



TESIS - TM 092501

**OPTIMASI MULTI RESPON DENGAN METODE
TAGUCHI-*GREY-FUZZY* PADA PROSES GURDI
MATERIAL *KEVLAR FIBER REINFORCED
POLYMER* (KFRP) YANG DITUMPUK**

AM. MUFARRIH
NRP 2113201003

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

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA DAN SISTEM MANUFAKTUR
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015



THESIS - TM 092501

MULTI RESPONSE OPTIMIZATION USING TAGUCHI-GREY-FUZZY METHOD IN DRILLING OF KEVLAR FIBER REINFORCED POLYMER (KFRP) STACKED

AM. MUFARRIH
NRP 2113201003

Advisor

Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.
Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.

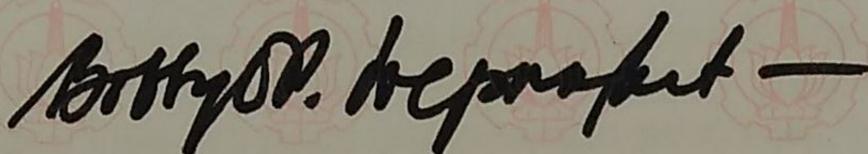
MASTER PROGRAM
FIELD STUDY OF ENGINEERING AND MANUFACTURING SYSTEM
DEPARTEMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2015

**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Oleh:
AM MUFARRIH
NRP. 2113 201 003**

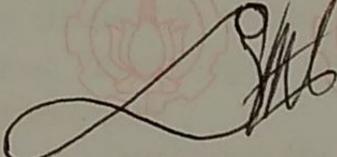
**Tanggal Ujian : 09 Juli 2015
Periode Wisuda : September 2015**

Disetujui oleh:



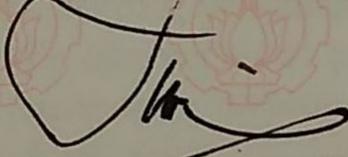
**1. Ir. Bobby O.P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.
NIP. 1953 05 16 197803 1 001**

(Pembimbing 1)



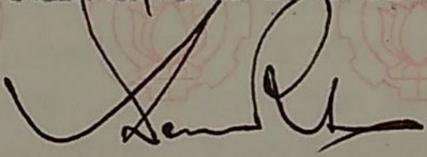
**2. Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.
NIP. 1960 06 23 198803 1 002**

(Pembimbing 2)



**3. Dr. Ir. Soeharto, DEA.
NIP. 1948 09 11 198103 1 001**

(Penguji)



**4. Ir. Winarto, DEA.
NIP. 1960 12 13 198811 1 001**

(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana,



**Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
NIP. 19640405 199002 1 001**

OPTIMASI MULTI RESPON DENGAN METODE TAGUCHI-GREY-FUZZY PADA PROSES GURDI MATERIAL *KEVLAR FIBER REINFORCED POLYMER* (KFRP) YANG DITUMPUK

Nama Mahasiswa : AM. Mufarrih
NRP : 2113201003
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Pembimbing : Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.
Co. Pembimbing : Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.

ABSTRAK

Proses gurdi pada material komposit yang ditumpuk dilakukan agar dapat mempercepat proses pembuatan lubang yang berjumlah banyak. Walaupun demikian, kebulatan dan kekasaran permukaan lubang yang digurdi tetap harus memenuhi spesifikasi yang disyaratkan. Selain itu faktor delaminasi yang biasa terjadi pada pengguridian material komposit juga harus diminimalkan. Penelitian ini dilakukan untuk menentukan pengaturan variabel proses dan geometri pahat yang tepat, agar dapat meminimalkan kekasaran permukaan, kebulatan dan delaminasi.

Penelitian ini dilakukan pada proses gurdi material *Kevlar fiber reinforced polymer* (KFRP) yang ditumpuk dua dengan tebal masing-masing *sheet* sebesar 3 mm. Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui pengaturan variabel-variabel proses dan geometri pahat yang tepat. Rancangan percobaan ditetapkan dengan menggunakan metode Taguchi yang berupa matriks ortogonal $L_{18} (2^1 \times 3^3)$ dan replikasi sebanyak dua kali. Optimasi dilakukan dengan menggunakan gabungan metode *grey relational analysis* (GRA) dan logika *fuzzy*. Variabel-variabel proses gurdi yang divariasikan adalah jenis pahat (HSS dan HSS-Cobalt), sudut ujung pahat (100° , 118° dan 140°), kecepatan makan (50 mm/menit, 115 mm/menit dan 180 mm/menit) dan kecepatan potong (47,1 m/menit, 62,8 m/menit dan 78,5 m/menit). Respon-respon yang diteliti adalah gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan, delaminasi dan kebulatan. Pahat yang digunakan adalah *twist drill* HSS dan HSS-Cobalt NACHI.

Hasil penelitian menunjukkan kontribusi dari faktor-faktor dalam mengurangi variasi dari respon yang diamati secara serentak, secara berurutan adalah kecepatan makan sebesar 50,63%, sudut ujung pahat sebesar 24,92%, kecepatan potong sebesar 9,32% dan jenis pahat sebesar 3,12%. Dari hasil optimasi yang telah divalidasi dalam eksperimen konfirmasi, didapatkan kombinasi faktor yang menghasilkan nilai respon optimal, yaitu jenis pahat HSS-Cobalt, sudut ujung pahat sebesar 100° , kecepatan makan sebesar 50 mm/menit dan kecepatan potong sebesar 62,8 m/menit.

Kata kunci: Proses gurdi, KFRP yang ditumpuk, Taguchi-grey-fuzzy

MULTI RESPONSE OPTIMIZATION USING TAGUCHI- GREY-FUZZY METHOD IN DRILLING OF KEVLAR FIBER REINFORCED POLYMER (KFRP) STACKED

Student Name : AM. Mufarrih
Student Identity Number : 2113201003
Departement : Mechanical Engineering FTI-ITS
Advisor : Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.
Co. Advisor : Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.

ABSTRACT

A research was conducted for the optimization of the drilling process of KFRP stacked, with multiple performance characteristic based on the orthogonal array with Taguchi-grey-fuzzy method. The experimental studies were conducted under varying the drilling process variables, i.e., drill type, point angle (degree), feeding speed (mm/min) and cutting speed (m/min). The optimized multiple performances characteristic were thrust force, torque, surface roughness, delamination and roundness. The quality characteristic of thrust force, torque, surface roughness, delamination and roundness were smaller-is-better. The experiment design used L_{18} orthogonal array with two replications. Experimental results have shown that machining performance in the drilling process can be improved effectively through this method. The drilling process variables which significantly affected thrust force, torque, surface roughness, delamination and roundness are feeding speed, point angle, cutting speed and drill type.

Keywords: KFRP stacked, drilling, Taguchi, grey relational analysis, fuzzy logic

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis diberi kesempatan untuk dapat menyelesaikan penyusunan Tesis ini. Tesis dengan judul **“OPTIMASI MULTI RESPON DENGAN METODE TAGUCHI-GREY-FUZZY PADA PROSES GURDI MATERIAL KEVLAR FIBER REINFORCED POLYMER (KFRP) YANG DITUMPUK”** disusun sebagai persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Rekayasa dan Sistem Manufaktur, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak atas segala bantuan dan dorongan serta dedikasinya yang telah membantu penyusunan Tesis ini hingga selesai. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D. selaku Kepala Program Studi Teknik Mesin Program Pascasarjana FTI - ITS.
2. Bapak Ir. Bobby O.P. Soepangkat, M.Sc, Ph.D. sebagai dosen pembimbing pertama.
3. Bapak Ir. Hari Subiyanto, M.Sc. sebagai dosen pembimbing kedua.
4. Bapak Dr. Ir. Soeharto, DEA. dan Bapak Ir. Winarto, DEA. sebagai dosen penguji seminar tesis.
5. Bapak Iwan Kristanto selaku *Head of Design Center Division* PT. Dirgantara Indonesia (Persero) yang telah menyumbang material Kevlar komposit yang digunakan untuk tesis ini.
6. Ibu, ayah, istriku tercinta Izzatul Yazidah, anakku tersayang Aqila Nur Assyifa serta adik-adikku yang selalu memberi dukungan, doa dan semangat.
7. Teman seperjuangan M. Abdul Wahid, Dian Ridlo P., Mega Diantoro dan Hasriadi serta teman-teman kuliah S2 Rekayasa dan Sistem Manufaktur atas segala bantuan dan dukungannya.
8. Seluruh staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin yang selalu memberi atmosfer kampus yang menyenangkan.

9. Seluruh staf dan karyawan Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Program Pascasarjana ITS.

10. Teman-teman Lab. Manufaktur Teknik Mesin-ITS.

11. Semua pihak yang telah banyak membantu penulis yang tidak dapat disebutkan satu-satu.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan Tesis ini masih banyak kekurangannya. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Akhir kata penulis berharap semoga Tesis ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi bagi kemajuan ilmu pengetahuan khususnya di bidang proses manufaktur. Aamiin.

Surabaya, 09 Juni 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL INDONESIA	i
HALAMAN JUDUL INGGRIS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.2.1 Batasan Masalah	5
1.2.1 Asumsi Penelitian	6
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Manfaat Penelitian.....	6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Tinjauan Pustaka	9
2.2 Proses Pemesinan Gurdi.....	11
2.2.1 Geometri Pahat	13
2.2.2 Gaya Pemotongan pada Proses Gurdi	14
2.2.3 Kekasaran Permukaan Benda Kerja	17
2.2.4 Kebulatan.....	21
2.2.5 Delaminasi.....	23
2.3 Material Komposit.....	25
2.3.1 Klasifikasi Material Komposit	28
2.3.2 <i>Fiber Reinforced Composite Material</i>	30
2.3.3 <i>Polymer Matrix Composite</i>	31
2.3.4 <i>Multi Directional Aramid/Epoxy</i>	32

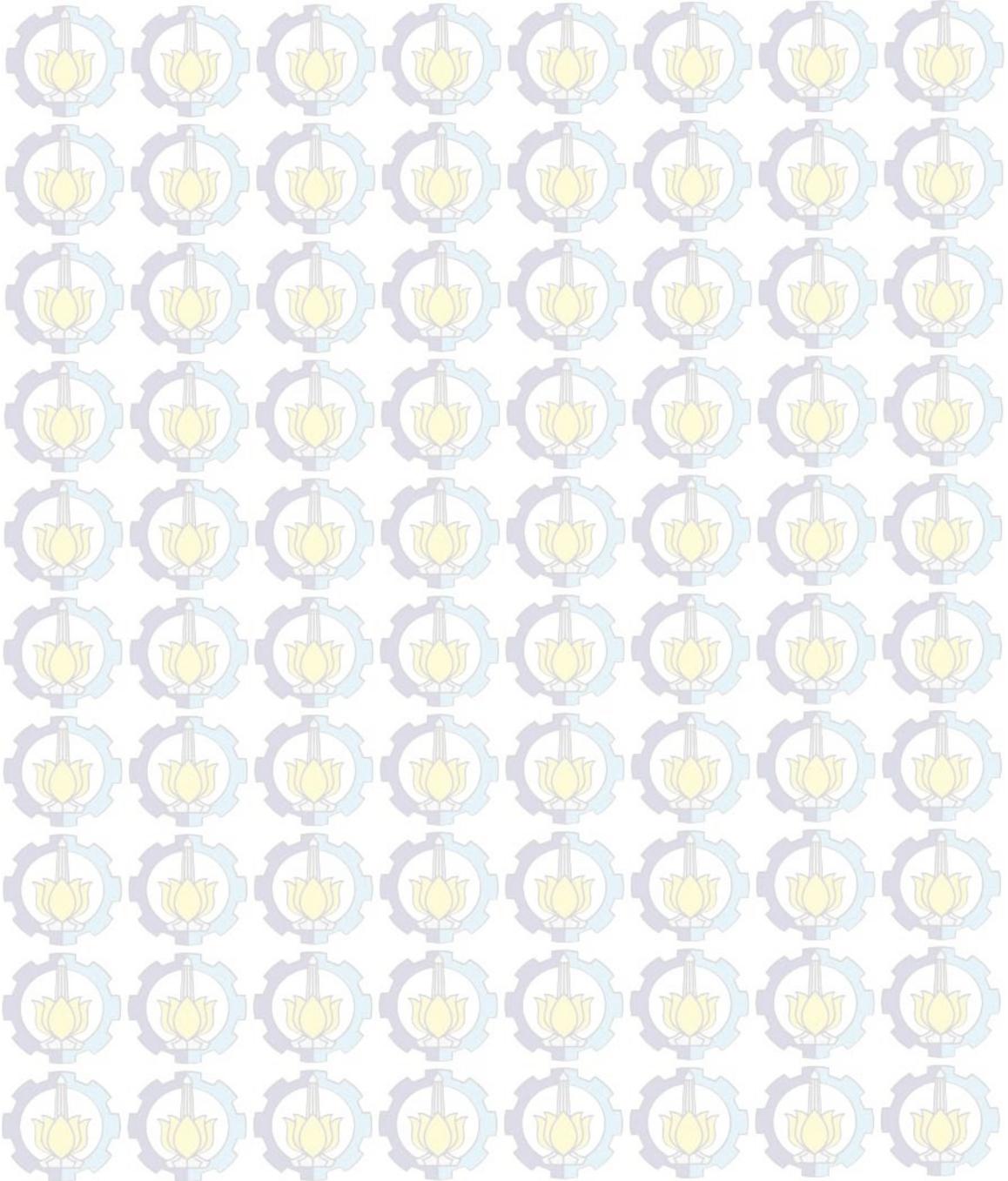
2.4 Metode Taguchi.....	33
2.4.1 Prosedur Eksperimen.....	34
2.5 Metode Taguchi- <i>Grey-Fuzzy</i>	43
2.6 Interpretasi Hasil Eksperimen	51
2.7 Eksperimen Konfirmasi.....	52
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	55
3.1 Tahapan Penelitian	55
3.2 Variabel Penelitian	57
3.3 Bahan dan Peralatan	57
3.4 Rancangan Percobaan.....	64
3.4.1 Pengaturan Variabel Proses Pada Mesin Gurdi.....	64
3.4.2 Pemilihan Matriks Ortogonal	64
3.5 Prosedur Percobaan	68
3.6 Pengukuran dan Pengambilan Data.....	69
3.6.1 Pengambilan Data Torsi Dan Gaya Tekan	69
3.6.2 Pengambilan Data Kekasaran Permukaan.....	70
3.6.3 Pengambilan Data Kebulatan	71
3.6.2 Pengambilan Data Delaminasi	71
3.7 Karakteristik Respon Optimal	72
3.8 Unit Logika <i>Fuzzy</i>	72
BAB IV OPTIMASI MULTI RESPON DAN PEMBAHASAN.....	73
4.1 Data Hasil Percobaan	73
4.2 Perhitungan Rasio S/N	75
4.3 Normalisasi Rasio S/N	76
4.4 Perhitungan <i>Grey Relational Coefficient</i>	77
4.5 <i>Fuzzification</i>	79
4.6 Penentuan <i>Fuzzy Rules</i>	80
4.7 <i>Defuzzification</i>	85
4.8 Hasil Optimasi	90
4.9 Analisa Variansi dan Persen Kontribusi.....	91
4.10 Pengujian Asumsi Residual	93
4.10.1 Uji Independen	94

