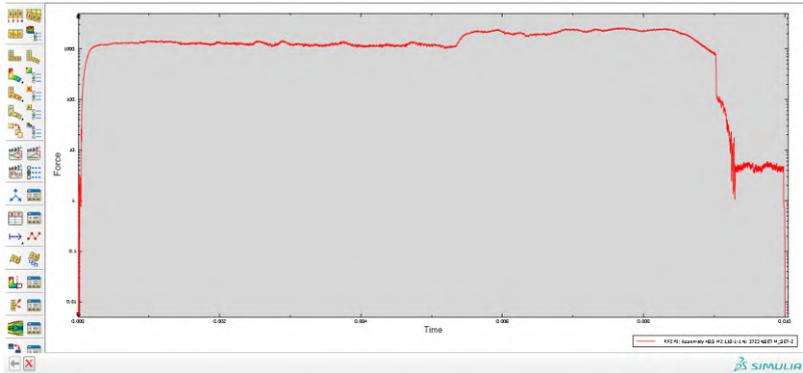
Gaya tekan (F_z)Torsi (M_z)

c. Replikasi 3

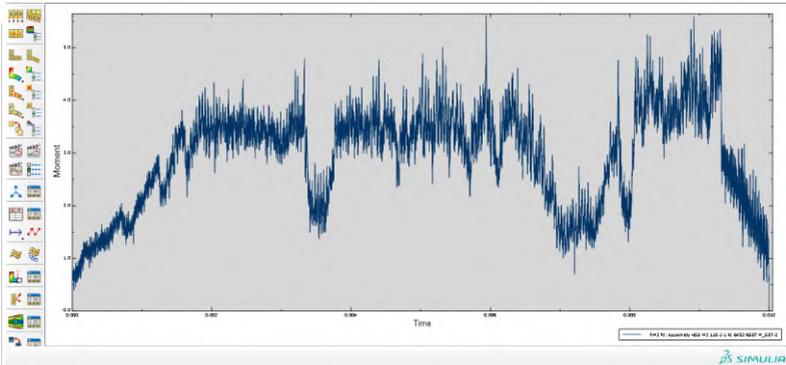
Gaya tekan (F_z)Torsi (M_z)

B. GRAFIK GAYA TEKAN DAN TORSI SIMULASI

1. Pahat = HSS M2; PA = 118; $f = 0.07$; RPM = 1600

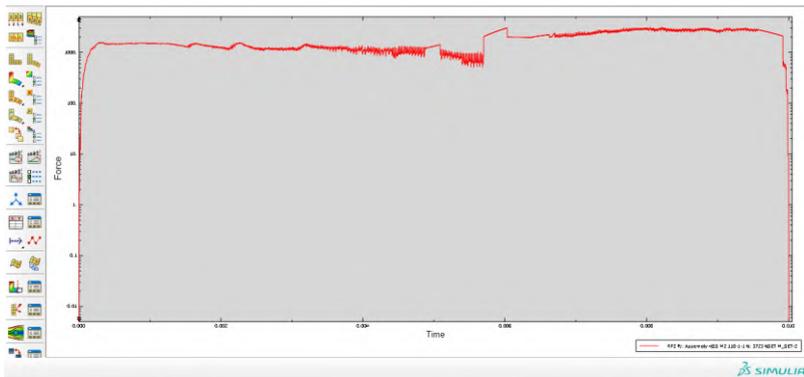


Gaya tekan (F_z)

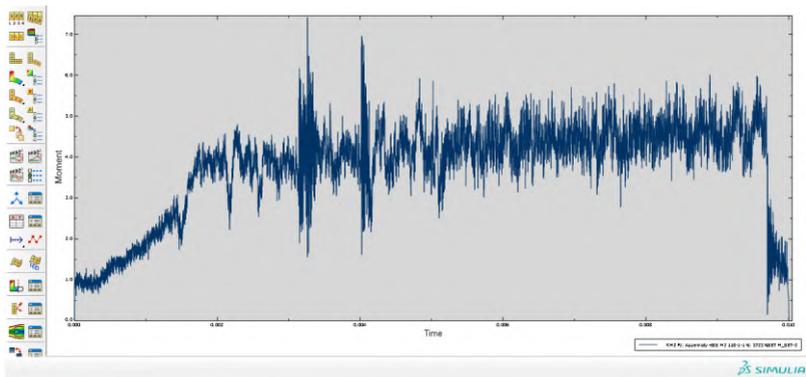


Torsi (M_z)

2. Pahat = HSS M2; PA = 118; $f = 0.1$; RPM = 1600

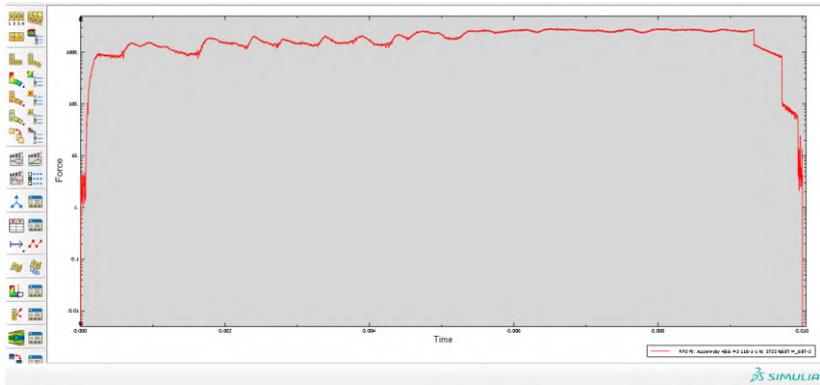


Gaya tekan (F_z)

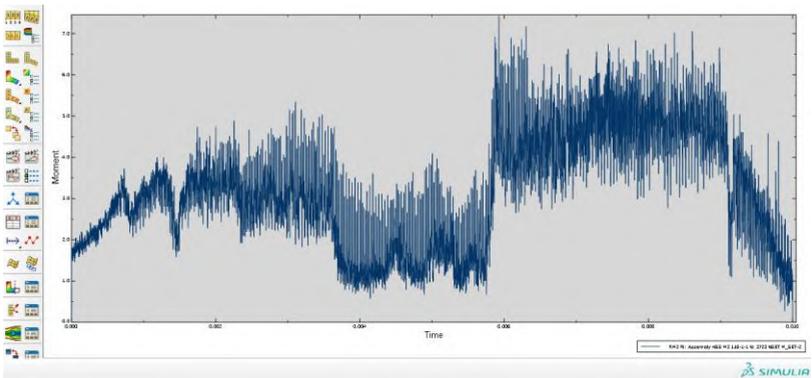


Torsi (M_z)

3. Pahat = HSS M2; PA = 134; $f = 0.07$; RPM = 1600

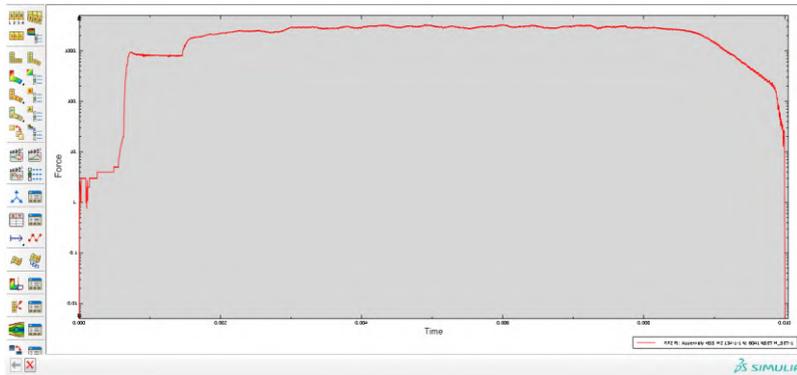


Gaya tekan (F_z)

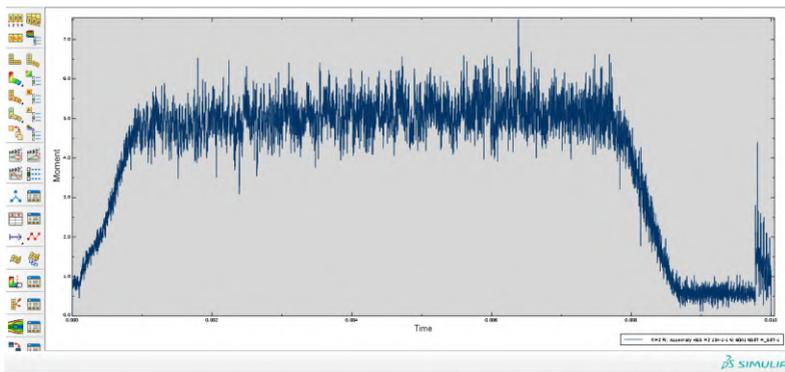


Torsi (M_z)