4.10.2 Uji Identik.....	94
4.10.3 Uji Kenormalan	95
4.11 Prediksi Respon Optimum.....	96
4.12 Percobaan Konfirmasi	97
4.13 Pengujian Perbedaan Respon Hasil Kombinasi Awal dan Hasil Kombinasi Optimum.....	100
4.14 Perbandingan antara Respon Hasil Kombinasi Awal dan Kombinasi Optimum	103
4.15 Pembahasan	106
4.15.1 Pengaruh Variabel-variabel Proses Terhadap Multi Respon	106
4.15.2 Pengaruh Variabel-variabel Proses Terhadap Respon Individu.....	106
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	111
5.1 Kesimpulan.....	111
5.2 Saran.....	111
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Proses menggurdi	11
Gambar 2.2	Mesin gurdi.....	12
Gambar 2.3	Geometri pahat gurdi.....	13
Gambar 2.4	Lingkar Merchant	14
Gambar 2.5	Gaya pemotongan pada proses gurdi.....	16
Gambar 2.6	Penyimpangan rata-rata aritmetika	18
Gambar 2.7	Toleransi untuk geometri kebulatan.....	21
Gambar 2.8	Grafik polar dari empat jenis lingkaran referensi	22
Gambar 2.9	Skema delaminasi pada komposit laminat.....	24
Gambar 2.10	Ilustrasi dari skema pengukuran factor delaminasi.....	24
Gambar 2.11	Komposisi	25
Gambar 2.12	Diagram uji tarik pada FRP komposit.....	27
Gambar 2.13	Klasifikasi komposit berdasarkan matriksnya	29
Gambar 2.14	Klasifikasi komposit berdasarkan strukturnya.....	30
Gambar 2.15	Langkah-langkah optimasi Taguchi-grey-fuzzy.....	44
Gambar 2.16	Fungsi keanggotaan kurva segitiga	48
Gambar 2.17	Fungsi keanggotaan kurva trapesium.....	48
Gambar 3.1	Diagram alir metodologi penelitian	55
Gambar 3.2	Benda kerja KFRP.....	58
Gambar 3.3	Pahat <i>twist drill</i> HSS dan HSS-Cobalt.....	58
Gambar 3.4	Mesin CNC YCM MV 86A	59
Gambar 3.5	Dinamometer tipe 9272	60
Gambar 3.6	Akuisisi data tipe 5697 A	60
Gambar 3.7	<i>Charge amplifier</i>	61
Gambar 3.8	<i>Notebook</i> Compaq Presario	61
Gambar 3.9	<i>Roundtest</i> Roncoder EC 3D.....	62
Gambar 3.10	Mitutoyo <i>surftest</i> SJ 310.....	62
Gambar 3.11	Kamera digital Sony.....	63
Gambar 3.12	Mistar ingsut Mitutoyo	63
Gambar 3.13	<i>Drill resharpening grinder</i>	64
Gambar 3.14	Skema proses penggurdiran benda kerja	67
Gambar 3.15	Panjang penggurdiran benda kerja	67
Gambar 3.16	Grafik pengukuran gaya dan torsi.....	69
Gambar 3.17	Panjang ujung pahat	70
Gambar 4.1	Fungsi keanggotaan untuk F_z , M_z , R_a , DL dan KB	79

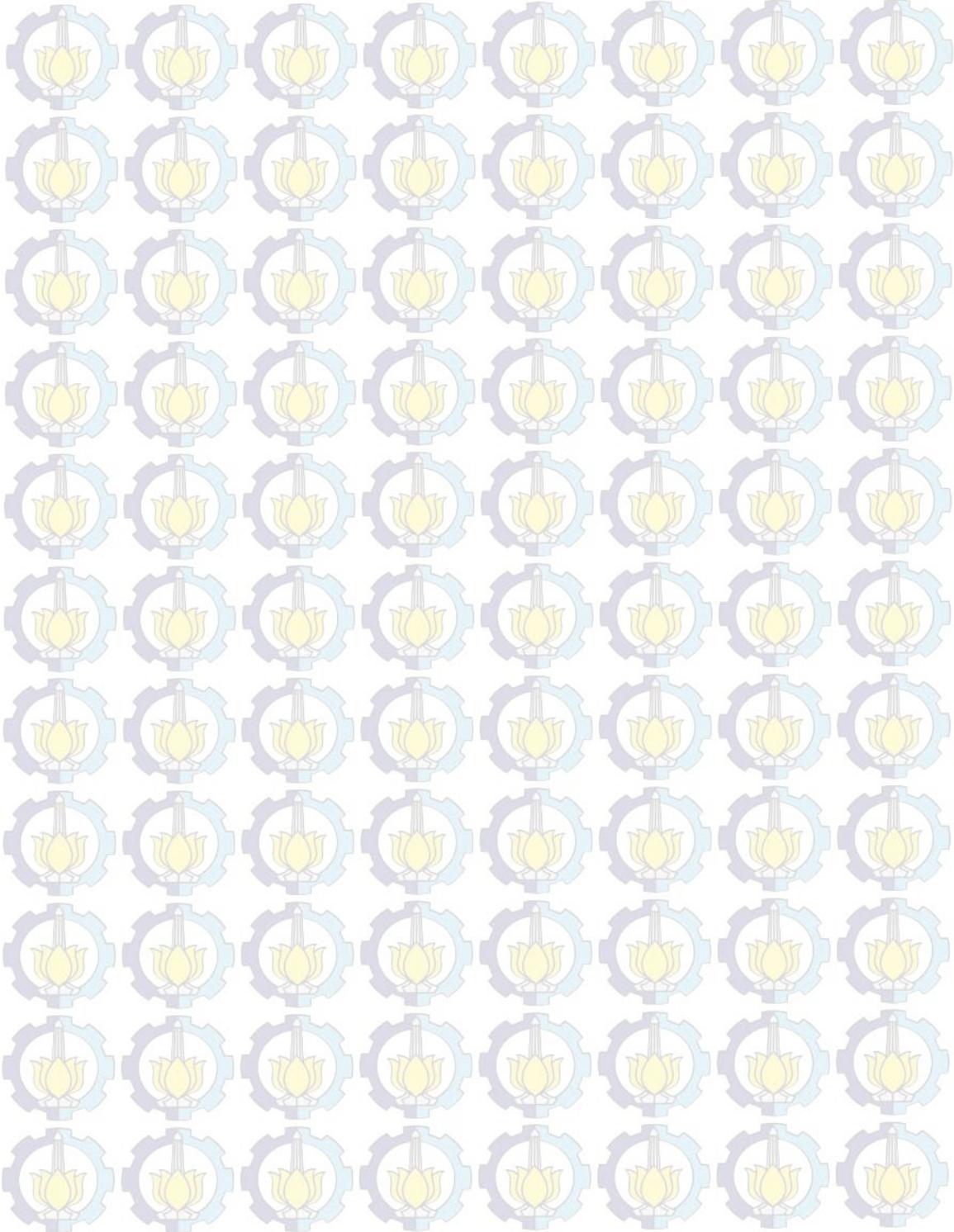
Gambar 4.2	Fungsi keanggotaan <i>grey fuzzy reasoning grade</i> (GFRG)	80
Gambar 4.3	Ilustrasi <i>fuzzy rules</i>	86
Gambar 4.4	Plot nilai GFRG masing-masing level variabel proses.....	91
Gambar 4.5	Plot ACF.....	94
Gambar 4.6	Plot <i>residual versus observation order</i>	95
Gambar 4.7	Plot uji distribusi normal	96
Gambar 4.8	Plot rata-rata percobaan konfirmasi dan interval keyakinan prediksi.....	99

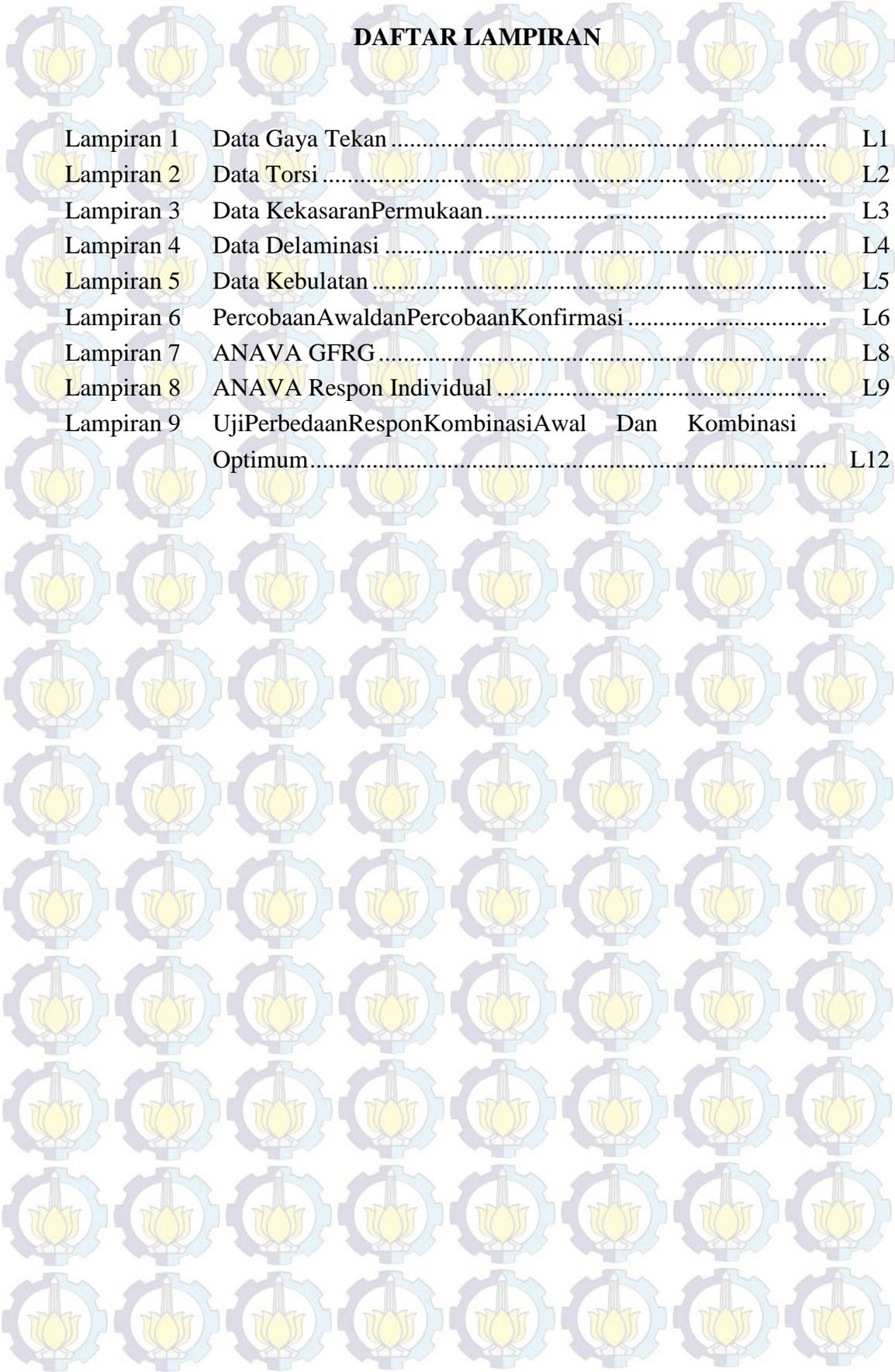


DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Nilai kekasaran dan tingkat kekasaran	19
Tabel 2.2	Nilai kekasaran yang dicapai oleh beberapa pengerjaan	20
Tabel 2.3	Sifat-sifat mekanik dari bahan serat fiber dan <i>wire</i>	31
Tabel 2.4	Perbandingan properti komposit.....	32
Tabel 2.5	Sifat fisik/mekanik material komposit aramid/ <i>epoxy</i>	33
Tabel 2.6	Matriks ortogonal standar untuk L_{18}	37
Tabel 2.7	Analisis variansi	39
Tabel 2.8	Penempatan Rasio S/N	45
Tabel 2.9	Tabel respon <i>grey fuzzy reasoning grade</i>	50
Tabel 3.1	Variabel proses dan pengaturan level.....	64
Tabel 3.2	Total derajat kebebasan faktor dan level.....	65
Tabel 3.3	Rancangan percobaan Taguchi.....	66
Tabel 3.4	Tampilan data hasil eksperimen	66
Tabel 4.1	Data hasil percobaan.....	74
Tabel 4.2	Data rasio S/N.....	75
Tabel 4.3	Data normalisasi rasio S/N	76
Tabel 4.4	<i>Deviation sequence</i>	78
Tabel 4.5	<i>Grey relational coefficient</i>	78
Tabel 4.6	<i>Fuzzy rules</i>	81
Tabel 4.7	<i>Grey fuzzy reasoning grade</i> (GFRG)	90
Tabel 4.8	Rata-rata nilai GFRG pada masing-masing level.....	90
Tabel 4.9	Kombinasi variabel proses respon optimum	91
Tabel 4.10	ANOVA dan kontribusi GFRG	93
Tabel 4.11	Kondisi hipotesis nol multi respon	93
Tabel 4.12	Hasil respon percobaan konfirmasi pada kombinasi optimum.....	98
Tabel 4.13	Rasio S/N percobaan konfirmasi kombinasi optimum.....	98
Tabel 4.14	GFRG percobaan konfirmasi untuk kombinasi optimum	98
Tabel 4.15	Hasil uji kenormalan data pada kombinasi awal	101
Tabel 4.16	Hasil uji kenormalan data pada kombinasi optimum	101
Tabel 4.17	Hasil uji kesamaan variansi	102
Tabel 4.18	Hasil uji kesamaan rata-rata	102
Tabel 4.19	Pengaturan level kombinasi awal	103
Tabel 4.20	Perbandingan respon hasil kombinasi awal dan respon hasil kombinasi optimum	104

Tabel 4.21	Rasio S/N kombinasi awal.....	104
Tabel 4.22	Perbandingan GFRG kondisi awal dan kondisi optimum.....	105
Tabel 4.23	Perbandingan respon individu pada kondisi awal dan kondisi optimum.....	105
Tabel 4.24	Persen kontribusi faktor terhadap respon individu.....	107





DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Data Gaya Tekan	L1
Lampiran 2	Data Torsi	L2
Lampiran 3	Data KekasaranPermukaan.....	L3
Lampiran 4	Data Delaminasi	L4
Lampiran 5	Data Kebulatan	L5
Lampiran 6	PercobaanAwaldanPercobaanKonfirmasi	L6
Lampiran 7	ANAVA GFRG	L8
Lampiran 8	ANAVA Respon Individual	L9
Lampiran 9	UjiPerbedaanResponKombinasiAwal Dan Kombinasi Optimum.....	L12



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses gurdi merupakan proses pembuatan lubang silindris pada benda kerja untuk proses perakitan antara suatu komponen dengan komponen yang lainnya. Pembuatan lubang termasuk salah satu proses paling penting di bidang manufaktur. Biaya pemesinan terbesar dalam industri otomotif ialah biaya untuk pembuatan lubang (Kalpakjian, 2009). Komponen yang banyak digunakan di industri serta membutuhkan banyak lubang untuk proses perakitan salah satunya adalah komponen dari material komposit. Material komposit dipilih karena memiliki karakteristik tersendiri yang tak dimiliki oleh material konvensional lainnya.

Kevlar fiber reinforced polymer (KFRP) atau juga sering disebut *aramid fiber reinforced polymer* (AFRP) adalah salah satu jenis komposit yang memiliki sifat-sifat sebagai berikut (Zheng dkk., 2012): gaya tarik yang tinggi, kekerasan yang tinggi, kepadatan yang rendah, tahan panas, tahan terhadap bahan kimia, struktur yang kuat dan ringan bahkan lima kali lebih kuat dibandingkan besi serta tahan terhadap korosi. KFRP biasanya digunakan di industri otomotif, industri tangki, pesawat terbang, peralatan militer dan pesawat antariksa.

Kinerja dari proses gurdi pada material komposit dapat diukur berdasarkan beberapa karakteristik kualitas seperti kekasaran permukaan, keausan tepi pahat dan *burr height*. Selain itu, gaya tekan, torsi dan delaminasi yang terjadi pada lubang hasil penggurdian juga dapat digunakan untuk mengukur kinerja proses gurdi pada material komposit (Nagaraja dkk., 2013). Kinerja yang diukur juga biasa disebut sebagai respon yang merupakan fungsi dari variabel-variabel proses atau faktor. Variabel-variabel proses yang mempengaruhi kinerja dari proses gurdi adalah jenis pahat, kecepatan potong, gerak makan dan sudut ujung pahat (*point angle*).

Pada penggurdian material komposit terdapat beberapa masalah yang timbul, diantaranya adalah *fiber pullout*, *matrix cratering*, *thermal damage* dan



delaminasi. Kesalahan pemilihan parameter proses pemesinan merupakan penyebab dari timbulnya masalah tersebut (Vankanti dan Ganta, 2013). Dari beberapa masalah pada penggurdian material komposit, delaminasi menjadi masalah utama yang paling sering timbul. Delaminasi yang timbul pada sisi masuk (*peel-up*) dan sisi keluar (*push-out*) akan mempengaruhi kualitas lubang hasil penggurdian. Penyebab timbulnya delaminasi pada lubang hasil penggurdian adalah anisotropi dan heterogenitas material komposit yang tersusun dari fasa penguat yang bersifat keras dan matriks yang bersifat lunak (Palanikumar, 2011). Pada saat proses penggurdian dilakukan kedua fasa penyusun tersebut memiliki perilaku yang berbeda dibandingkan dengan sifat masing-masing material saat terpisah satu sama lain (Palanikumar dkk., 2008). Penyebab lain dari delaminasi, selain karakteristik material adalah geometri pahat dan parameter proses pemesinan yang digunakan (Kilickap, 2010). Oleh karena itu, delaminasi menjadi faktor yang sangat penting untuk diminimalkan guna menghasilkan kualitas lubang yang baik.

Pada industri pesawat terbang penggurdian material komposit, paduan titanium maupun paduan aluminium dilakukan dengan cara menumpuk material dan digurdi secara bersamaan. Hal ini dilakukan agar dapat mempercepat proses pembuatan lubang yang berjumlah banyak, mengefisienkan biaya produksi dan mengurangi konsumsi daya (Jie, 2013). Walaupun demikian, kualitas lubang yang baik seperti kebulatan dan kekasaran permukaan lubang tetap harus diperhatikan agar dapat memenuhi spesifikasi yang disyaratkan. Kualitas lubang yang buruk akibat delaminasi akan berpengaruh pada kekuatan sambungan sehingga mempengaruhi struktur mekanis secara keseluruhan. Pengaturan variabel-variabel proses yang tepat serta geometri pahat yang sesuai akan mampu mengurangi kerusakan yang timbul pada penggurdian material komposit seperti delaminasi.

Variabel proses pemesinan biasanya dipilih berdasarkan material benda kerja, material pahat dan geometri pahat. Optimasi kondisi pemesinan akan meningkatkan kualitas produk dan produktifitas kerja. Penentuan kombinasi variabel proses pemesinan dengan menggunakan optimasi secara serentak dari beberapa respon cukup sulit dilakukan, karena harus melakukan rangkaian percobaan yang berjumlah besar dan kompleks. Beberapa metode yang dapat



digunakan untuk melakukan optimasi pada proses pemesinan adalah metode Taguchi, *respon surface methodology* (RSM) dan *iterative mathematical search technique* (Mukherjee dan Pradip, 2006). Metode Taguchi biasa digunakan untuk melakukan optimasi proses pada satu respon saja, agar dapat digunakan untuk optimasi multi respon secara serentak, metode Taguchi perlu dikolaborasikan dengan metode optimasi yang lain, seperti *utility*, TOPSIS, *grey relational analysis* (GRA), *fuzzy logic*, *weighted principal components analysis* (WPCA), dan metode optimasi lainnya.

Studi tentang pengoptimasian gaya tekan, torsi, *entry delamination*, *exit delamination* dan kesilindrisan lubang telah dilakukan pada proses gurdi dengan menggunakan metode Taguchi *grey fuzzy*. Faktor yang divariasikan adalah kecepatan spindel, sudut ujung pahat dan gerak makan (Khrisnamoorthy dkk., 2012). Benda kerja dan pahat yang digunakan adalah *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) dan HSS berdiameter 6 mm. Rancangan percobaan yang digunakan adalah *orthogonal array* L₂₇. Pada penelitian ini nilai *distinguishing coefficient* yang digunakan sebesar 0,5. ANAVA digunakan dalam perhitungan persen kontribusi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor yang memiliki prosentase kontribusi terbesar terhadap total variasi dari respon yang diamati secara serentak berturut-turut adalah gerak makan, kecepatan spindel dan sudut ujung pahat. Gerak makan memiliki kontribusi sebesar 42,19%, kecepatan spindel memiliki kontribusi sebesar 19,05% dan sudut ujung pahat memiliki kontribusi sebesar 14,18% terhadap total variasi dari respon.

Penelitian yang membahas masalah optimasi pada proses gurdi terhadap respon kekasaran permukaan dan *burr height* juga telah dilakukan. Faktor atau parameter proses gurdi yang diteliti adalah jenis pahat, kecepatan potong, gerak makan dan sudut ujung pahat. Masing-masing faktor yang diteliti memiliki tiga level (Tosun, 2006). Benda kerja yang digurdi ialah baja AISI 4140. Pahat yang digunakan adalah *twist drill* berdiameter 5 mm dengan tiga jenis material pahat yang berbeda, yaitu HSS, *carbide*, dan *TiN coated*. Rancangan percobaan yang digunakan ialah matriks ortogonal L₉ dan GRA sebagai metode lanjutan untuk melakukan optimasi multirespon. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimal untuk respon kekasaran permukaan dan *burr height* secara serentak dapat



dicapai oleh proses penggurdian dengan menggunakan pahat karbida pada putaran 1800 rpm, gerak makan 0.1 mm/rev dan sudut ujung pahat 118°.

Studi tentang optimasi gaya tekan, delaminasi dan kekasaran permukaan telah dilakukan pada proses gurdi dengan menggunakan metode Taguchi dan *desirability function* (Vesudevan dkk., 2014). Faktor yang divariasikan adalah kecepatan spindel, gerak makan, ketebalan material dan diameter pahat. Benda kerja dan pahat yang digunakan adalah GFRP NEMA G11 dan *tungsten carbide* yang dilapisi *titanium*. Rancangan percobaan yang digunakan adalah matriks ortogonal L₂₇ dan *desirability function* sebagai metode lanjutan untuk melakukan optimasi multirespon. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa kondisi optimal untuk respon gaya tekan, delaminasi dan kekasaran permukaan secara serentak dapat diperoleh pada kecepatan spindel sebesar 1200 rpm, gerak makan sebesar 75 mm/min, material setebal 8 mm dan diameter pahat gurdi sebesar 8 mm.

Park dkk. (2012) melakukan penelitian yang membahas proses penggurdian pada material komposit yang ditumpuk. Material yang digurdi dengan cara ditumpuk adalah *carbon fiber reinforced plastics* (CFRP) dan *titanium*. Pahat yang digunakan adalah *uncoated tungsten carbide* and *boron aluminum magnesium* (BAM). Kondisi penggurdian yang diberlakukan ialah kecepatan potong saat menggurdi CFRP sebesar 2000 rpm dan 6000 rpm, ketika menggurdi *titanium* kecepatan potong dikurangi menjadi 400 rpm dan 800 rpm untuk menghindari kerusakan pahat. Gerak makan dipertahankan konstan sebesar 0,051 mm/putaran dan selalu menggunakan cairan pendingin selama proses penggurdian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pahat BAM lebih efektif untuk menggurdi CFRP/*titanium* yang ditumpuk pada kecepatan potong tinggi dibandingkan dengan menggunakan pahat *uncoated tungsten carbide*.

Berdasarkan hal-hal yang telah dipaparkan, perlu dilakukan penelitian tentang penentuan pengaturan jenis pahat, sudut ujung pahat, kecepatan makan dan kecepatan potong pada proses gurdi untuk material komposit yang ditumpuk agar dapat menghasilkan gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan, kebulatan dan delaminasi yang minimal. Rancangan percobaan menggunakan *orthogonal array* L₁₈. Metode optimasi multi respon yang akan digunakan adalah *grey relational*



analysis dan logika *fuzzy*. Material yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah *Kevlar fiber reinforced polymer* (KFRP).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan permasalahan yang dapat ditetapkan berdasarkan latar belakang adalah sebagai berikut:

1. Apakah jenis pahat, sudut ujung pahat, kecepatan makan dan kecepatan potong memiliki kontribusi dalam mengurangi variasi respon gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan, kebulatan dan delaminasi yang diamati secara serentak pada pengurdian material KFRP yang ditumpuk.
2. Bagaimana kombinasi yang tepat dari jenis pahat, sudut ujung pahat, kecepatan makan dan kecepatan potong tersebut pada pengurdian material KFRP yang ditumpuk, agar dapat meminimalkan gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan, kebulatan dan delaminasi.

1.2.1 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diberlakukan agar penelitian dapat berjalan secara fokus dan terarah, serta dapat mencapai tujuan yang diinginkan adalah sebagai berikut:

1. Tidak membahas getaran pada proses pengurdian.
2. Tidak membahas komponen biaya pada proses pengurdian.
3. Proses pengurdian menggunakan mesin freis CNC YCM MV 86A.
4. Tidak membahas sistem kontrol, sistem elektronika dan pemrograman CNC yang digunakan pada proses pengurdian.
5. Pahat gudi yang digunakan adalah jenis *twist drill* HSS dan HSS-Cobalt.
6. Material yang digunakan adalah KFRP yang ditumpuk dua dengan tebal masing-masing *sheet* sebesar 3 mm.
7. Dinamometer yang digunakan adalah KISTLER tipe 9272.
8. Tidak membahas sistem kontrol, sistem elektronika dan pemrograman CNC yang digunakan pada proses pemesinan.



1.2.2 Asumsi Penelitian

Asumsi-asumsi yang diberlakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Variabel-variabel proses yang tidak diteliti dianggap konstan dan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap hasil penelitian.
2. Faktor interaksi tidak digunakan dalam penelitian ini.
3. Sifat mekanik dan komposisi kimia material yang digunakan adalah homogen.
4. Mesin bekerja dalam kondisi baik selama proses pemesinan.
5. Alat ukur yang digunakan selama proses pemesinan layak dan terkalibrasi.
6. Kondisi benda kerja dalam keadaan *rigid* dan tidak bergerak pada saat penggurdian dengan adanya pemasangan klem.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini berdasarkan rumusan masalah yang telah ditetapkan adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui besarnya kontribusi jenis pahat, sudut ujung pahat, kecepatan makan dan kecepatan potong dalam mengurangi variasi respon gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan, kebulatan dan delaminasi yang diamati secara serentak pada penggurdian material KFRP yang ditumpuk.
2. Menentukan kombinasi jenis pahat, sudut ujung pahat, kecepatan makan dan kecepatan potong yang tepat untuk menghasilkan respon yang optimum pada penggurdian material KFRP yang ditumpuk, agar dapat meminimalkan gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan, kebulatan dan delaminasi.

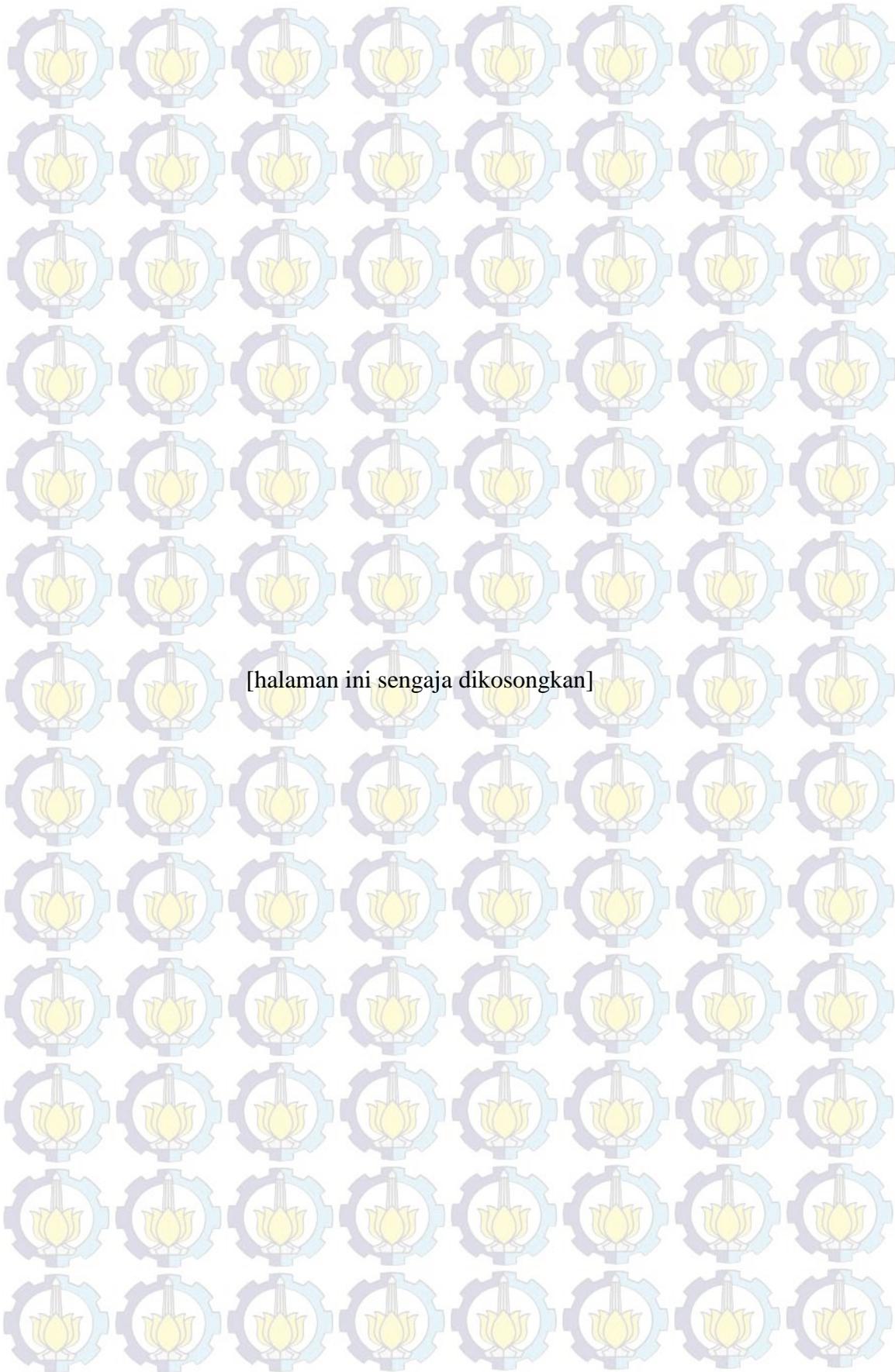
1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sebagai bahan referensi bagi penelitian sejenisnya dalam rangka pengembangan pengetahuan tentang optimasi gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan, kebulatan dan delaminasi pada penggurdian material KFRP yang ditumpuk.



2. Menyempurnakan penelitian-penelitian terdahulu yang mengangkat masalah tentang optimasi gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan, kebulatan dan delaminasi pada proses gurdi.
3. Menambah database tentang variabel-variabel proses pada proses gurdi untuk meminimalkan gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan, kebulatan dan delaminasi sehingga produktifitas kerja dan kualitas produk bisa ditingkatkan.



[halaman ini sengaja dikosongkan]



BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Pemotongan logam merupakan salah satu proses manufaktur yang paling banyak digunakan. Saat ini teknologi pemotongan logam semakin maju seiring dengan perkembangan ilmu material. Prinsip dasar proses pemotongan logam yaitu membuang material dari permukaan benda kerja untuk mencapai bentuk yang diinginkan dengan menggunakan alat potong yang tajam. Jenis yang paling umum dari proses pemotongan logam adalah proses gurdi, bubut dan frais. Proses gurdi merupakan proses pembuatan lubang silindris pada benda kerja untuk proses perakitan antara suatu komponen dengan komponen yang lainnya (Kalpakjian, 1997).

Hansda dkk. (2014) melakukan penelitian tentang optimasi pada proses gurdi dengan material GFRP. Faktor yang diteliti adalah tebal material (8 mm, 12 mm dan 16 mm), diameter pahat (10 mm, 12 mm dan 14 mm), kecepatan spindel (400 rpm, 800 rpm dan 1100 rpm) dan gerak makan (0,1 mm/putaran, 0,175 mm/putaran dan 0,275 mm/putaran). Respon yang dioptimasi adalah kekasaran permukaan dan delaminasi. Rancangan percobaan berupa matriks orthogonal L_9 dan *Utility concept* digunakan sebagai metode optimasi multi respon. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimum untuk respon kekasaran permukaan dan delaminasi secara serentak dapat dicapai oleh proses pengguridian dengan tebal material sebesar 8 mm, diameter pahat sebesar 10 mm, kecepatan spindel sebesar 800 rpm dan gerak makan sebesar 0,1 mm/putaran.