4. Pahat = HSS M2; PA = 134; $f = 0.1$; RPM = 1600

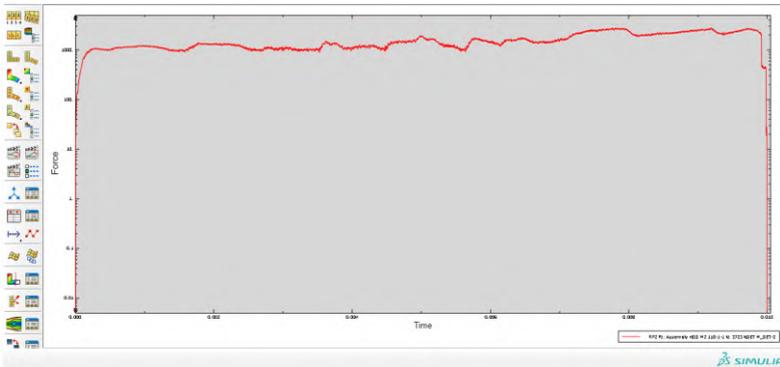


Gaya tekan (F_z)

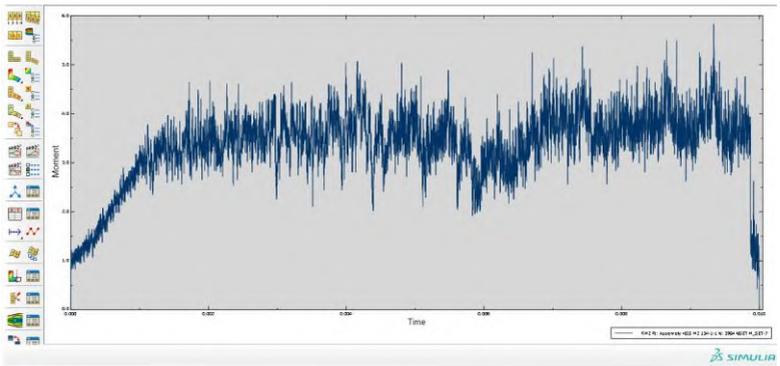


Torsi (M_z)

5. Pahat = HSS M35; PA = 118; $f = 0.07$; RPM = 1600

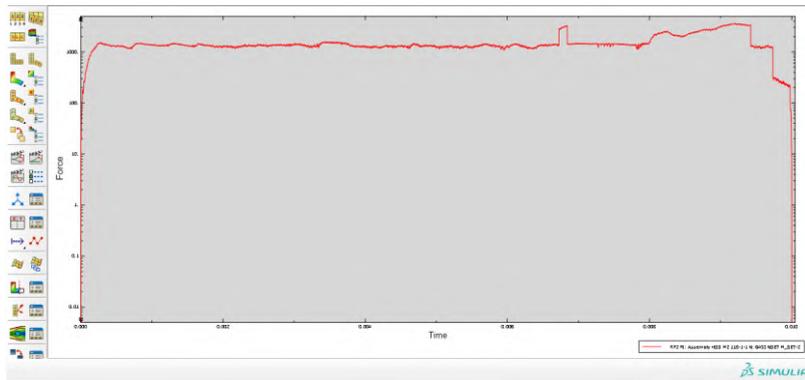


Gaya tekan (F_z)

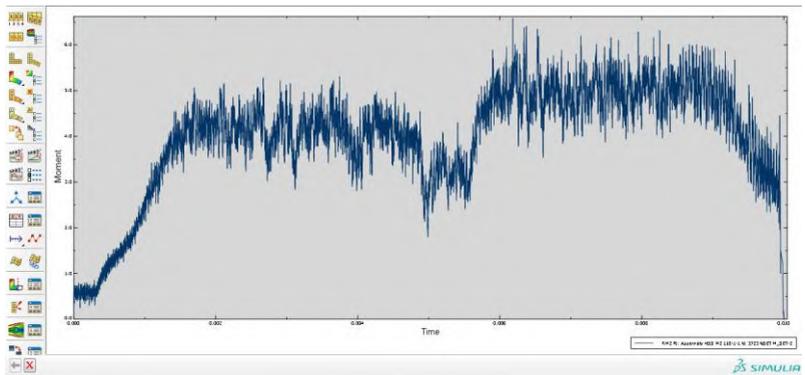


Torsi (M_z)

6. Pahat = HSS M35; PA = 118; $f = 0.1$; RPM = 1600

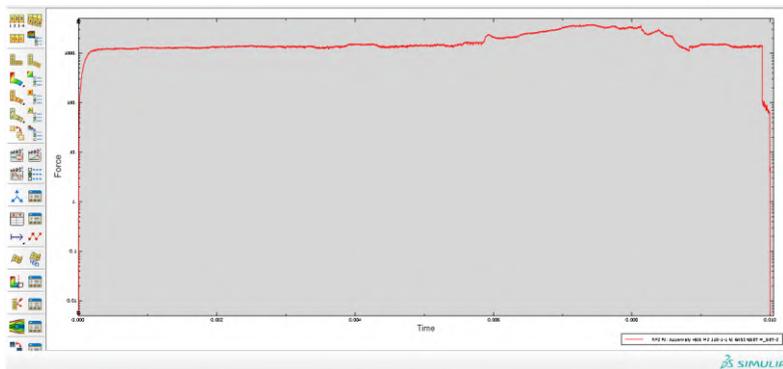


Gaya tekan (F_z)

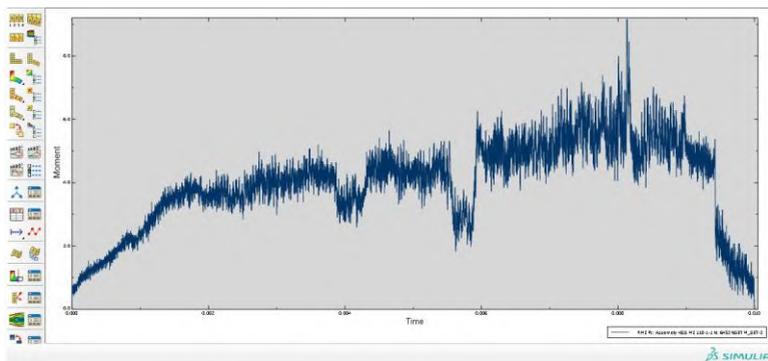


Torsi (M_z)

7. Pahat = HSS M35; PA = 134; $f = 0.07$; RPM = 1600

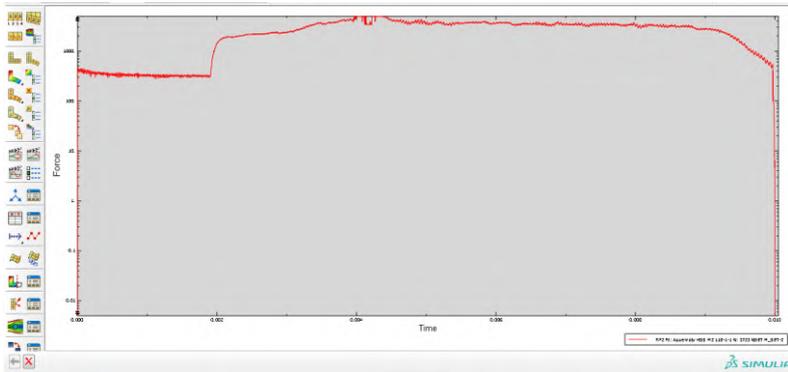


Gaya tekan (F_z)

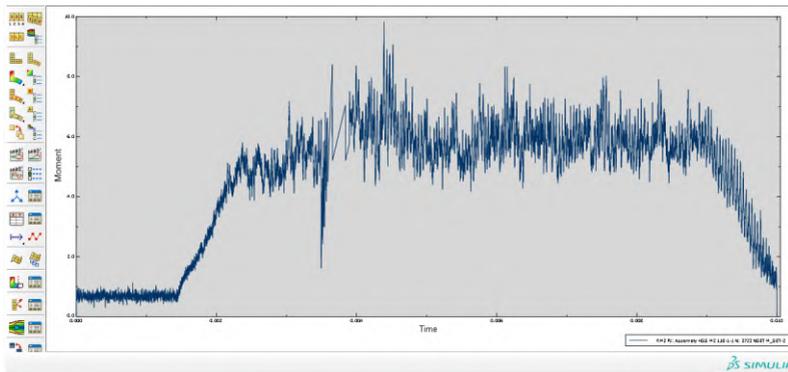


Torsi (M_z)

8. Pahat = HSS M35; PA = 134; $f = 0.1$; RPM = 1600



Gaya tekan (F_z)



Torsi (M_z)