Khrisnamoorthy dkk. (2012) melakukan studi tentang optimasi pada proses gurdi dengan material *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP). Faktor yang divariasikan adalah kecepatan spindel (1000 rpm, 2000 rpm dan 3000 rpm), sudut ujung pahat (100° , 118° dan 135°) dan gerak makan (100 mm/menit, 300 mm/menit dan 500 mm/menit). Respon yang dioptimasi adalah gaya tekan, torsi, *entry delamination*, *exit delamination* dan kesilindrisan lubang. Rancangan percobaan berupa matriks orthogonal L_{27} dan metode Taguchi *grey fuzzy* digunakan sebagai metode optimasi multi respon. Pahat yang digunakan adalah



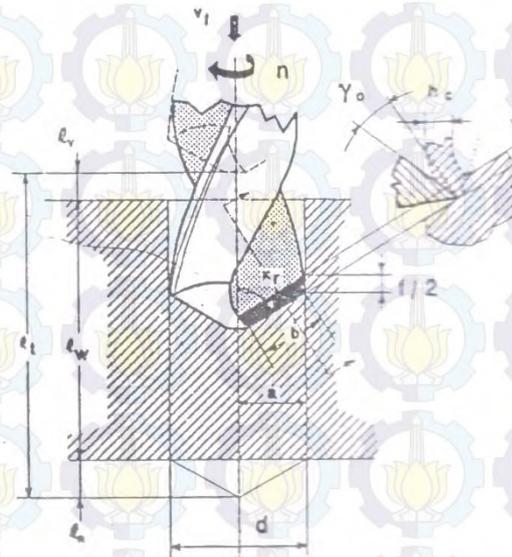
twist drill HSS berdiameter 6 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimum untuk respon gaya tekan, torsi, *entry delamination*, *exit delamination* dan kesilindrisan lubang secara serentak dapat dicapai pada kecepatan spindle sebesar 3000 rpm, sudut ujung pahat sebesar 100° dan gerak makan sebesar 100 mm/menit. Faktor yang memiliki persen kontribusi terbesar terhadap total variasi dari respon yang diamati secara serentak berturut-turut adalah gerak makan memiliki kontribusi sebesar 42,19%, kecepatan spindle memiliki kontribusi sebesar 19,05% dan sudut ujung pahat memiliki kontribusi sebesar 14,18% terhadap total variasi dari respon.

Vankanti dkk. (2014) melakukan penelitian tentang optimasi parameter proses gudi pada material GFRP. Rancangan berupa matriks orthogonal L_9 dan ANOVA digunakan untuk menganalisis masing-masing respon yang diamati secara individu. Parameter proses yang divariasikan adalah kecepatan spindle (500 rpm, 1000 rpm dan 1500 rpm), gerak makan (0,02 mm/putaran, 0,04 mm/putaran dan 0,06 mm/putaran), sudut ujung pahat (85° , 90° dan 95°) dan *chisel edge* (0,8 mm, 1,3 mm dan 1,6 mm). Respon yang diteliti adalah gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan dan kesilindrisan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter proses yang optimum untuk respon gaya tekan adalah kecepatan spindle sebesar 500 rpm, gerak makan sebesar 0,04 mm/putaran, sudut ujung pahat sebesar 90° dan *chisel edge* sebesar 0,8 mm. Parameter proses yang optimum untuk respon torsi adalah kecepatan spindle sebesar 500 rpm, gerak makan sebesar 0,06 mm/putaran, sudut ujung pahat sebesar 95° dan *chisel edge* sebesar 1,6 mm. Parameter proses yang optimum untuk respon kekasaran permukaan adalah kecepatan spindle sebesar 500 rpm, gerak makan sebesar 0,04 mm/putaran, sudut ujung pahat sebesar 95° dan *chisel edge* sebesar 0,8 mm. Parameter proses yang optimum untuk respon kesilindrisan adalah kecepatan spindle sebesar 1500 rpm, gerak makan sebesar 0,06 mm/putaran, sudut ujung pahat sebesar 95° dan *chisel edge* sebesar 0,8 mm. Hasil ANOVA menunjukkan bahwa parameter proses yang paling berpengaruh terhadap respon gaya tekan, torsi dan kekasaran permukaan adalah gerak makan dan kecepatan spindle, sedangkan parameter proses yang paling berpengaruh terhadap respon kesilindrisan adalah kecepatan spindle dan *chisel edge*.



2.2 Proses Pemesinan Gurdi

Proses gurdi (*drilling*) adalah proses pembuatan lubang silindris (*cylindrical hole*) pada benda kerja dengan menggunakan pahat gurdi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1. 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 (*chip*).



Gambar 2.1 Proses menggurdi (Rochim, 1993)

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

A. Pahat

a. Kecepatan potong

$$v = \frac{\pi dn}{1000} \quad (\text{m/menit}) \quad (2.1)$$

b. Gerak makan per mata potong

$$f_z = \frac{v_f}{nz} \quad (\text{mm/putaran}) \quad (2.2)$$

c. Kedalaman potong

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

d. Kecepatan penghasilan geram

$$Z = \frac{\pi d^2 v_f}{4 \cdot 1000} \quad (\text{cm}^3/\text{menit}) \quad (2.4)$$



Dengan:

d = diameter pahat potong

z = jumlah mata potong

V_f = kecepatan makan

K_r = sudut potong utama

B. Benda kerja

$$L_t = L_v + L_w + L_n \text{ (mm)} \quad (2.5)$$

Dengan:

L_t = panjang total langkah penggurdian (mm)

L_v = panjang langkah awal penggurdian (mm)

L_w = panjang penggurdian benda kerja (mm)

L_n = panjang langkah akhir penggurdian (mm)

$$L_n \geq \frac{(d/2)}{\tan K_r} \text{ (mm)} \quad (2.6)$$

C. Mesin perkakas gurdi

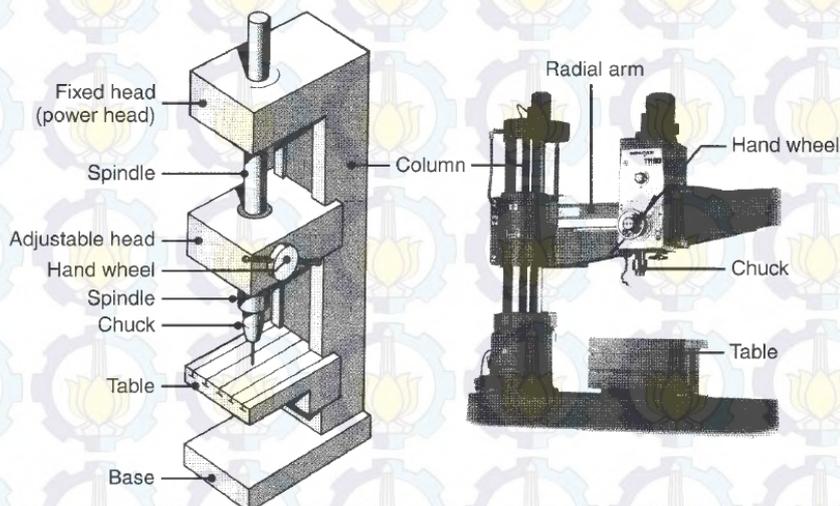
a. Putaran poros utama mesin

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi d} \text{ (putaran/menit)} \quad (2.7)$$

b. Waktu pemotongan

$$t_c = \frac{L_t}{V_f} \text{ (menit)} \quad (2.8)$$

Salah satu contoh struktur mesin gurdi ditunjukkan pada Gambar 2.2.

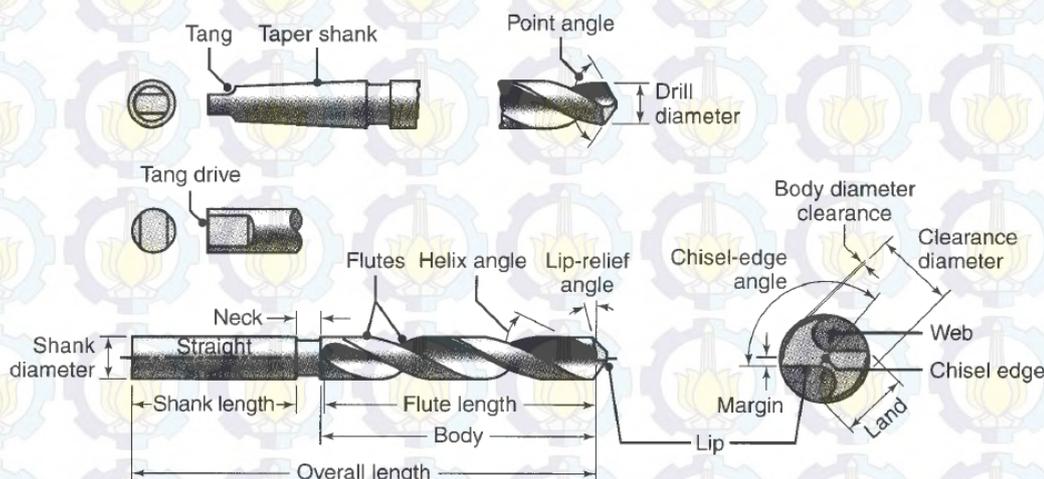


Gambar 2.2 Mesin gurdi (Kalpakjian dan Schmid, 2009)



2.2.1 Geometri Pahat

Pahat gurdi merupakan sebuah pahat pemotong yang ujungnya berputar dan memiliki sisi potong dan jalur yang berhubungan secara berkesinambungan di sepanjang badan pahat gurdi. Jalur dapat berbentuk lurus atau *helix*, yang disediakan untuk memungkinkan lewatnya geram dan fluida pendingin. Pada proses gurdi terdapat berbagai macam tipe pahat yang bisa digunakan. Tipe pahat yang dipakai tergantung dari lubang yang akan dibuat. Sebagian besar dari proses gurdi dilakukan dengan menggunakan pahat gurdi berjenis *twist drill*. Nama-nama bagian pahat ditunjukkan pada Gambar 2.3. Di antara bagian-bagian pahat tersebut yang paling utama adalah sudut *helix* (*helix angle*), sudut ujung /sudut potong utama (*point angle/lip angle*) dan sudut bebas (*clearance angle*).



Gambar 2.3 Geometri pahat gurdi (*twist drill*) (Kalpakjian dan Schmid, 2009)

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, ukuran diameter dan geometri pahatnya .

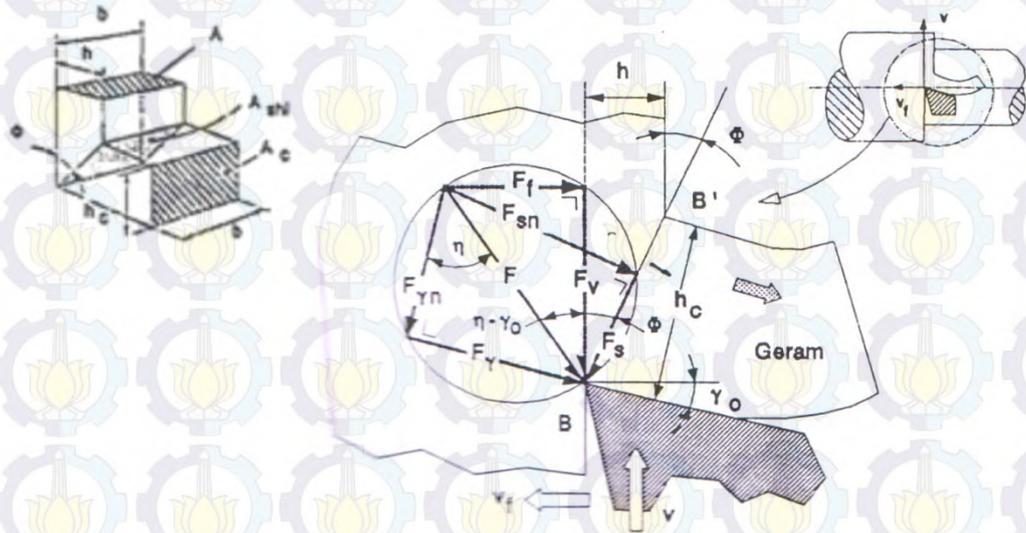
Berdasarkan jenis tangkainya, *twist drill* dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

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



2.2.2 Gaya Pemotongan pada Proses Gurdi

Gaya Pemotongan pada proses gurdi 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 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 2.4 menunjukkan pembentukan geram akibat tegangan geser yang dilakukan pahat terhadap benda kerja yang diambil dari lingkaran Merchant.



Gambar 2.4 Lingkaran gaya pemotongan (Lingkaran Merchant) (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 pemotongan seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.4, persamaan dari gaya potong teoritik F_v adalah (Rochim, 1993):



$$F_v = \frac{F_s \cos(\eta - \gamma_0)}{\cos(\phi + \eta - \gamma_0)} \text{ (N)} \quad (2.9)$$

Dengan:

$$F_v = F \cos(\eta - \gamma_0) \quad (2.10)$$

$$F_s = F \cos(\phi + \eta - \gamma_0) \quad (2.11)$$

γ_0 = sudut geram

η = sudut gesek

ϕ = sudut geser

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 (Rochim, 1993):

$$F_s = A_{shi} \tau_{shi} \text{ (N)} \quad (2.12)$$

Dengan:

$$A_{shi} = A / \sin \phi = \text{penampang bidang geser (mm}^2\text{)} \quad (2.13)$$

Luas pemotongan adalah:

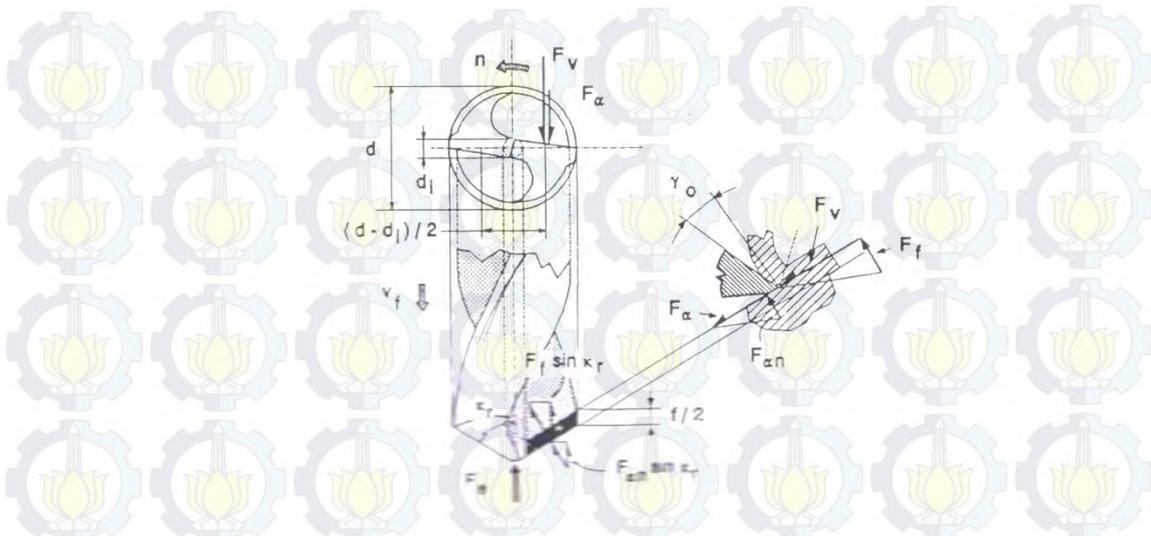
$$A = \frac{d - d_i}{2} \cdot \frac{f}{2} \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2.14)$$

Dengan demikian gaya potong dapat dirumuskan sebagai:

$$F_v = \tau_{shi} A \frac{\cos(\eta - \gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi + \eta - \gamma_0)} \text{ (N)} \quad (2.15)$$

$$F_v = \tau_{shi} \cdot b \cdot h \cdot \frac{f}{2} \cdot \frac{\cos(\eta - \gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi + \eta - \gamma_0)} \text{ (N)} \quad (2.16)$$

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 2.5. 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.



Gambar 2.5 Gaya pemotongan pada proses gurdi (Rochim, 1993)

Berdasarkan Gambar 2.5, dapat diturunkan persamaan gaya tangensial, yaitu:

$$F_t = F_v + F_\alpha \quad (\text{N}) \quad (2.17)$$

F_α 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:

$$F_\alpha = K_f \frac{d-d_i}{2 \sin K_r} \quad (\text{N}) \quad (2.18)$$

Substitusi persamaan 2.16 dan persamaan 2.18 kedalam persamaan 2.17 menghasilkan persamaan gaya tangensial berikut ini:

$$F_t = \tau_{shi} \frac{d-d_i}{2} \cdot \frac{f}{2} \cdot \frac{\cos(\eta-\gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi+\eta-\gamma_0)} + K_f \frac{d-d_i}{2 \sin K_r} \quad (\text{N}) \quad (2.19)$$

Dengan:

τ_{shi} = tegangan geser pada bidang geser (N/mm²).

γ_0 = sudut geram.

η = sudut gesek.

ϕ = sudut geser.

Momen torsi yang diperlukan agar pahat potong dapat berputar adalah:

$$M_z = F_t \frac{d-d_i}{2} \quad (\text{Nmm}) \quad (2.20)$$



Gaya tekan yang diperlukan agar proses pemakanan dapat berlangsung adalah:

$$F_z = 2F_f \sin K_r + 2F_{an} \sin K_r + F_e \quad (\text{N}) \quad (2.21)$$

Dengan:

F_z = gaya tekan total untuk dua sisi potong (N)

F_f = gaya makan (N)

$$F_f = F_v \tan (\eta - \gamma_0) \quad (2.22)$$

F_{an} = gaya normal pada bidang utama potong, yang tergantung pada gaya normal spesifik persatuan panjang aktif mata potong (K_n (N/mm)), dan dipengaruhi oleh jenis geometri pahat, benda kerja, cairan pendingin dan kondisi pemotongan.

F_e = gaya ekstruksi 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 total adalah:

$$F_z = 4 \{F_v \tan (\eta - \gamma_0) \sin K_r + K_n(d - d_i)/2\} \quad (\text{N}) \quad (2.23)$$

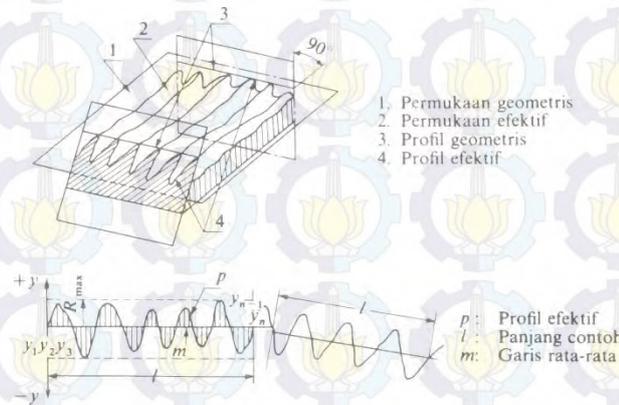
2.2.3 Kekasaran Permukaan Benda Kerja

Kekasaran permukaan merupakan salah satu karakteristik yang sangat penting dalam bidang manufaktur maupun dalam perancangan komponen mesin (Rochim, 2001). Kekasaran permukaan didefinisikan sebagai ketidakaturan konfigurasi permukaan pada suatu benda atau bidang. Penyimpangan rata-rata aritmatika (R_a) merupakan jumlah rata-rata puncak tertinggi dan terendah dari setiap gelombang yang diukur pada panjang tertentu.

Penyimpangan rata-rata aritmatika (R_a) sebagai harga rata-rata dari ordinat-ordinat profil efektif garis rata-ratanya (Juhana dan Suratman, 2000). Profil efektif merupakan garis bentuk dari potongan permukaan efektif oleh sebuah bidang yang telah ditentukan secara konvensional terhadap permukaan geometris ideal. Ilustrasi yang lebih jelas terhadap permukaan geometris,



permukaan efektif, profil geometris, dan profil efektif ditunjukkan oleh Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Penyimpangan rata-rata aritmatika (Rochim, 2001)

Harga R_a ditentukan dari nilai-nilai ordinat ($y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$) yang dijumlahkan tanpa memperhitungkan tandanya. Secara umum, R_a dirumuskan sebagai berikut:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l \frac{1}{l} |y| dx \quad (2.24)$$

Harga R_a tersebut dapat didekati dengan persamaan:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2.25)$$

Atau

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n}{n} \quad (2.26)$$

Dengan:

R_a = Nilai kekasaran aritmatika

Y_n = Tinggi atau dalam bagian-bagian profil hasil pengukuran jarum peraba

n = Frekuensi pengukuran

l = Panjang sampel yang telah ditentukan, yaitu panjang dari profil efektif yang diperlukan untuk menentukan kekasaran permukaan dari permukaan yang diteliti

Nilai penyimpangan rata-rata aritmatika telah diklasifikasikan oleh ISO menjadi 12 tingkat kekasaran. Tingkat kekasaran ini dilambangkan dari N1 hingga N12 seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 2.1 (Rochim, 2001).



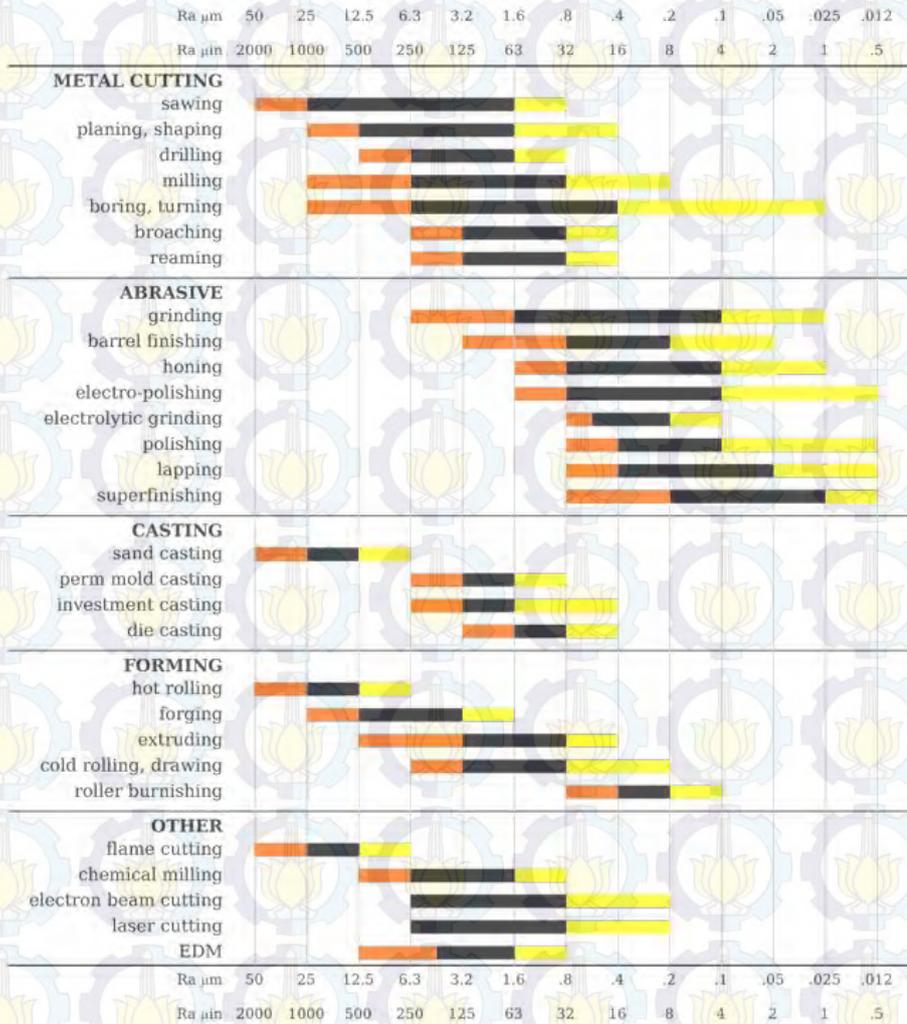
Tabel 2.1 Nilai Kekasaran dan Tingkat Kekasaran

Kekasaran, Ra (μm)	Tingkat kekasaran	Panjang sampel (mm)
50	N12	8
25	N11	
12,5	N10	2,5
6,3	N9	
3,2	N8	0,8
1,6	N7	
0,8	N6	
0,4	N5	
0,2	N4	0,25
0,1	N3	
0,05	N2	
0,025	N1	0,08

Beberapa nilai contoh kekasaran yang dapat dicapai dengan beberapa cara pengerjaan diperlihatkan oleh Tabel 2.2.



Tabel 2.2 Nilai kekasaran yang dicapai oleh beberapa pengerjaan
(http://wikipedia.org/wiki/surface_finish)



Keterangan: kasar normal halus

Keterangan:

Kasar = Nilai kekasaran permukaan yang dicapai dengan pengerjaan kasar.

Normal = Nilai kekasaran permukaan yang dicapai dengan pengerjaan normal.

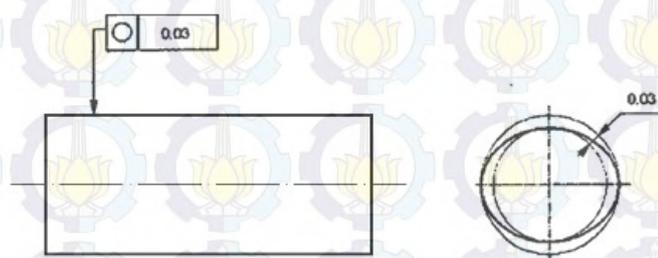
Halus = Nilai kekasaran permukaan yang dicapai dengan pengerjaan khusus.



R_a merupakan variabel respon yang paling banyak digunakan untuk mengidentifikasi kekasaran permukaan (Rochim, 2001). Penggunaan parameter R_a sebenarnya tidak mempunyai dasar yang kuat untuk mengidentifikasi ketidakteraturan konfigurasi permukaan karena beberapa profil permukaan dapat menghasilkan nilai R_a yang hampir sama. Akan tetapi, parameter R_a cocok digunakan untuk memeriksa kualitas permukaan akhir benda kerja yang dihasilkan dalam jumlah banyak. Parameter R_a lebih peka terhadap penyimpangan yang terjadi pada proses pemesinan bila dibandingkan dengan parameter-parameter kekasaran permukaan yang lain. Dengan demikian pencegahan akan dapat dilakukan jika muncul tanda-tanda penambahan angka kekasaran permukaan benda kerja.

2.2.4 Kebulatan

Kebulatan (*roundness*) adalah kondisi pada suatu permukaan dengan penampang berbentuk lingkaran (silinder, konis dan bola), dimana semua titik-titik dari permukaan yang dipotong oleh bidang apapun tegak lurus terhadap sumbu (silinder dan konis) atau yang melalui pusat (bola) mempunyai jarak yang sama dari titik pusat. Toleransi kebulatan menunjukkan daerah toleransi yang dibatasi oleh dua lingkaran konsentris, dimana setiap elemen dari lingkaran harus berada pada bagian tersebut (Hill, 1969). Gambar 2.7 menunjukkan ilustrasi simbol toleransi kebulatan.



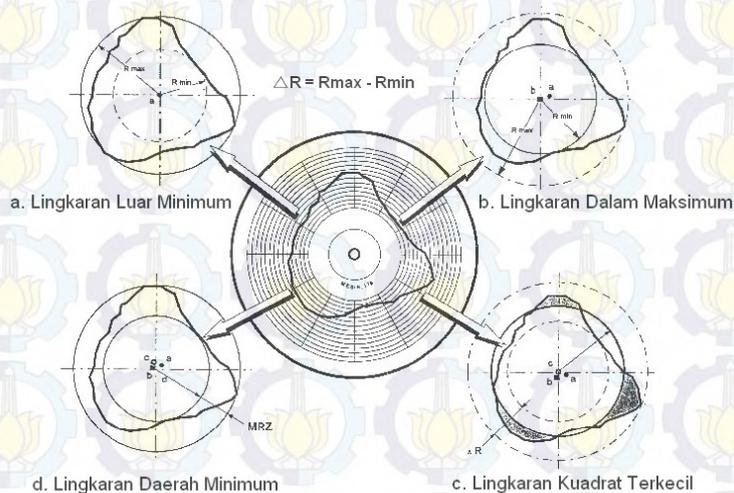
Gambar 2.7 Toleransi untuk geometrik kebulatan

Kebulatan adalah suatu harga yang dapat dihitung berdasarkan profil kebulatan relatif terhadap lingkaran referensinya (Rochim, 2001). Menurut standar Inggris, Amerika dan Jepang terdapat empat macam lingkaran referensi yaitu:



1. Lingkaran luar minimum (*minimum circumscribed circle*) adalah metode yang digunakan untuk menghitung lingkaran standar dengan jari-jari minimum yang menutupi profil data.
2. Lingkaran dalam maksimum (*maximum inscribed circle*) adalah metode yang digunakan untuk menghitung lingkaran standar dengan jari-jari maksimum yang ditutupi oleh profil data.
3. Lingkaran daerah minimum (*minimum zone circle*) adalah metode yang digunakan untuk menghitung dua lingkaran konsentris yang menutupi profil data seperti pemisah arah minimum.
4. Lingkaran kuadrat terkecil (*least squares circle*) adalah metode yang paling umum digunakan. Luas daerah yang tertutup oleh profil sama dengan luas daerah yang berada pada luar.

Dari keempat lingkaran referensi diatas parameter kebulatan yang dipakai adalah lingkaran daerah minimum atau *minimum zone circle*. Dua buah lingkaran konsentris yang melingkupi profil kebulatan sedemikian rupa sehingga jarak radial antara kedua lingkaran tersebut adalah yang terkecil. Titik tengah dari lingkaran minimum tersebut disebut sebagai *minimum zone center* (MZC). Nilai ketidakbulatan adalah selisih dari radius kedua lingkaran tersebut (ΔR) dan dinamakan sebagai *minimum radial zone* (MRZ). Gambar 2.8 menunjukkan metode pengukuran kebulatan MZC (Rochim, 2001).



Gambar 2.8 Grafik polar dari empat jenis lingkaran referensi



2.2.5 Delaminasi

Delaminasi adalah terkelupasnya lapisan tipis pada permukaan benda kerja dan merupakan salah satu jenis kerusakan pada material komposit yang timbul pada sisi masuk (*peel up de lamination*) maupun sisi keluar (*push out delamination*) saat penggurdian. Pada umumnya, delaminasi dikenal sebagai sifat kegagalan matriks yang dominan pada komposit yang berlapis-lapis (*laminated*). Faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya delaminasi adalah adanya pembebanan yang berulang-ulang pada benda kerja, tegangan interlaminar yang tinggi pada sudut-sudutnya dan konsentrasi tegangan pada lokasi retak atau kerusakan lain pada laminat.

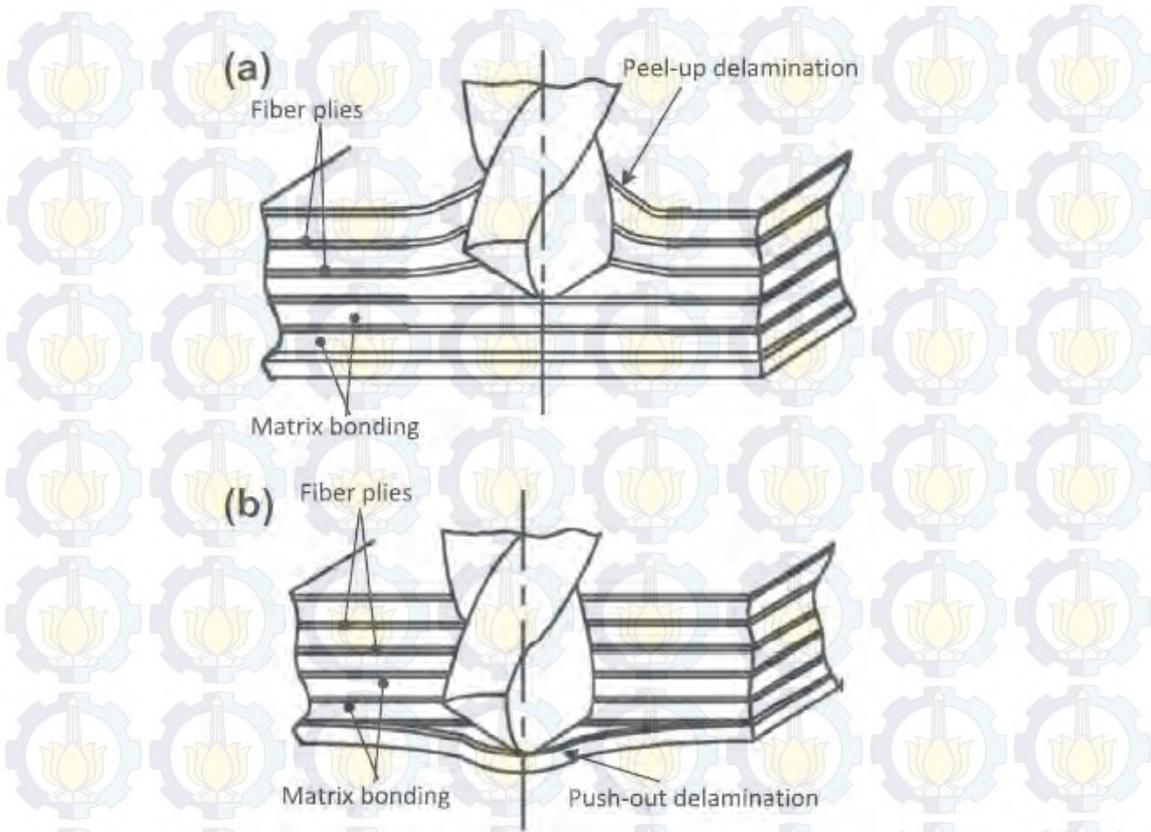
Peel up delamination terjadi di sekitar sisi masuk/permukaan atas lubang hasil penggurdian seperti ditunjukkan Gambar 2.9 a). Ketika tepi potong pahat menyentuh lapisan komposit, menghasilkan gaya kupas yang memisahkan lapisan satu dengan lapisan yang lain melalui kemiringan *flute* pahat sehingga membentuk zona delaminasi di sekitar sisi masuk lubang.