LAMPIRAN 3

A. Hasil uji kesamaan antara data gaya tekan hasil eksperimen dan simulasi

1. Kombinasi 1 (HSS M2, PA = 118, f = 0.07)

One-Sample T: F1

Test of $\mu = 1612.21$ vs $\neq 1612.21$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
F1	3	1623.0	48.2	27.8	(1503.2, 1742.8)	0.39	0.736

2. Kombinasi 2 (HSS M2, PA = 118, f = 0.1)

One-Sample T: F2

Test of $\mu = 2682.92$ vs $\neq 2682.92$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
F2	3	2689.3	142.9	82.5	(2334.2, 3044.4)	0.08	0.945

3. Kombinasi 3 (HSS M2, PA = 134, f = 0.07)

One-Sample T: F3

Test of $\mu = 2350.84$ vs $\neq 2350.84$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
F3	3	2263	471	272	(1093, 3433)	-0.32	0.777

4. Kombinasi 4 (HSS M2, PA = 134, f = 0.1)

One-Sample T: F4

Test of $\mu = 2891.27$ vs $\neq 2891.27$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
F4	3	2769.3	107.9	62.3	(2501.3, 3037.4)	-1.96	0.189

5. Kombinasi 5 (HSS M35, PA = 118, f = 0.07)

One-Sample T: F5

Test of $\mu = 1634.76$ vs $\neq 1634.76$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
F5	3	1546.3	123.2	71.1	(1240.3, 1852.4)	-1.24	0.340

6. Kombinasi 6 (HSS M35, PA = 118, f = 0.1)

One-Sample T: F6

Test of $\mu = 2246.47$ vs $\neq 2246.47$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
F6	3	2187.3	52.3	30.2	(2057.4, 2317.2)	-1.96	0.189

7. Kombinasi 7 (HSS M35, PA = 134, f = 0.07)

One-Sample T: F7

Test of $\mu = 2246.47$ vs $\neq 2246.47$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
F7	3	1916.3	116.2	67.1	(1627.6, 2205.0)	-4.92	0.039

8. Kombinasi 8 (HSS M35, PA = 134, f = 0.1)

One-Sample T: F8

Test of $\mu = 2546.36$ vs $\neq 2546.36$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
F8	3	2441.3	73.2	42.3	(2259.4, 2623.3)	-2.48	0.131

B. Hasil uji kesamaan antara data torsi hasil eksperimen dan simulasi

1. Kombinasi 1 (HSS M2, PA = 118, f = 0.07)

One-Sample T: T1

Test of $\mu = 3.13389$ vs $\neq 3.13389$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
T1	3	3.853	0.508	0.293	(2.590, 5.116)	2.45	0.134

2. Kombinasi 2 (HSS M2, PA = 118, f = 0.1)

One-Sample T: T2

Test of $\mu = 3.96968$ vs $\neq 3.96968$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
T2	3	4.719	1.092	0.631	(2.006, 7.432)	1.19	0.357

3. Kombinasi 3 (HSS M2, PA = 134, f = 0.07)

One-Sample T: T3

Test of $\mu = 3.75128$ vs $\neq 3.75128$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
T3	3	3.206	0.650	0.375	(1.592, 4.820)	-1.45	0.283

4. Kombinasi 4 (HSS M2, PA = 134, f = 0.1)

One-Sample T: T4

Test of $\mu = 3.9505$ vs $\neq 3.9505$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
T4	3	4.0177	0.1543	0.0891	(3.6345, 4.4009)	0.75	0.529

5. Kombinasi 5 (HSS M35, PA = 118, f = 0.07)

One-Sample T: T5

Test of $\mu = 2.93330$ vs $\neq 2.93330$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
T5	3	3.37	1.77	1.02	(-1.03, 7.77)	0.42	0.712

6. Kombinasi 6 (HSS M35, PA = 118, f = 0.1)

One-Sample T: T6

Test of $\mu = 3.58394$ vs $\neq 3.58394$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
T6	3	4.151	0.510	0.294	(2.885, 5.416)	1.93	0.194

7. Kombinasi 7 (HSS M35, PA = 134, f = 0.07)

One-Sample T: T7

Test of $\mu = 3.34706$ vs $\neq 3.34706$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
T7	3	3.066	0.950	0.549	(0.706, 5.426)	-0.51	0.659

8. Kombinasi 8 (HSS M35, PA = 134, f = 0.1)

One-Sample T: T8

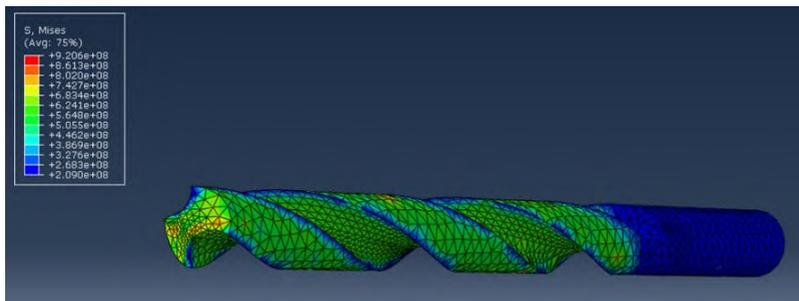
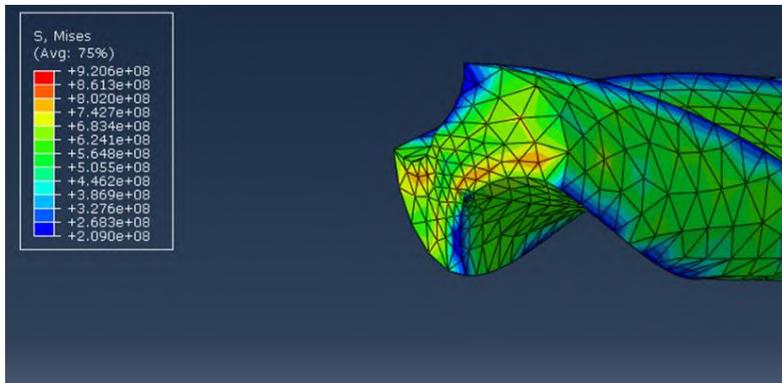
Test of $\mu = 4.04063$ vs $\neq 4.04063$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
T8	3	3.771	0.329	0.190	(2.954, 4.587)	-1.42	0.291

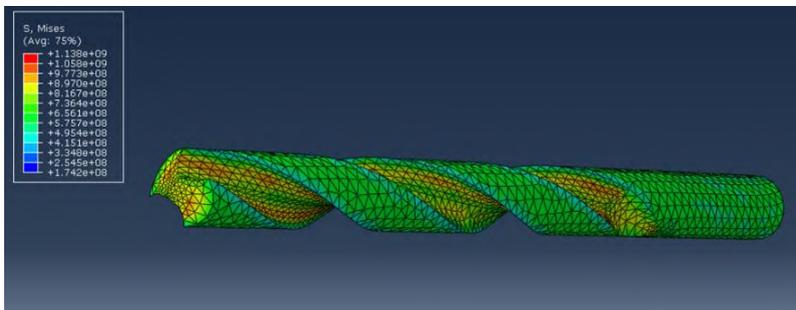
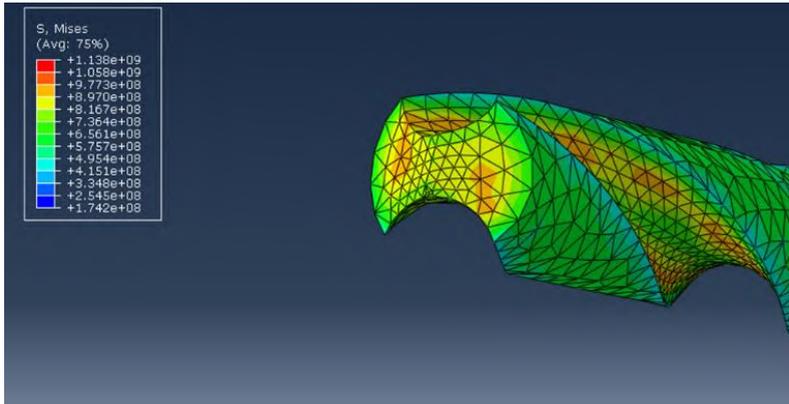
LAMPIRAN 4