Push out delamination terjadi di sekitar sisi keluar/permukaan bawah lubang hasil penggurdian seperti ditunjukkan Gambar 2.9 b). Ketika pahat mendekati sisi keluar lubang, lapisan di bawah pahat yang belum terpotong menjadi lebih rentan terhadap deformasi akibat ketebalannya menurun, pada saat lapisan yang belum terpotong dibebani gaya tekan yang melebihi kekuatan ikatan antar lapisan, maka timbul *push out delamination* di sisi keluar lubang penggurdian.

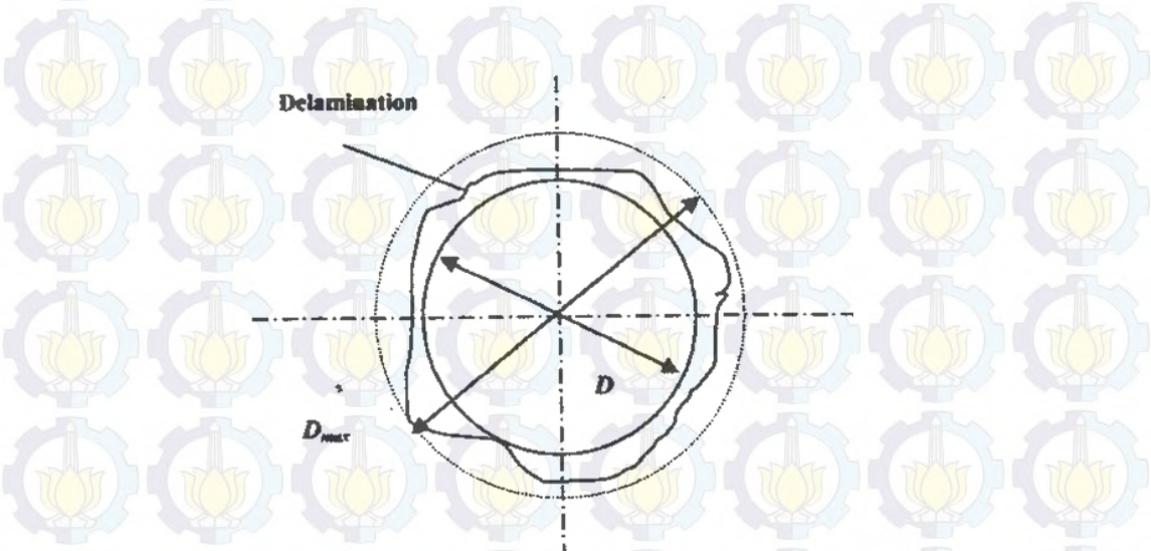
Banyak metode yang digunakan untuk mengukur besarnya delaminasi pada hasil penggurdian komposit, tetapi metode yang sering digunakan yaitu dengan mencari faktor delaminasi (F_d) (Gaitonde dkk., 2007):

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}} \quad (2.27)$$

D_{max} dan D_{nom} merupakan diameter maksimum pada delaminasi yang diamati dan diameter lubang nominal yang ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.9 Skema delaminasi pada komposit laminat. a). *Peel up delamination*. b). *Push out delamination* (Liu dkk., 2012)

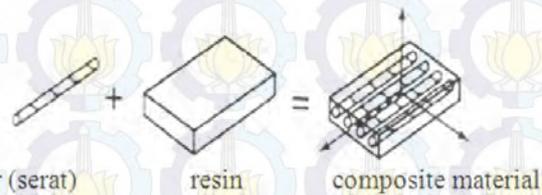


Gambar 2.10 Ilustrasi dari skema pengukuran faktor delaminasi (Gaitonde dkk., 2007)



2.3 Material Komposit

Material komposit merupakan material yang terdiri dari dua atau lebih bahan yang berbeda yang digabung atau dicampur secara makroskopis menjadi suatu bahan yang berguna (Jones, 1975). Rijswijk dkk.(2001) menjelaskan komposit adalah bahan hibrida yang terbuat dari resin polimer diperkuat dengan serat, menggabungkan sifat-sifat mekanik dan fisik. Ilustrasi ikatan dan sifat fisik polimer dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Komposisi (Rijswijk dkk., 2001)

Bahan komposit merupakan bahan gabungan secara makro yang didefinisikan sebagai suatu sistem material yang tersusun dari campuran atau kombinasi dua atau lebih unsur-unsur utama yang secara makro berbeda dalam bentuk dan atau komposisi material yang tidak dapat dipisahkan (Schwartz, 1984).

Material komposit mempunyai beberapa keuntungan diantaranya:

1. Bobotnya ringan.
2. Mempunyai kekuatan dan kekakuan yang baik.
3. Biaya produksi murah.
4. Tahan korosi.

Material komposit terdiri dari dua buah penyusun, yaitu *filler* (bahan pengisi) dan matriks. Adapun definisi dari keduanya adalah sebagai berikut:

1. *Filler* adalah bahan pengisi yang digunakan dalam pembuatan komposit, biasanya berupa serat atau serbuk. Serat yang sering digunakan dalam pembuatan komposit antara lain serat E-glass, boron, karbon dan lain sebagainya. Bisa juga dari serat alam antara lain serat kenaf, jute, rami, cantula dan lain sebagainya.
2. Matriks adalah fasa dalam komposit yang mempunyai bagian atau fraksi volume terbesar (dominan). Matriks dalam struktur komposit bisa berasal



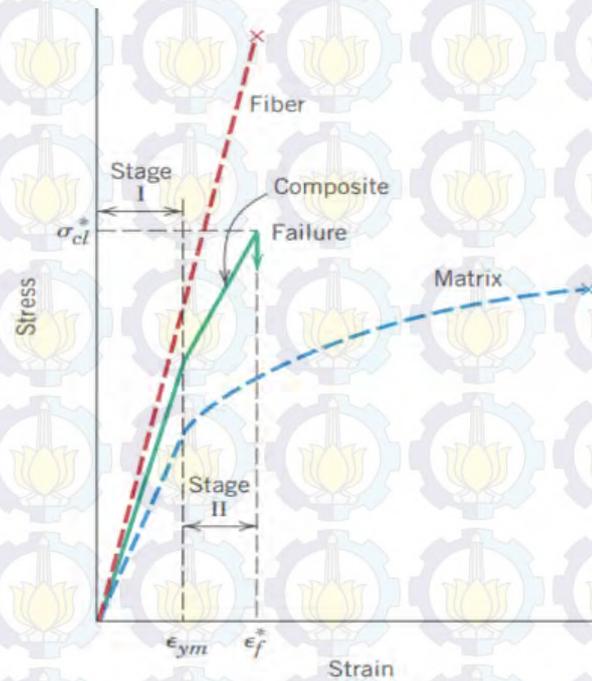
dari bahan polimer, logam, maupun keramik. Matriks secara umum berfungsi untuk mengikat serat menjadi satu struktur komposit. Fungsi dari matriks dalam komposit antara lain:

- a. Mengikat serat menjadi satu kesatuan struktur.
- b. Melindungi serat dari kerusakan akibat kondisi lingkungan.
- c. Mentransfer dan mendistribusikan beban ke serat.
- d. Menyumbangkan beberapa sifat seperti, kekakuan, ketangguhan dan tahanan listrik.

Tujuan dibuatnya komposit yaitu memperbaiki sifat mekanik atau sifat spesifik tertentu, mempermudah desain yang sulit pada manufaktur, keleluasaan dalam bentuk atau desain yang dapat menghemat biaya produksi, dan menjadikan bahan lebih ringan. Komposit yang diproduksi oleh suatu instansi atau pabrik biasanya dapat diprediksi sifat mekanik dari bahan komposit berdasarkan bahan matriks dan bahan penguatnya (Callister, 2007). Adapun beberapa sifat mekanik yang dapat diprediksi dari komposit yaitu kekuatan tarik dan kelayakan sebagai material komposit (validitas komposit).

Dalam komposit, kekuatan tarik dipengaruhi oleh kekuatan *interface*-nya. Dari pengujian kekuatan *interface* sangat sulit ditentukan karena prosesnya yang tidak sederhana, sehingga hasil pengujian juga sangat sulit ditentukan karena adanya faktor teknis pembuatan spesimen. Untuk komposit polimer/serat, perbedaan campuran unsur matriks dan perbedaan serat juga menghasilkan kekuatan *adhesive* yang berbeda sehingga tidak jarang serat akan putus sebelum terlepas dari matriksnya. Gambar 2.12 merupakan diagram kekuatan tarik yang terjadi pada komposit berpenguat serat (*fiber reinforced composite*). Secara keseluruhan sifat komposit ini dipengaruhi oleh:

1. Sifat dari serat/penguat
2. Sifat dari matriks penyusun komposit
3. Fraksi volume serat dan matriks penyusun
4. Orientasi serat pada komposit tersebut



Gambar 2.12 Diagram uji tarik pada FRP komposit (Callister, 2007)

Adapun besarnya kekuatan tarik yang dihasilkan oleh komposit polimer/serat dapat diprediksi dengan menggunakan persamaan 2.28. Persamaan ini dapat digunakan oleh peneliti untuk mengetahui sejauh mana besarnya kekuatan tarik yang dihasilkan oleh komposit berdasarkan matriks dan penguat penyusunnya. Berikut ini persamaan *tensile prediction* (Callister, 2007):

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \quad (2.28)$$

Dengan:

σ_c = kekuatan tarik komposit (MPa)

σ_m = kekuatan tarik matriks (MPa)

σ_f = kekuatan tarik penguat (MPa)

V_m = fraksi volume matriks

V_f = fraksi volume penguat

Jumlah kandungan serat dalam komposit merupakan hal yang menjadi perhatian khusus pada komposit berpenguat serat. Untuk memperoleh komposit berkekuatan tinggi, distribusi serat dengan matriks harus merata pada proses pencampuran agar mengurangi timbulnya *void*. Untuk menghitung fraksi volume, parameter yang harus diketahui adalah densitas resin, densitas penguat, massa



matriks dan massa penguat. Adapun fraksi volume ditentukan dengan persamaan (Callister, 2007):

$$W_f = \frac{w_f}{w_c} = \frac{\rho_f V_f}{\rho_c V_c} = \frac{\rho_f}{\rho_c} V_f \quad (2.29)$$

$$V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} W_f = 1 - V_m \quad (2.30)$$

Jika selama pembuatan komposit diketahui berat penguat dan berat matriks, serta densitas penguat dan densitas matriks, maka fraksi volume dan fraksi penguat dapat dihitung dengan persamaan (Callister, 2007):

$$V_f = \frac{W_f / \rho_f}{W_f / \rho_f + W_m / \rho_m} \quad (2.31)$$

Dengan :

W_f = fraksi berat penguat

w_f = berat penguat (gr)

w_c = berat komposit (gr)

ρ_f = densitas penguat (gr/cm³)

ρ_c = densitas komposit (gr/cm³)

v_f = fraksi volume penguat

v_m = fraksi volume matriks

V_f = volume penguat (cm³)

V_m = volume matriks (cm³)

2.3.1 Klasifikasi Material Komposit

Berdasarkan matriks yang digunakan, komposit dapat dikelompokkan atas (Callister, 2007):

1. *Ceramic matrix composite* (CMC)

CMC merupakan material dua fasa dengan satu fasa berfungsi sebagai penguat dan satu fasa sebagai matriks, dimana matriksnya terbuat dari keramik. Penguat yang umum digunakan pada CMC adalah oksida, karbida dan nitrida.

2. *Metal matrix composite* (MMC)



MMC adalah salah satu jenis komposit yang memiliki matriks logam. Pada mulanya yang diteliti adalah *continuous filamen* MMC yang digunakan dalam industri penerbangan.

3. *Polymer matrix composite* (PMC)

PMC merupakan matriks yang paling umum digunakan pada material komposit karena memiliki sifat yang lebih tahan terhadap korosi dan lebih ringan. Matriks polimer terbagi menjadi dua, yaitu termoset dan termoplastik. Perbedaannya, polimer termoset tidak dapat didaur ulang sedangkan termoplastik dapat didaur ulang sehingga lebih banyak digunakan. Jenis-jenis termoplastik yang biasa digunakan adalah *polypropylene* (PP), *polystyrene* (PS), *polyethylene* (PE) dan lain-lain. Gambar 2.13 (Callister, 2007) menunjukkan bagan pengelompokan komposit berdasarkan matriks yang digunakan.



Gambar 2.13 Klasifikasi komposit berdasarkan matriksnya

Berdasarkan strukturnya komposit dibedakan atas (Callister, 2007):

1. *Particulate composite materials* (komposit partikel)

Merupakan *jenis* komposit yang menggunakan partikel/butiran sebagai *filler* (pengisi). Partikel berupa logam atau non logam dapat digunakan sebagai *filler*.

2. *Fiber composite materials* (komposit serat)

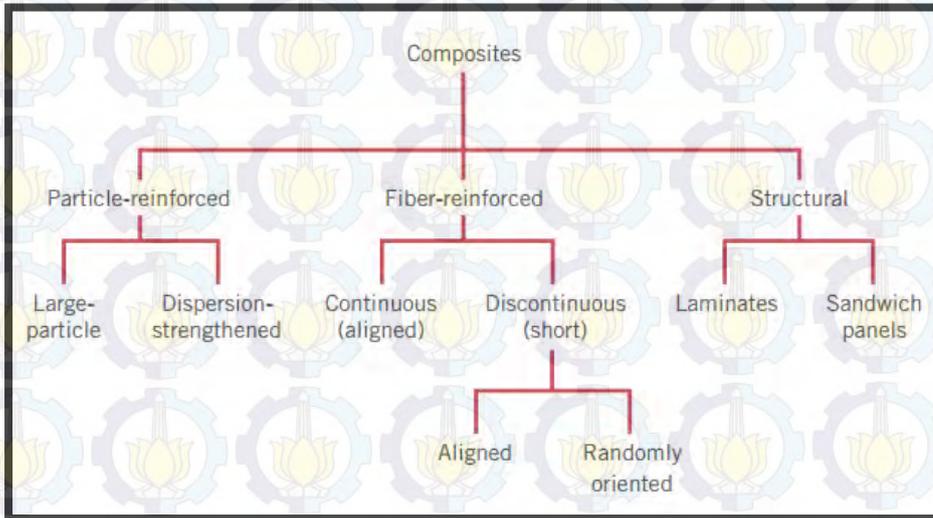
Komposit yang terdiri dari dua komponen penyusun yaitu matriks dan serat.

3. *Structural composite materials* (komposit berlapis)

Komposit yang terdiri dari sekurang-kurangnya dua material berbeda yang direkatkan bersama-sama. Proses pelapisan dilakukan dengan mengkombinasikan aspek terbaik dari masing-masing lapisan untuk



memperoleh bahan yang berguna. Untuk lebih jelasnya, pembagian komposit berdasarkan strukturnya dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Klasifikasi komposit berdasarkan strukturnya (Callister, 2007)

2.3.2 *Fiber Reinforced Composite Material*

Material komposit yang dibahas dalam penelitian ini adalah jenis *fiber reinforced* yaitu komposit yang terdiri dari serat-serat sebagai penguat yang diikat dengan matriks. Tujuan dibuatnya material ini adalah agar material memiliki kekuatan dan modulus spesifik yang tinggi (Callister, 2007). Bahan serat yang sering digunakan sebagai penguat adalah gelas, aramid dan karbon (*graphite*).

Material dalam bentuk serat mempunyai kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan material dalam bentuk *bulk* karena serat mempunyai ukuran yang mendekati ukuran kristal, sehingga dislokasi yang ada lebih kecil dibandingkan dislokasi pada material dalam bentuk *bulk*. Matriks yang digunakan sebagai pengikat serat juga dapat berfungsi untuk mengalirkan tegangan dari satu serat ke serat lainnya, selain itu juga untuk meneruskan tegangan pada serat yang putus. Material matriks memiliki kekuatan yang lebih rendah dibandingkan material serat, karena fungsi utamanya hanya sebagai pengikat serat. Tabel 2.3 menunjukkan sifat-sifat mekanik dari bahan serat fiber dan *wire*.



Tabel 2.3 Sifat-sifat mekanik dari bahan serat fiber dan *wire* (Jones, 1975)

Fiber or Wire	Density, ρ (kN/m ³)	Tensile strength, S (Gpa)	S/ ρ (km)	Tensile stiffness, E (Gpa)	E/ ρ (Mm)
Aluminium	26.3	0.62	24	73	2.8
Titanium	46.1	1.90	41	115	2.5
Steel	76.6	4.10	54	207	2.7
E-Glass	25.0	3.40	136	72	2.9
S-Glass	24.4	4.80	197	86	3.5
Carbon	13.8	1.70	123	190	14.0
Beryllium	18.2	1.70	93	300	16.0
Boron	25.2	3.40	137	400	16.0
Graphite	13.8	1.70	123	250	18.0

2.3.3 *Polymer Matrix Composite*

Polymer matrix composite (PMC) mengandung polimer resin sebagai matriks dengan serat fiber sebagai penguat. Material ini banyak digunakan di berbagai aplikasi komposit karena beberapa kelebihan, yaitu biaya pembuatan lebih rendah, dapat dibuat dengan produksi massal, polimer memiliki sifat-sifat antara lain ketangguhan yang baik, ketahanan simpan yang baik, siklus fabrikasi yang dapat dipersingkat, kemampuan mengikuti bentuk dan lebih ringan dibandingkan dengan jenis matriks yang lain. Jenis polimer yang banyak digunakan adalah (Callister, 2007):

1. Termoplastik

Termoplastik adalah plastik yang dapat dilunakkan berulang kali (*recycle*) dengan menggunakan panas. Termoplastik merupakan polimer yang akan menjadi keras apabila didinginkan. Termoplastik meleleh pada suhu tertentu, melekat mengikuti perubahan suhu dan mempunyai sifat dapat balik (*reversibel*) kepada sifat aslinya yaitu kembali mengeras bila didinginkan.

2. Termoset

Termoset tidak dapat mengikuti perubahan suhu (*irreversibel*). Bila sekali pengerasan telah terjadi, maka bahan tidak dapat dilunakkan kembali. Pemanasan yang tinggi tidak akan melunakkan termoset, melainkan akan



membentuk arang dan terurai. Plastik jenis termoset tidak begitu baik dalam proses daur ulang karena selain sulit penanganannya, volumenya juga jauh lebih sedikit (sekitar 10%) dari volume jenis plastik yang bersifat termoset. Beberapa klasifikasi PMC berdasarkan jenis penguatnya antara lain (Callister, 2007):

1. *Glass fiber reinforced polymer (GFRP) composites*
2. *Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites*
3. *Aramid fiber reinforced polymer composites*

Perbandingan ketiga jenis komposit dengan matriks polimer diatas berdasarkan propertinya dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Perbandingan properti komposit dengan matriks polimer untuk 3 jenis serat penguat (glas, karbon dan aramid) pada fraksi volume fiber 0,60 (Callister, 2007).

Property	Glass (E-glass)	Carbon (High Strength)	Aramid (Kevlar 49)
Specific gravity	2.1	1.6	1.4
Tensile modulus			
Longitudinal [Gpa (10^6 psi)]	45 (6.5)	145 (21)	76 (11)
Transverse [Gpa (10^6 psi)]	12 (1.8)	10 (1.5)	5.5 (0.8)
Tensile strength			
Longitudinal [Mpa (ksi)]	1020 (150)	1240 (180)	1380 (200)
Transverse [Mpa (ksi)]	40 (5.8)	41 (6)	30 (4.3)
Ultimate tensile strain			
Longitudinal	2.3	0.9	1.8
Transverse	0.4	0.4	0.5

Ketiga jenis fiber diatas merupakan jenis fiber yang paling sering digunakan sebagai penguat pada material komposit dengan matriks polimer. Selain ketiga jenis fiber diatas beberapa jenis fiber juga digunakan antara lain boron, karbida silikon dan oksida aluminium.

2.3.4 *Multi Directional Aramid/Epoxy*

Material serat yang telah diikat dengan matriks membentuk lamina. Arah serat dapat satu arah (*uni directional*) dapat pula dalam banyak arah (*multi directional*). Lamina satu arah memiliki kekuatan yang tinggi dalam arah



seratnya, sedangkan lamina dengan serat banyak arah (*multi directional*) memiliki kekuatan yang tinggi dalam arah serat yang mempunyai kekuatan yang lebih tinggi (Callister, 2007). Lamina-lamina yang disusun bertumpuk akan membentuk laminat. Sudut orientasi tiap lamina diatur sedemikian rupa sehingga laminat yang dihasilkan memiliki kekuatan seperti yang diinginkan. Tabel 2.5 menunjukkan sifat-sifat fisik/mechanik dari material komposit *aramid/epoxy*.

Tabel 2.5 Sifat fisik/mechanik material komposit *aramid/epoxy* (DI, 2015)

No	Properties	Direction	Unit	Aramid/Epoxy Z-19.905
1	Tensile modulus	Warp	Gpa	25
2		Weft	Gpa	25
3	Tensile strength	Warp	Mpa	515
4		Weft	Mpa	440
5	Poisson ratio	Warp		0.33
6		Weft		
7	Compressive modulus	Warp	Gpa	23
8		Weft	Gpa	22
9	Compressive strength	Warp	Mpa	160
10		Weft	Mpa	160
11	In-plane shear modulus	G12	Gpa	8.45
12	In-plane shear strength	S12	Mpa	
13	Interlaminar shear strength	Warp	Mpa	
14		Weft	Mpa	40
15	Bearing ult.stress	Warp	Mpa	
16	Bearing stress at 4% elong	Weft	Mpa	
17	Bearing stress at $e/D = 2.0$	Warp	Mpa	
18	Thickness per ply		mm	0.27
19	Density		g/cm	1.35

2.4 Metode Taguchi

Metode Taguchi merupakan metodologi baru dalam bidang teknik yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses serta dapat menekan biaya dan *resources* seminimal mungkin. Metode Taguchi berupaya mencapai sasaran tersebut dengan menjadikan produk dan proses tidak sensitif terhadap berbagai faktor gangguan (*noise*), seperti material, perlengkapan manufaktur, tenaga kerja manusia, dan kondisi-kondisi operasional (Soejanto, 2009). Metode Taguchi menjadikan produk dan proses memiliki sifat *robust* terhadap faktor-



faktor gangguan tersebut. Oleh karena itu, metode Taguchi juga disebut *robust design*.

Metode Taguchi memperkenalkan pendekatan desain eksperimen yang dapat merancang suatu proses yang *robust* terhadap kondisi lingkungan, mengembangkan kualitas produk yang *robust* terhadap variasi komponen, dan meminimalkan variasi di sekitar target. Metode Taguchi memiliki beberapa kelebihan bila dibandingkan dengan metode desain eksperimen lainnya. Kelebihan-kelebihan tersebut antara lain (Soejanto, 2009):

1. Lebih efisien karena dapat melaksanakan penelitian yang melibatkan banyak faktor dan level faktor.
2. Dapat memperoleh proses yang menghasilkan produk secara konsisten dan *robust* terhadap faktor yang tidak dapat dikontrol.
3. Menghasilkan kesimpulan mengenai level dari faktor kontrol yang menghasilkan respon optimum.

Namun demikian, metode Taguchi memiliki struktur rancangan yang sangat kompleks, sehingga pemilihan rancangan percobaan harus dilakukan secara hati-hati dan sesuai dengan tujuan penelitian.

Desain eksperimen adalah proses mengevaluasi dua faktor atau lebih secara serentak terhadap kemampuannya untuk mempengaruhi rata-rata atau variabilitas hasil gabungan dari karakteristik produk atau proses tertentu (Soejanto, 2009). Untuk mencapai hal tersebut secara efektif, faktor dan level faktor dibuat bervariasi kemudian hasil dari kombinasi pengujian tertentu diamati sehingga kumpulan hasil selengkapnya dapat dianalisis. Hasil analisis ini kemudian digunakan untuk menentukan faktor-faktor yang berpengaruh dan tindakan yang dapat membuat perbaikan lebih lanjut.

2.4.1 Prosedur Eksperimen

Secara umum, desain eksperimen Taguchi dibagi menjadi tiga tahap utama yang mencakup semua pendekatan eksperimen. Kedua tahap tersebut adalah sebagai berikut (Soejanto, 2009):

1. Tahap perencanaan

Tahap perencanaan merupakan tahap terpenting. Pada tahap ini seseorang peneliti dituntut untuk mempelajari eksperimen-eksperimen yang pernah



dilakukan sebelumnya. Kecermatan pada tahap ini akan menghasilkan eksperimen yang memberikan informasi positif atau negatif. Informasi positif terjadi apabila hasil eksperimen memberikan indikasi tentang faktor dan level yang mengarah pada peningkatan performansi produk. Informasi negatif terjadi apabila hasil eksperimen gagal memberikan indikasi tentang faktor-faktor yang mempengaruhi respon. Tahap ini terdiri dari beberapa langkah sebagai berikut (Soejanto, 2009):

a. Perumusan masalah

Masalah harus dirumuskan secara spesifik. Perumusan masalah harus jelas secara teknis sehingga dapat dituangkan ke dalam eksperimen yang akan dilakukan.

b. Penentuan tujuan eksperimen

Tujuan eksperimen yang ditentukan harus dapat menjawab masalah yang telah dirumuskan.

c. Penentuan respon

Respon memiliki nilai yang tergantung pada faktor-faktor lain yang disebut variabel bebas.

d. Pengidentifikasian faktor/variabel bebas

Faktor adalah variabel yang perubahannya tidak tergantung pada variabel lain. Pada langkah ini, akan dipilih faktor-faktor yang akan diselidiki pengaruhnya terhadap respon yang bersangkutan. Dalam suatu eksperimen, tidak semua faktor yang diperkirakan mempengaruhi respon harus diselidiki. Dengan demikian, eksperimen dapat dilaksanakan secara efektif dan efisien.

e. Pemisahan faktor kontrol dan faktor gangguan

Faktor-faktor yang diamati dapat dibagi menjadi faktor kontrol dan faktor gangguan. Dalam desain eksperimen Taguchi, keduanya perlu diidentifikasi dengan jelas sebab pengaruh antar kedua faktor tersebut berbeda. Faktor kontrol adalah faktor yang nilainya dapat dikendalikan sedangkan faktor gangguan adalah faktor yang nilainya tidak dapat dikendalikan.

f. Penentuan jumlah dan nilai level faktor

Pemilihan jumlah level akan mempengaruhi ketelitian hasil dan biaya pelaksanaan eksperimen. Semakin banyak level yang diteliti maka hasil



eksperimen yang diperoleh akan semakin akurat, tetapi biaya yang harus dikeluarkan akan semakin banyak.

g. Perhitungan derajat kebebasan

Derajat kebebasan adalah sebuah konsep untuk mendeskripsikan seberapa besar eksperimen harus dilakukan dan seberapa banyak informasi yang dapat diberikan oleh eksperimen tersebut. Perhitungan derajat kebebasan dilakukan untuk menentukan jumlah eksperimen yang akan dilakukan untuk menyelidiki faktor yang diamati. Derajat kebebasan dari matriks ortogonal (v_{mo}) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$v_{mo} = \text{jumlah eksperimen} - 1 \quad (2.32)$$

Derajat kebebasan dari faktor dan level (v_{fl}) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$v_{fl} = \text{jumlah level faktor} - 1 \quad (2.33)$$

h. Pemilihan matriks ortogonal

Pemilihan matriks ortogonal yang sesuai ditentukan oleh jumlah derajat kebebasan dari jumlah faktor dan jumlah level faktor. Matriks ortogonal memiliki kemampuan untuk mengevaluasi sejumlah faktor dengan jumlah eksperimen yang minimum. Suatu matriks ortogonal dilambangkan dalam bentuk:

$$L_a (b^c) \quad (2.34)$$

Dengan:

L = Rancangan bujur sangkar latin

a = Banyaknya eksperimen

b = Banyaknya level faktor

c = Banyaknya faktor

Matriks ortogonal $L_{18} (2^1 \times 3^3)$ adalah salah satu matriks ortogonal standar dengan beberapa level gabungan. Matriks ortogonal $L_{18} (2^1 \times 3^3)$ ditunjukkan pada Tabel 2.6. Kolom pertama terdiri dari dua level, dan ketiga kolom yang lainnya terdiri dari tiga level (Soejanto, 2009).



Tabel 2.6 Matriks Ortogonal Standar untuk $L_{18} (2^1 \times 3^3)$

No. Percobaan	Kolom Faktor			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	1
5	1	2	2	2
6	1	2	3	3
7	1	3	1	2
8	1	3	2	3
9	1	3	3	1
10	2	1	1	3
11	2	1	2	1
12	2	1	3	2
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2

2. Tahap Pelaksanaan

Tahap pelaksanaan terdiri dari dua hal, yaitu penentuan jumlah replikasi dan randomisasi pelaksanaan eksperimen (Soejanto, 2009).

a. Jumlah replikasi

Replikasi adalah pengulangan kembali perlakuan yang sama pada kondisi yang sama dalam sebuah percobaan untuk mendapatkan ketelitian yang lebih tinggi, mengurangi tingkat kesalahan serta memperoleh harga taksiran dari kesalahan.

b. Randomisasi

Pengaruh faktor-faktor lain yang tidak diinginkan atau tidak dapat dikendalikan selalu ada dalam sebuah eksperimen. Pengaruh itu dapat diperkecil dengan menyebarkan faktor-faktor tersebut melalui randomisasi



(pengacakan) urutan percobaan. Randomisasi dilakukan bertujuan untuk menyebarkan pengaruh dari faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan pada semua unit eksperimen serta memberikan kesempatan yang sama pada semua unit eksperimen untuk menerima suatu perlakuan sehingga ada kehomogenan pengaruh dari setiap perlakuan yang sama. Selain itu, randomisasi juga bertujuan mendapatkan hasil eksperimen yang bebas satu sama lain. Jika replikasi bertujuan untuk memungkinkan dilakukannya uji signifikansi, maka randomisasi bertujuan untuk memberikan validasi terhadap uji signifikansi tersebut dengan menghilangkan sifat bias.

3. Tahap Analisis

Pada tahap ini, pengumpulan dan pengolahan data dilakukan. Tahap ini meliputi pengumpulan data, pengaturan data, perhitungan serta penyajian data dalam suatu tampilan tertentu yang sesuai dengan desain yang dipilih. Selain itu, perhitungan dan pengujian data statistik dilakukan pada data hasil eksperimen.

a. Analisis Variansi

Analisis variansi adalah teknik yang digunakan untuk menganalisis data yang telah disusun dalam desain secara statistik (Soejanto, 2009). Analisis ini dilakukan dengan menguraikan seluruh variansi atas bagian-bagian yang diteliti. Pada tahap ini, akan dilakukan pengklasifikasian hasil eksperimen secara statistik sesuai dengan sumber variasi sehingga dapat mengidentifikasi kontribusi faktor. Dengan demikian akurasi perkiraan model dapat ditentukan. Analisis variansi pada matriks ortogonal dilakukan berdasarkan perhitungan jumlah kuadrat untuk masing-masing kolom. Analisis variansi digunakan untuk menganalisis data percobaan yang terdiri dari dua faktor atau lebih dengan dua level atau lebih. Tabel ANAVA terdiri dari perhitungan derajat kebebasan (db), jumlah kuadrat (*sum of square*, SS), kuadrat tengah (*mean of square*, MS), dan F_{hitung} seperti ditunjukkan pada Tabel 2.7.