Tegangan Maksimum pada Pahat Gurdi Hasil Simulasi

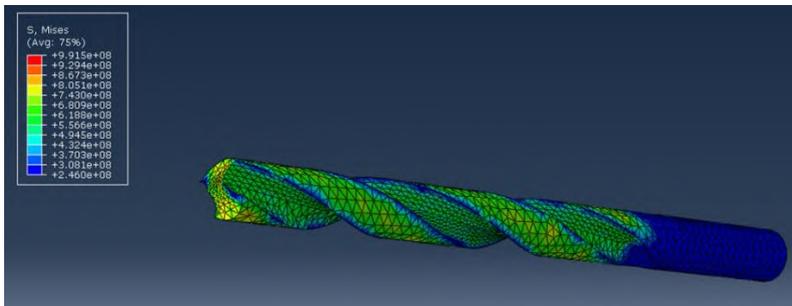
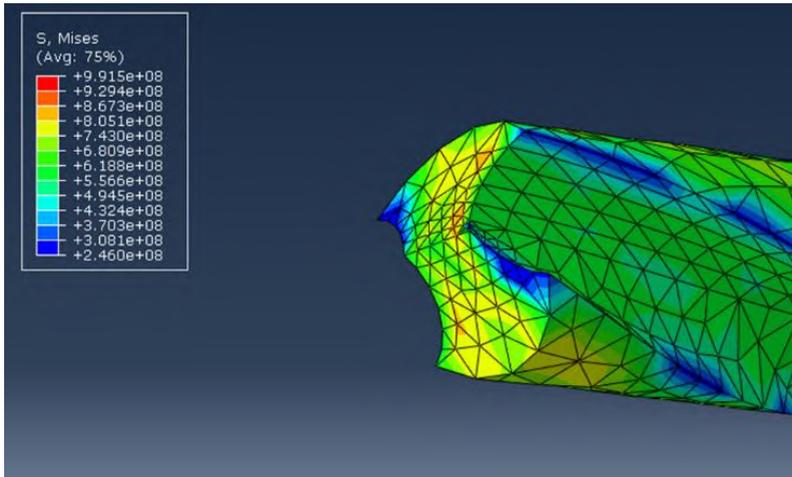
1. M2 118 0.07



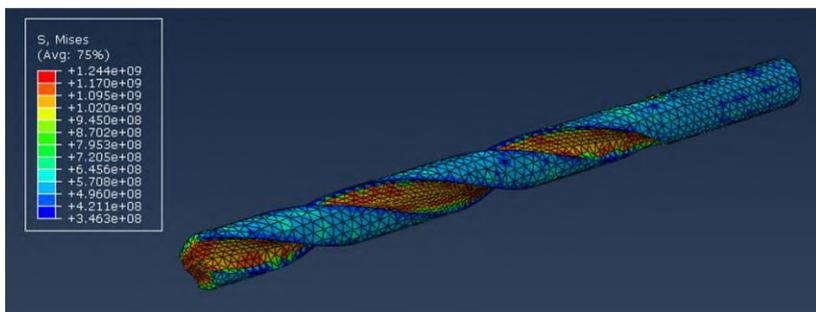
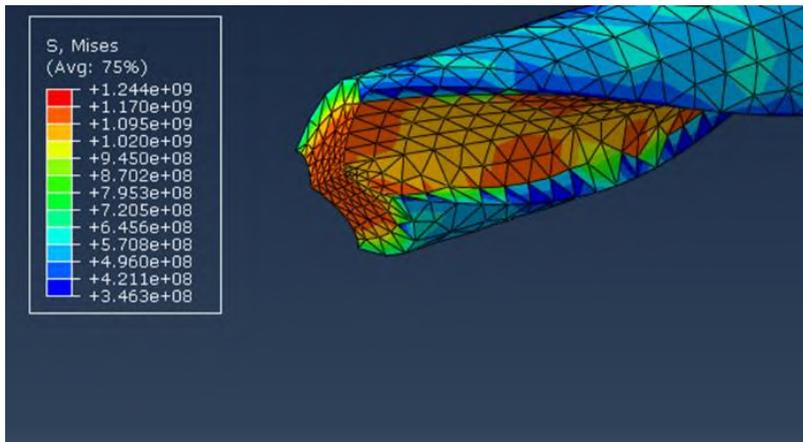
2. M2 118 0.1



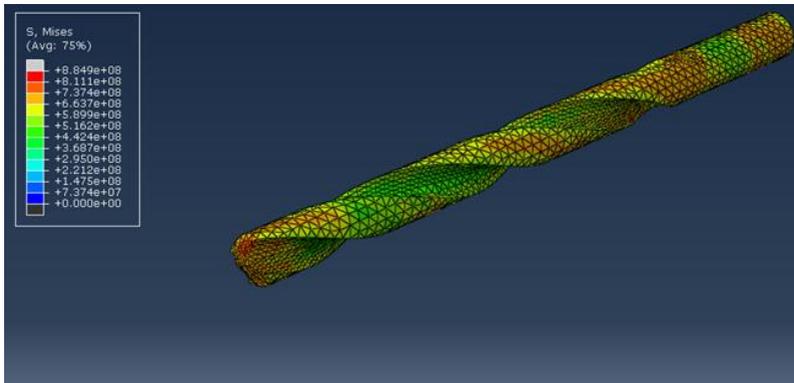
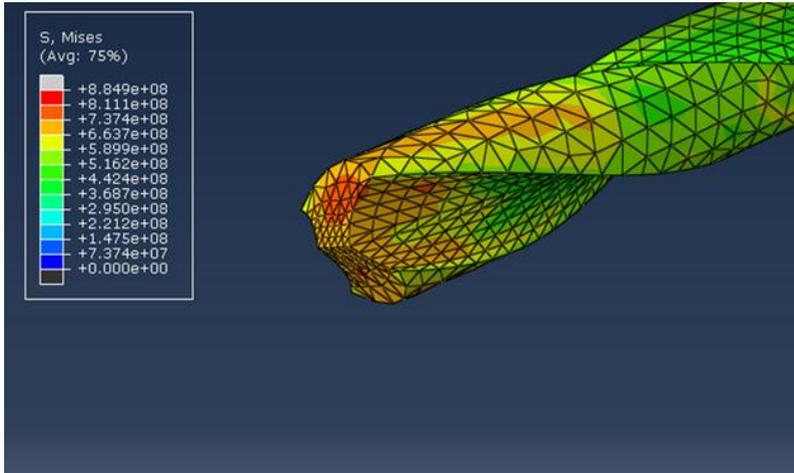
3. M2 134 0.07



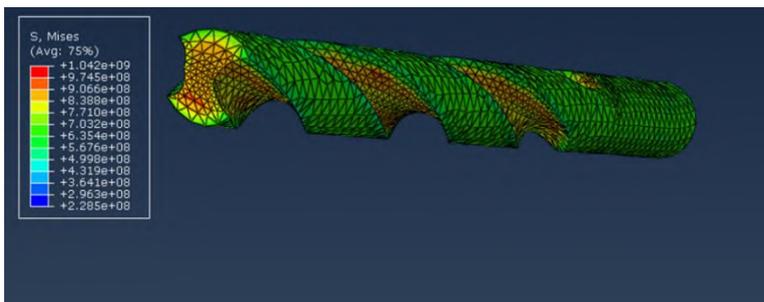
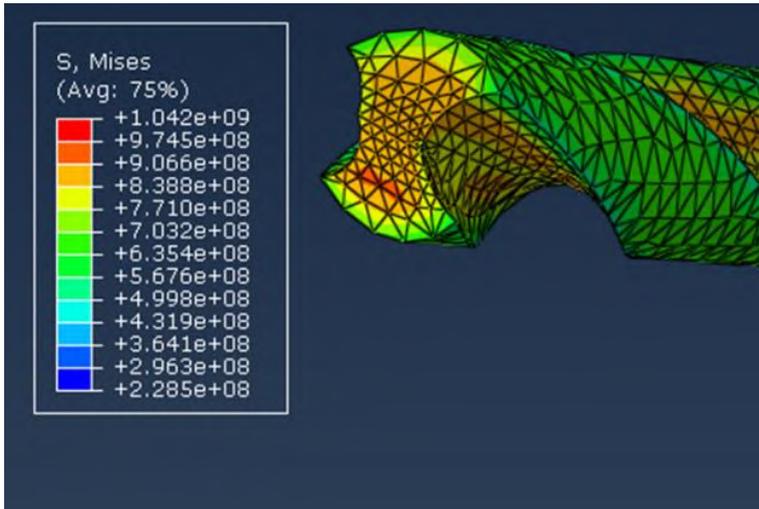
4. M2 134 0.1



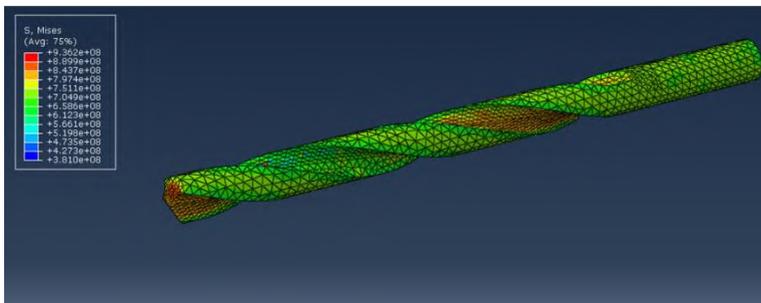
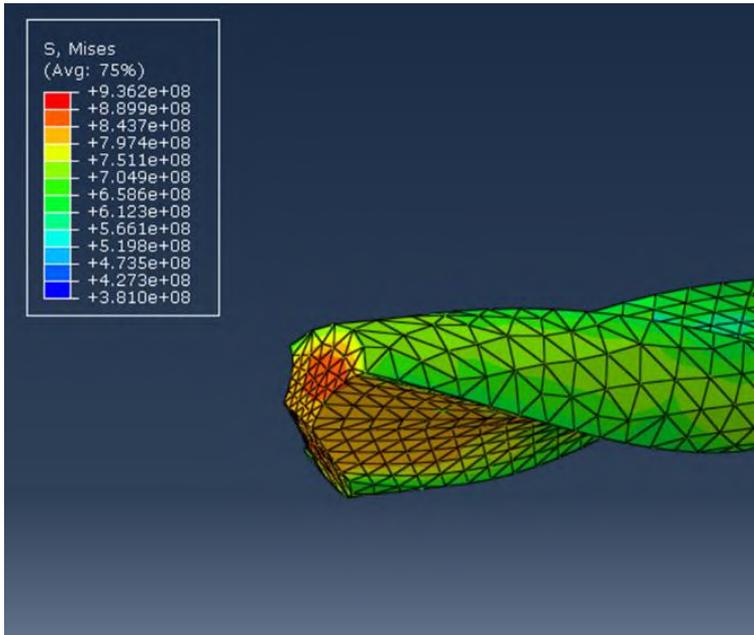
5. M35 118 0.07



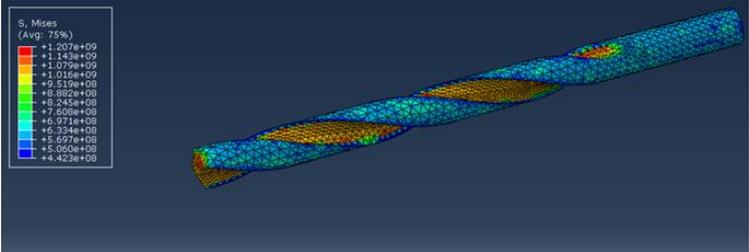
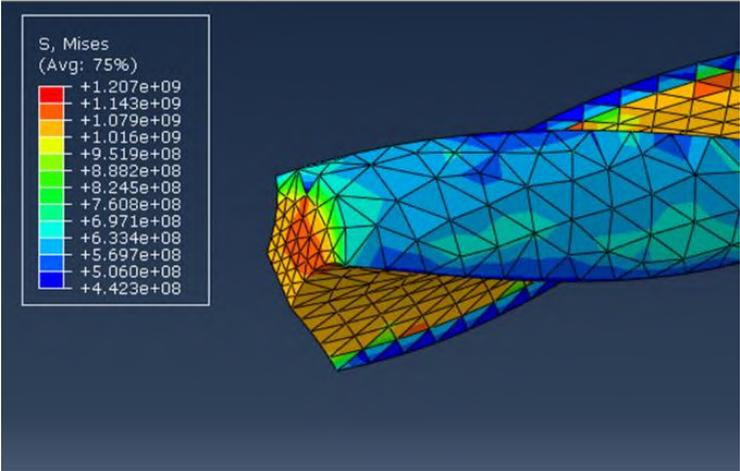
6. M35 118 0.1



7. M35 134 0.07



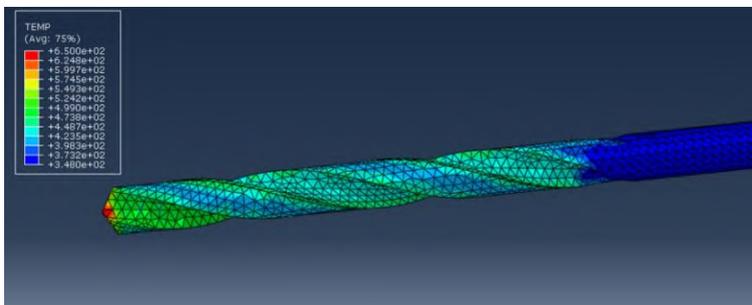
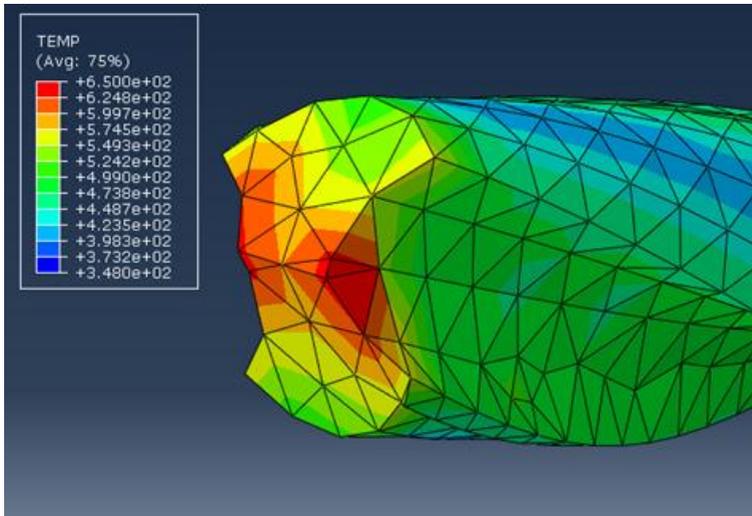
8. M35 134 0.1



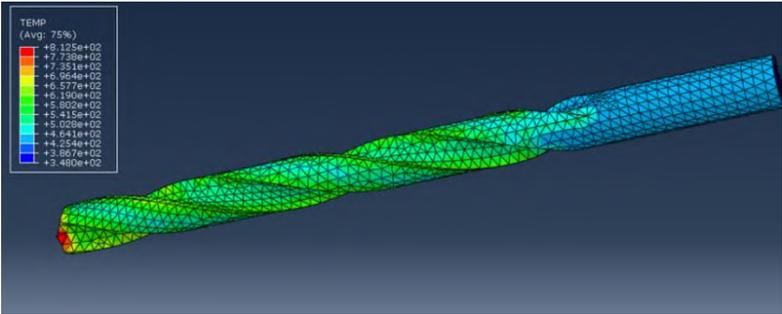
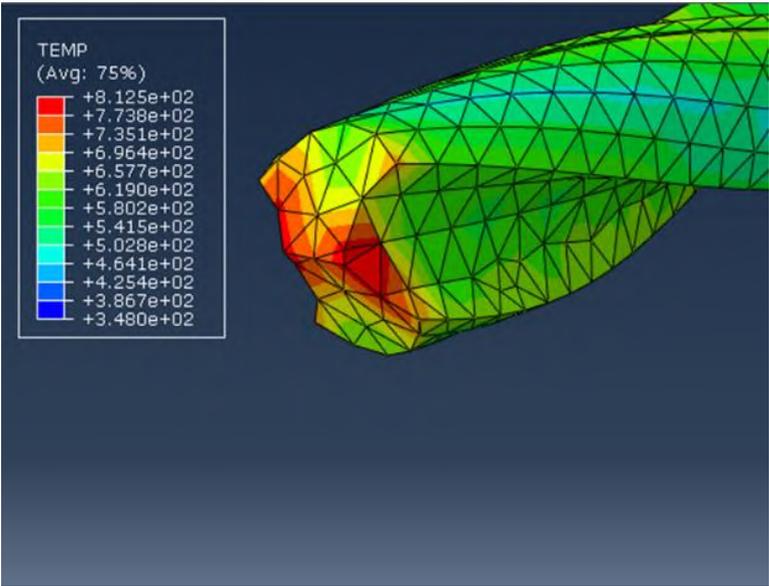
LAMPIRAN 5

Temperatur Maksimum pada Pahat Gurdi Hasil Simulasi

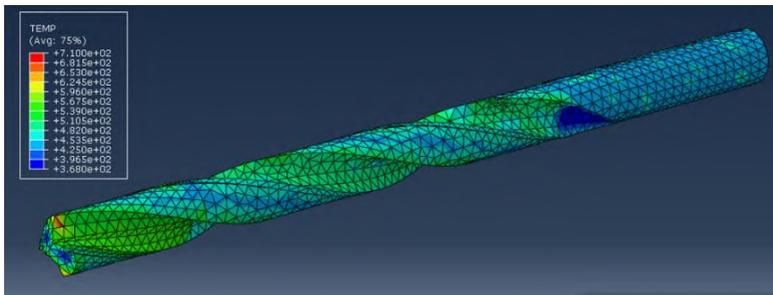
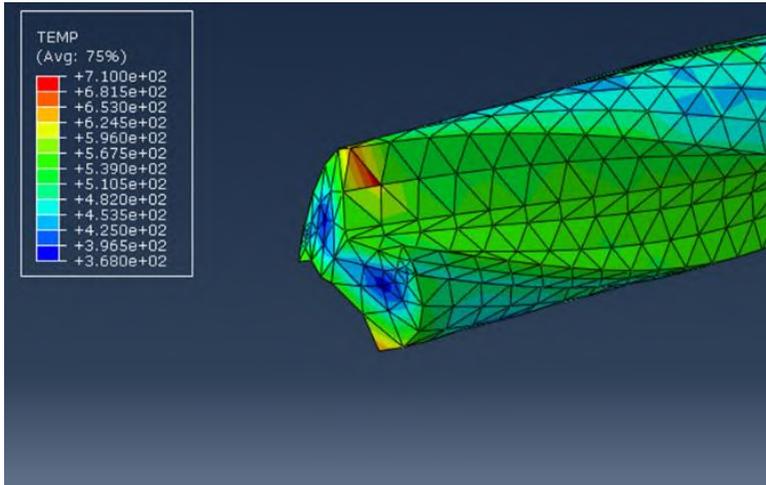
1. M2 118 0.07



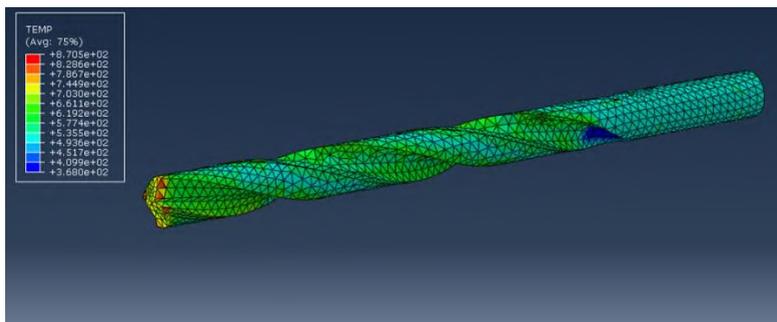
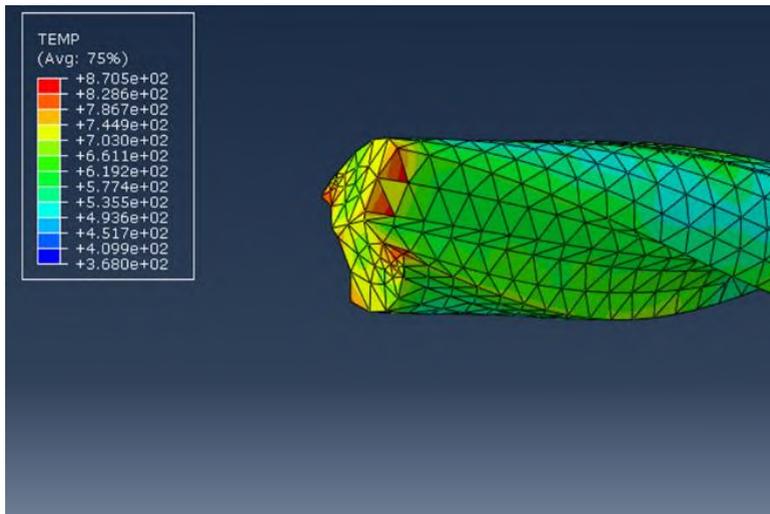
2. M2 118 0.1



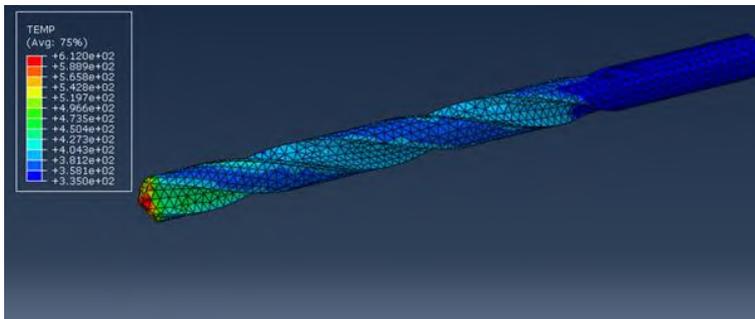
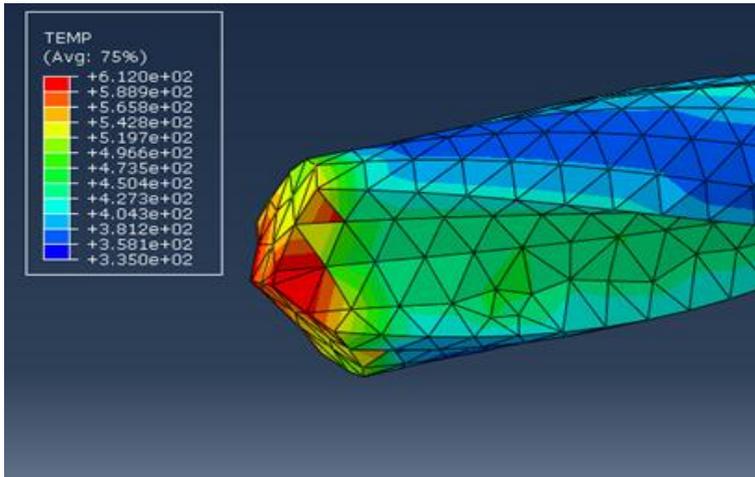
3. M2 134 0.07



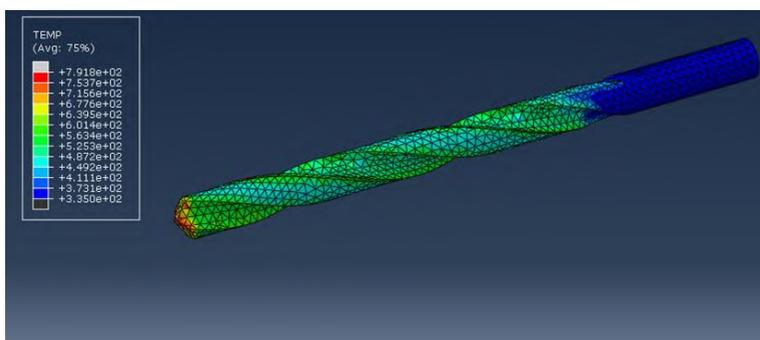
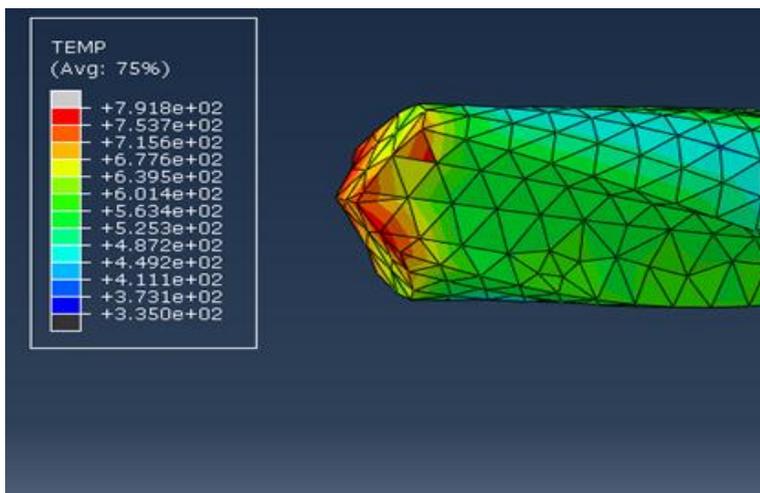
4. M2 134 0.1



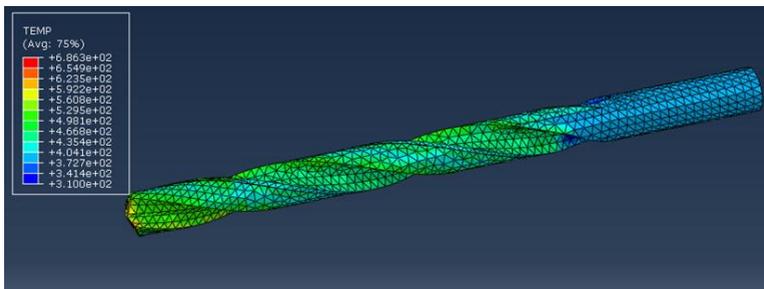
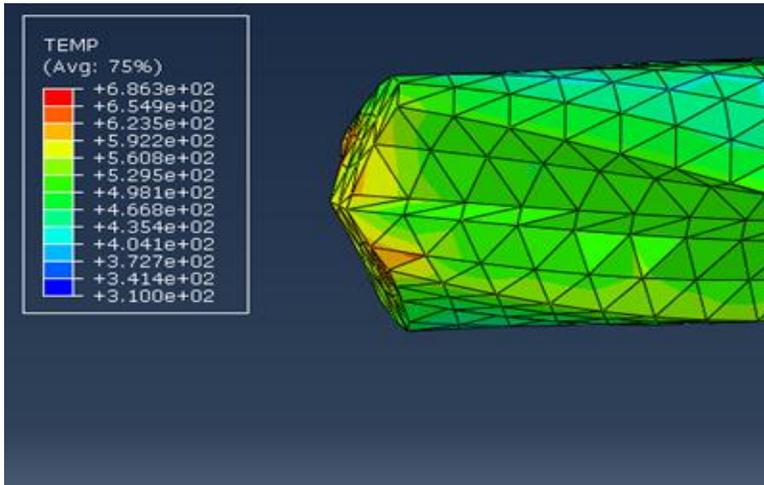
5. M35 118 0.07



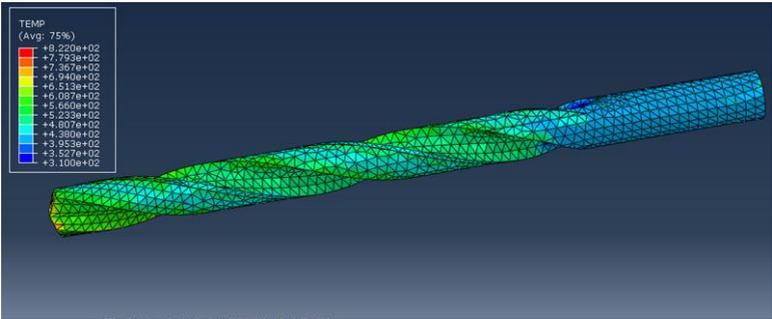
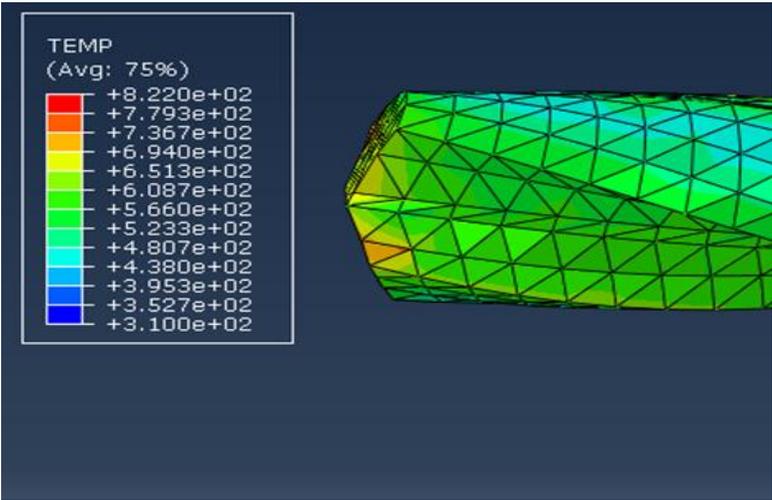
6. M35 118 0.1



7. M35 134 0.07



8. M35 134 0.1



LAMPIRAN 6

Properties Pahat Gurdi

1. HSS M2

	Temperature		
	20°C	400°C	600°C
Density g/cm ³	8.1	8.1	8.0
Modulus of elasticity kN/mm ²	225	200	180
Thermal expansion ratio per °C	-	12.1x10 ⁻⁶	12.6x10 ⁻⁶
Thermal conductivity W/m°C	24	28	27
Specific heat J/kg °C	420	510	600

2. HSS M35

	Temperature		
	20°C	400°C	600°C
Density g/cm ³	8.1	8.0	8.0
Modulus of elasticity kN/mm ²	230	205	184
Thermal expansion ratio per °C	-	11.6x10 ⁻⁶	11.9x10 ⁻⁶
Thermal conductivity W/m°C	24	28	27
Specific heat J/kg °C	420	510	600

LAMPIRAN 7

Hasil Regresi

1. Hasil Regresi Gaya Tekan

Regression Analysis: logt_gaya tekan versus logt_JP, logt_PA, logt_f

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	0.17409	0.058029	29.19	0.000
logt_JP	1	0.02012	0.020121	10.12	0.005
logt_PA	1	0.03190	0.031897	16.05	0.001
logt_f	1	0.12207	0.122069	61.41	0.000
Error	20	0.03976	0.001988		
Lack-of-Fit	4	0.01445	0.003612	2.28	0.105
Pure Error	16	0.02531	0.001582		
Total	23	0.21384			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0445844	81.41%	78.62%	73.23%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	4.313	0.128	33.81	0.000	
logt_JP	-0.1924	0.0605	-3.18	0.005	1.00
logt_PA	0.2422	0.0605	4.01	0.001	1.00
logt_f	0.921	0.118	7.84	0.000	1.00

Regression Equation

$$\text{logt_gaya tekan} = 4.313 - 0.1924 \text{ logt_JP} + 0.2422 \text{ logt_PA} + 0.921 \text{ logt_f}$$

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	logt_gaya tekan	Fit	Resid	Std Resid	
8	3.4059	3.3225	0.0834	2.05	R
9	3.2353	3.3225	-0.0872	-2.14	R

R Large residual

2. Hasil Regresi Torsi

Regression Analysis: logt_torsi versus logt_JP, logt_PA, logt_f

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	0.102509	0.034170	2.48	0.091
logt_JP	1	0.018174	0.018174	1.32	0.264
logt_PA	1	0.012601	0.012601	0.91	0.351
logt_f	1	0.071733	0.071733	5.20	0.034
Error	20	0.275778	0.013789		
Lack-of-Fit	4	0.007839	0.001960	0.12	0.975
Pure Error	16	0.267939	0.016746		
Total	23	0.378287			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.117426	27.10%	16.16%	0.00%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	1.372	0.336	4.08	0.001	
logt_JP	-0.183	0.159	-1.15	0.264	1.00
logt_PA	-0.152	0.159	-0.96	0.351	1.00
logt_f	0.706	0.309	2.28	0.034	1.00

Regression Equation

$$\text{logt_torsi} = 1.372 - 0.183 \text{ logt_JP} - 0.152 \text{ logt_PA} + 0.706 \text{ logt_f}$$

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	logt_torsi	Fit	Resid	Std Resid
15	0.1211	0.5015	-0.3804	-3.55

R Large residual

LAMPIRAN 8

Hasil Uji Statistik General Linear Model

1. Gaya Tekan

General Linear Model: Gaya Tekan Eks versus JP, PA, f

Method

Factor coding (-1, 0, +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
JP	Fixed	2	2, 35
PA	Fixed	2	118, 134
f	Fixed	2	0.07, 0.10

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
JP	1	197087	197087	7.58	0.051
PA	1	224115	224115	8.62	0.043
f	1	935940	935940	36.00	0.004
Error	4	103999	26000		
Total	7	1461142			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
161.245	92.88%	87.54%	71.53%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	2178.9	57.0	38.22	0.000	
JP					
2	157.0	57.0	2.75	0.051	1.00
PA					
118	-167.4	57.0	-2.94	0.043	1.00
f					
0.07	-342.0	57.0	-6.00	0.004	1.00

Regression Equation

$$\begin{aligned} \text{Gaya Tekan Eks} = & 2178.9 + 157.0 \text{ JP}_2 - 157.0 \text{ JP}_{35} - 167.4 \text{ PA}_{118} \\ & + 167.4 \text{ PA}_{134} \\ & - 342.0 \text{ f}_{0.07} + 342.0 \text{ f}_{0.10} \end{aligned}$$

2. Torsi

General Linear Model: tor_eks versus JP, PA, f

Method

Factor coding (-1, 0, +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
JP	Fixed	2	2, 35
PA	Fixed	2	118, 134
f	Fixed	2	0.07, 0.10

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
JP	1	0.28253	0.28253	16.49	0.015
PA	1	0.49349	0.49349	28.80	0.006
f	1	1.27723	1.27723	74.53	0.001
Error	4	0.06855	0.01714		
Total	7	2.12179			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.130909	96.77%	94.35%	87.08%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	3.7673	0.0463	81.40	0.000	
JP					
2	0.1879	0.0463	4.06	0.015	1.00
PA					
118	-0.2484	0.0463	-5.37	0.006	1.00
f					
0.07	-0.3996	0.0463	-8.63	0.001	1.00

Regression Equation

$$\text{tor_eks} = 3.7673 + 0.1879 \text{ JP}_2 - 0.1879 \text{ JP}_{35} - 0.2484 \text{ PA}_{118} + 0.2484 \text{ PA}_{134} - 0.3996 \text{ f}_{0.07} + 0.3996 \text{ f}_{0.10}$$

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen dan simulasi yang telah dilakukan, maka dari penelitian yang berjudul “Analisis Tegangan dan Temperatur pada Penggurdian Baja EMS 45 dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga,” dapat ditarik kesimpulan:

1. Tidak ada perbedaan antara besarnya gaya tekan dan torsi hasil simulasi dengan hasil eksperimen.
2. Semakin besar *feeding* dan *point angle*, maka semakin besar pula tegangan yang timbul pada pahat gurdi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan maksimum terbesar terjadi pada pahat HSS M2 dengan *point angle* sebesar 134° dan *feeding* sebesar 0.1 mm/rev, yaitu sebesar 1244 MPa.
3. Semakin besar *feeding* dan *point angle*, maka semakin besar pula temperatur yang timbul pada pahat gurdi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa temperatur maksimum terbesar terjadi pada pahat HSS M2 dengan *point angle* sebesar 134° dan *feeding* sebesar 0.1 mm/rev, yaitu sebesar 870.5 K.
4. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa tegangan maksimum pada pahat terjadi di sekitar *chisel edge* dan *cutting edge*.
5. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa temperatur maksimum pada pahat terjadi di sekitar bidang geram (*rake face*).

5.2. Saran

1. Pada penelitian ini, analisis tegangan dan temperatur penggurdian dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga (MEH). Pada penelitian selanjutnya, dapat dilakukan studi dengan metode lain agar dapat dilakukan perbandingan.
2. Eksperimen validasi pada penelitian ini hanya berupa data gaya tekan dan torsi. Untuk penelitian selanjutnya agar dilakukan eksperimen validasi untuk tegangan dan temperatur maksimum pada pahat gurdi.
3. Perlu pengetahuan mengenai MEH yang lebih mendalam agar data hasil eksperimen dan simulasi benar-benar mirip.

DAFTAR PUSTAKA

- Agapiou, J. S., M. F. DeVries., 1990, “On the Determination of Thermal Phenomena During Drilling-Parts I and II,” *Int. J. Mach. Tools Manuf*, Vol. 30, pp. 203–226.
- Armarego, E.J.A. and Cheng, C.Y., 1972, ”Drilling with flat rake face and conventional twist drills—I, Theoretical investigation,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 12, pp. 17–35.
- Armarego, E.J.A. and Cheng, C.Y., 1972, “Drilling with flat rake face and conventional twist drills—II, Experimental investigation,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 12, pp. 37–54.
- Bagci, E., 2011, “3D Numerical Analysis of Orthogonal Cutting Process Via Mesh-Free Method, “*International Journal of The Physical Sciences*, Vol. 6, pp. 1267-1282.
- Brinksmeier, E., 1990, “Prediction of Tool Fracture in Drilling, “*Institut für Fertigungstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen*.
- Bhoyar, Y., 2013, “Finite Element Analysis on Temperature Distribution in Turning Process Using Deform 3D, Vol. 2
- Duan, C. Z., T. Dou1, Y. J. Cai ., Y. Y. Li., 2009, “Finite Element Simulation and Experiment of Chip Formation Process during High Speed Machining of AISI 1045 Hardened Steel, “*International Journal of Recent Trends in Engineering*, Vol. 1, no. 5.

- Galloway, D.F., 1957, "Some Experiments on the Influence of Various Factors on Drill Performance," *Trans. A.S.M.E.* Vol. 79, pp. 191-231.
- Johnson, G.R., Cook, William. H., 1983. "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures," *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics 54*, p. 1.
- Jula, F.C., Galle., Waele. W. De., Borzan. M., 2012."FEA Modeling of orthogonal Cutting of Steel," *Sustainable Construction and Design., Vol 3, pp. 98 – 105.*
- Kalpakjian, Serope., 1984, *Manufacturing Processes For Engineering Materials*, Michigan: University of Michigan.
- Kim, K.W., Lee.W.Y., Shin. H. C., 1999, "A Finite Element Analysis for The Characteristics of Temperature and Stress in Micro-Machining Considering The Size Effect." *International Journal of Machine Tools & Manufacture., Vol. 39, pp. 1507-1524.*
- Liao, Y. S., Chen, Y. C., & Lin, H. M., 2007. "Feasibility study of the ultrasonic vibration assisted drilling of Inconel superalloy." *Int. J. Mach. Tools & Manuf.*, Vol. 47, pp. 1988-1996.
- Mackerle, J., 2003, " Finite Element Analysis and Simulation of Machining: an Addendum a Bibliography (1996-2002), " *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, pp. 103-114.
- McClain, B., Batzer. S. A., Maldonado. G. I., 2002, "A Numerical Investigation of the Rake Face Stress Distribution in Orthogonal Machining," *Journal of Materials Processing*

Technology, Vol. 123, pp. 114-119.

Mieszczak, W., Lis. K., 2010.”Temperature Modelling in Drilling Process,”*Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*.

Miller, S. F., Albert. J. S., 2007. “Thermo-Mechanical Finite Element Modeling of the Friction Drilling Process,”*Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 129, pp. 531-537.

Priyadarshini, A., Surjya. K. P., Arun. K. S., 2011, “Finite Element Modeling of Chip Formation in Orthogonal Machining,”*International Journal of Manufacturing*, Vol. 1, pp. 19 - 45.

Raof, N. F., Haron. C. H. C., Ghani, J. A., 2016, “Temperature at The Tool-chip Interface in Cryogenic and Dry Turning of AISI 4340 Using Carbide Tool,”*International Journal Simulation Model 15*, Vol. 2, pp. 201-212.

Rochim, T., 1993. *Proses Permesinan, Institut Teknologi Bandung*, Bandung.

Rochim, T., 2001. *Spesifikasi, Metrologi dan Kontrol Kualitas Geometrik, Modul 3 & 4*, Lab.Metrologi Industri, Departemen Teknik Mesin FTI - ITB, Bandung.

Rubenstein, C., 1991, “The Torque and Thrust Force in Twist Drilling—II, Comparison of Experimental Observations with Deductions from Theory,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 31, pp. 491–504.

Smart, E. F., & Trent, E. M., 1975, “International Journal Prod. Res., Vol. 3. Strenkowsky, J.S., C. C. Hsieh., A. J. Shih.,

2004, "An Analytical Finite Element Technique for Predicting Thrust Force and Torque in Drilling," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 1413-1421.

Sullivan, James F, 1988. *Technical Physics*, United States of America (USA).

Trent, E. M., 1977. *Metal Cutting*, University of Birmingham, England

Ucun, I., 2016, "3D Finite Element Modeling of Drilling Process of Al7075-T6 Alloy and Experimental Validation," *Journal of Mechanical and Technology*, Vol 30, pp. 1843-1850.

Waluyo, J., 2010, "Pengaruh Putaran Spindel Utama Mesin Bor Terhadap Keausan Pahat Bor dan Parameter Pengeboran pada Proses Pengeboran dengan Bahan Baja," *Jurnal Teknologi*, Volume 3, Nomor 2, Institut Sains & Teknologi AKPRIND.

Watson, A.R., 1985, "Drilling Model for Cutting Lip and Chisel Edge and Comparison of Experimental and Predicted Results, I—Initial Cutting Lip Model," *International Journal of Machine Tool Design and Research*, Vol. 25, pp. 347–366.

Yang, Y., Jie. S., 2009. "Finite Element Modelling and Simulating of Drilling of Titanium Alloy," *International Conference on Information and Computing Science*

Ye, G. G., S.F. Xue., W. Ma., M. Q. Jiang., Z. Ling., X. H., Thong., L. H. Dai., 2012. "Cutting AISI 1045 Steel at Very High Speed," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 56, pp. 1-9.

Zorev, N. N., 1963. "*International Research in Production Engineering*, Pittsburgh, pp. 42.

BIODATA PENULIS



Yanuar Budi Pratama lahir pada tanggal 27 Januari 1992 di Bantul, DIY. Penulis adalah sulung dari dua bersaudara, putra Bapak Budi Haryadi dan Ibu Mulyani. Penulis memulai pendidikannya pada jenjang sekolah dasar di SD Trimulyo dan lulus pada tahun 2004. Pada tahun yang sama, penulis meneruskan pendidikannya di SMP N 1 Imogiri dan lulus pada tahun 2007. Pendidikan menengah atas ditempuh selama 3 tahun di SMA N 2 Bantul dan lulus pada tahun 2010. Minat yang besar pada bidang fisika mendorong penulis untuk mendaftar di jurusan Teknik Mesin ITS dan diterima pada tahun 2010. Di jurusan Teknik Mesin ITS, penulis mengambil Bidang Studi Teknik Manufaktur.