Tabel 2.7 Tabel Analisis Variansi

Sumber variasi	Db	SS	MS	F _{hitung}
Faktor A	ν_A	SS_A	MS_A	F_A
Faktor B	ν_B	SS_B	MS_B	F_B
Error	ν_{error}	SS_{error}	MS_{error}	
Total	ν_T	SST		

Dengan:

$$\begin{aligned} \nu_T &= \text{Derajat bebas total.} \\ &= N-1 \end{aligned} \quad (2.35)$$

$$\begin{aligned} \nu_A &= \text{Derajat bebas faktor A.} \\ &= k_A - 1 \end{aligned} \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} \nu_B &= \text{Derajat bebas faktor B.} \\ &= k_B - 1 \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} \nu_{error} &= \text{Derajat bebas error.} \\ &= \nu_T - \nu_A - \nu_B - \nu_{AB} \end{aligned} \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} T &= \text{Jumlah keseluruhan.} \\ &= \sum_{i=1}^N y_i \end{aligned} \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} CF &= \text{Faktor koreksi.} \\ &= \frac{T^2}{N} \end{aligned} \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned} SS_T &= \text{Jumlah kuadrat total.} \\ &= \sum_{i=1}^N Y_i - CF \\ &= \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{y})^2 \end{aligned} \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned} SS_A &= \text{Jumlah kuadrat faktor A.} \\ &= \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - CF \end{aligned} \quad (2.42)$$



SS_B = Jumlah kuadrat faktor B.

$$= \left[\sum_{i=1}^{k_B} \left(\frac{B_i^2}{n_{B_i}} \right) \right] - CF \quad (2.43)$$

SS_E = Jumlah kuadrat *error*.

$$= SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \quad (2.44)$$

MS_A = Kuadrat tengah faktor A.

$$= \frac{SS_A}{v_A} \quad (2.45)$$

MS_B = Kuadrat tengah faktor B.

$$= \frac{SS_B}{v_B} \quad (2.46)$$

MS_E = Kuadrat tengah *error*.

$$= \frac{SS_E}{v_E} \quad (2.47)$$

k_A = Jumlah level faktor A

k_B = Jumlah level faktor B

N = Jumlah total percobaan

n_{A_i} = Jumlah total pengamatan faktor A

n_{B_j} = Jumlah total pengamatan faktor B

b. Uji F

Uji F digunakan dengan tujuan untuk menunjukkan bukti adanya perbedaan pengaruh masing-masing faktor dalam eksperimen (Soejanto, 2009).

Pengujian ini dilakukan dengan cara membandingkan variansi yang disebabkan oleh masing-masing faktor dan variansi *error*. Variansi *error* adalah variansi setiap individu dalam pengamatan yang timbul karena faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan. Hipotesis yang digunakan dalam pengujian ini untuk faktor yang tidak diambil secara random (*fixed*) adalah:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$$

H_1 : Sedikitnya ada satu pasangan μ yang tidak sama

Kegagalan menolak H_0 mengindikasikan tidak adanya perbedaan rata-rata dari nilai respon yang dihasilkan pada perlakuan yang berbeda, sedangkan penolakan H_0 mengindikasikan adanya perbedaan rata-rata dari nilai respon



tersebut. Selain itu, karena respon pada setiap eksperimen dapat dimodelkan dalam bentuk (Montgomery, 2009):

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk} \quad (2.48)$$

maka hipotesis yang juga dapat digunakan dalam pengujian ini adalah

Untuk taraf faktor A $\rightarrow H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_k = 0$

$$H_1: \text{Paling sedikit ada satu } \tau \text{ tidak sama dengan } 0$$

Untuk taraf faktor B $\rightarrow H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$

$$H_1: \text{Paling sedikit ada satu } \beta \text{ tidak sama dengan } 0$$

Kegagalan menolak H_0 mengindikasikan tidak adanya pengaruh faktor A dan faktor B terhadap respon sedangkan penolakan H_0 mengindikasikan adanya pengaruh faktor A dan faktor B terhadap respon. Kegagalan menolak atau penolakan H_0 didasarkan pada nilai F_{hitung} yang dirumuskan (Soejanto, 2009):

Untuk taraf faktor A $\rightarrow F_{hitung} = \frac{MS_A}{MS_E} \quad (2.49)$

Untuk taraf faktor B $\rightarrow F_{hitung} = \frac{MS_B}{MS_E} \quad (2.50)$

Kegagalan menolak H_0 pada masing-masing kasus dilakukan jika mengalami kondisi sebagai berikut:

Untuk taraf faktor A $\rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_A, v_E} \quad (2.51)$

Untuk taraf faktor B $\rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_B, v_E} \quad (2.52)$

Bila menggunakan perangkat komputasi statistik, kegagalan menolak H_0 dilakukan jika $p\text{-value}$ lebih besar daripada α (taraf signifikansi). Kegagalan menolak H_0 juga dilakukan apabila nilai F_{hitung} lebih besar dari dua (Park, 1996).

c. Uji Asumsi Residual

Residual didefinisikan sebagai selisih antara nilai pengamatan dan nilai dugaannya $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$ (Montgomery, 2009). 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.

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

2. 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.

3. Pengujian distribusi normal

Normal probability plot pada perangkat komputasi statistik dapat digunakan untuk menyatakan residual suatu respon berdistribusi normal atau tidak. *Kolmogorov-Smirnov normality test* digunakan dalam pengujian kenormalan residual. Hipotesa yang digunakan adalah:

H_0 : Residual berdistribusi normal.

H_1 : Residual tidak berdistribusi normal.

Gagal menolak H_0 apabila $P_{value} > \alpha$.

d. Rasio S/N

Rasio S/N (*Signal to Noise*) digunakan untuk memilih faktor-faktor yang memiliki kontribusi pada pengurangan variasi suatu respon. Rasio S/N merupakan rancangan untuk transformasi pengulangan data ke dalam suatu nilai yang merupakan ukuran variasi yang timbul. Rasio S/N tergantung dari jenis karakteristik kualitas, yaitu (Lin dan Lin, 2002):



1) Semakin kecil semakin baik

Adalah karakteristik kualitas dengan batas nilai 0 dan non-negatif sehingga nilai yang semakin kecil atau mendekati nol adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S/N = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \right] \quad (2.53)$$

2) Tertuju pada nilai tertentu

Adalah karakteristik kualitas dengan nilai target tidak nol dan terbatas sehingga nilai yang semakin mendekati target tersebut adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S/N = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n} \right] \quad (2.54)$$

3) Semakin besar semakin baik

Adalah karakteristik kualitas dengan rentang nilai tak terbatas dan non-negatif sehingga nilai yang semakin besar adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S/N = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{(1/y_i^2)}{n} \right] \quad (2.55)$$

2.5 Metode Taguchi-Grey-Fuzzy

Dalam metode Taguchi, optimasi hanya dapat dilakukan untuk satu respon saja. Untuk melakukan optimasi beberapa respon secara serentak digunakan gabungan dari metode Taguchi, *grey relational analysis* (GRA) dan logika *fuzzy*.

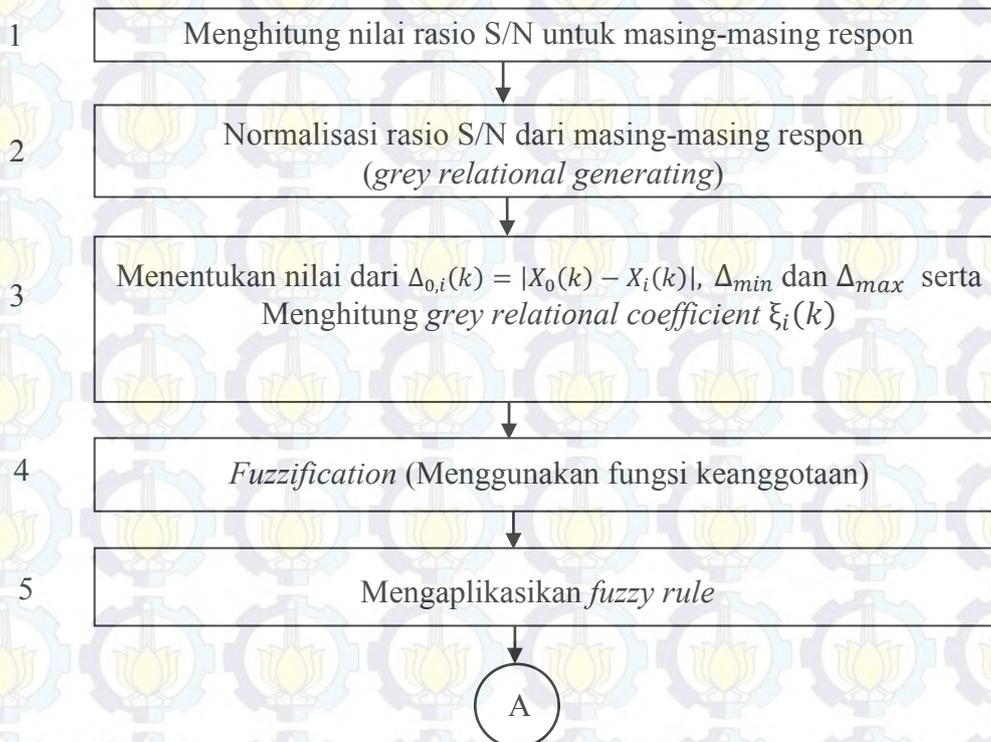
Metode GRA diawali dengan teori *grey system* yang dibuat oleh Dr. Julong Deng pada tahun 1982, yang merupakan dasar dari suatu metode baru yang difokuskan pada studi tentang permasalahan yang memiliki data dan informasi yang minimum. Metode ini digunakan untuk membangun model hubungan dan melakukan analisis hubungan antar respon dan parameter, serta sebagai dasar dalam melakukan prediksi maupun pengambilan keputusan. GRA merupakan



salah satu metode yang dibangun berdasarkan teori *grey*. Pada dasarnya GRA digunakan dalam optimasi untuk mengubah beberapa respon menjadi satu respon.

Logika *fuzzy* pertama kali diformulasikan oleh Dr. Zadeh pada tahun 1965. Metode ini diformulasikan dalam upaya mencari nilai tengah antara nol dan satu. Dr. Zadeh melakukan modifikasi pada teori himpunan, dimana setiap anggotanya memiliki derajat keanggotaan yang selalu bernilai kontinyu antara nol sampai satu. Himpunan ini disebut sebagai himpunan kabur (*fuzzy set*).

Logika *fuzzy* mempunyai kemampuan untuk memproses variabel respon yang bersifat kabur atau yang tidak dapat dideskripsikan secara pasti, misalnya tinggi, lambat, dan bising. Ketidakjelasan dalam menggambarkan suatu variabel respon dapat secara alami dimodelkan dengan menggunakan logika *fuzzy* (Dhavamani dan Alwarsamy, 2011). Dalam logika *fuzzy*, variabel respon yang bersifat kabur direpresentasikan sebagai sebuah himpunan yang anggotanya adalah suatu nilai tegas (*crisp*) dan derajat keanggotaan (*membership function*). Langkah-langkah untuk proses optimasi dengan metode Taguchi-*Grey-Fuzzy* dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Langkah-langkah Optimasi Taguchi-*Grey-Fuzzy*



Gambar 2.15 Langkah-langkah Optimasi Taguchi-Grey-Fuzzy (lanjutan)

Rincian dari langkah-langkah tersebut adalah sebagai berikut:

1. Menghitung rasio S/N untuk masing-masing respon.

Perhitungan rasio S/N dilakukan berdasarkan karakteristik dari masing-masing respon sesuai dengan persamaan 2.53 sampai dengan persamaan 2.55.

2. Normalisasi data untuk masing-masing respon

Pada penelitian ini, normalisasi dilakukan pada rasio S/N di mana rasio S/N memiliki karakteristik semakin besar semakin baik. Nilai S/N rasio dinormalkan menjadi nilai yang besarnya antara 0 dan 1. Tabel 2.8 menunjukkan penempatan nilai respon untuk proses normalisasi.

Tabel 2.8 Penempatan Rasio S/N

	Rasio S/N 1	Rasio S/N 2	...	Rasio S/N k
Kombinasi 1	$X_1(1)$	$X_1(2)$...	$X_1(k)$
Kombinasi 2	$X_2(1)$	$X_2(2)$...	$X_2(k)$
...
Kombinasi i	$X_i(1)$	$X_i(2)$...	$X_i(k)$



Cara yang digunakan untuk proses normalisasi sesuai dengan karakteristik respon yang meliputi semakin besar semakin baik (*larger the better*), semakin kecil semakin baik (*smaller the better*) dan tertuju pada nilai tertentu (*nominal the best*). Persamaan yang digunakan dalam proses normalisasi untuk respon dengan karakteristik “semakin besar semakin baik” (Huang dan Liao, 2003) adalah:

$$X_i^*(k) = \frac{X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \quad (2.56)$$

Proses normalisasi untuk respon dengan karakteristik “semakin kecil semakin baik” menggunakan persamaan sebagai berikut (Huang dan Liao, 2003):

$$X_i^*(k) = \frac{\max_{\forall k} X_i(k) - X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \quad (2.57)$$

Persamaan yang digunakan dalam proses normalisasi untuk respon dengan karakteristik “tertuju pada nilai tertentu” adalah (Huang dan Liao, 2003):

$$X_i^*(k) = 1 - \frac{|X_i(k) - X_{ob}(k)|}{\max_{\forall k} X_i(k) - X_{ob}(k)} \quad (2.58)$$

dengan:

$\max_{\forall k} X_i(k)$ = nilai terbesar dari $X_i(k)$

$\min_{\forall k} X_i(k)$ = nilai terkecil dari $X_i(k)$

$X_{ob}(k)$ = nilai target dari $X_i(k)$

3. Menentukan *deviation sequence* $\Delta_{0,i}(k)$

Deviation sequence $\Delta_{0,i}(k)$ adalah selisih absolut antara nilai maksimum hasil normalisasi yang besarnya satu dengan data yang telah dinormalisasi.

Penentuan *deviation sequence* dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut (Datta dan Mahapatra, 2010):

$$\Delta_{0,i}(k) = |X_0(k) - X_i^*(k)| \quad (2.59)$$



4. Menentukan *grey relational coefficient* $\xi_i(k)$

Grey relational coefficient menunjukkan hubungan antara kondisi yang ideal (terbaik) dengan kondisi aktual dari respon yang dinormalisasi. *Grey relational coefficient* (GRC) akan bernilai satu apabila respon yang dinormalisasikan tersebut cocok dengan kondisi yang ideal. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan nilai tersebut adalah (Datta dan Mahapatra, 2010):

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{0,i}(k) + \zeta \Delta_{max}} \quad (2.60)$$

dengan:

$$\Delta_{min} = \min_i \min_k \Delta_{0,i}(k)$$

$$\Delta_{max} = \max_i \max_k \Delta_{0,i}(k)$$

ζ = *distinguish coefficient*.

Pada umumnya nilai *distinguish coefficient* diatur berdasarkan kebutuhan dan besarnya antara 0 dan 1. Nilai *distinguish coefficient* yang digunakan pada umumnya adalah 0,5 (Tosun, 2006). Nilai *grey relational coefficient* yang tinggi menunjukkan bahwa hasil eksperimen memiliki hubungan yang dekat dengan nilai normalisasi yang terbaik pada respon tersebut.

5. Tahap *fuzzification*

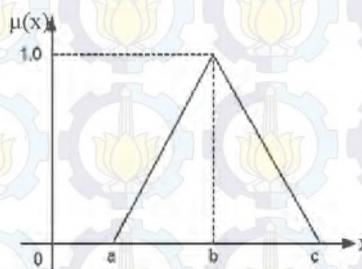
Fuzzification merupakan proses perubahan nilai awal, yaitu *grey relation coefficient* menjadi bilangan *fuzzy* dengan menggunakan fungsi keanggotaan. Fungsi keanggotaan (*membership function*) adalah suatu kurva yang digunakan untuk menunjukkan pemetaan titik-titik *input* data ke dalam nilai keanggotaannya (sering juga disebut dengan derajat keanggotaan). Interval nilai keanggotaan yang digunakan adalah antara 0 sampai 1. Pendekatan fungsi digunakan sebagai salah satu cara untuk mendapatkan nilai keanggotaan. Ada dua fungsi keanggotaan yang umum digunakan dalam penelitian, yaitu fungsi keanggotaan kurva segitiga dan kurva trapesium.



Fungsi keanggotaan kurva segitiga pada dasarnya merupakan gabungan antara 2 garis linear, yaitu fungsi linier naik dan fungsi linier turun. Fungsi keanggotaan kurva segitiga adalah sebagai berikut:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}; & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases} \quad (2.61)$$

Fungsi keanggotaan kurva segitiga ditunjukkan pada Gambar 2.16.

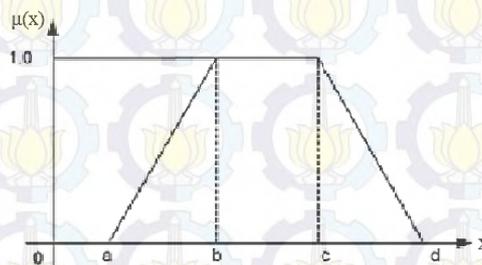


Gambar 2.16 Fungsi keanggotaan kurva segitiga

Fungsi keanggotaan kurva trapesium pada dasarnya seperti bentuk segitiga, hanya saja ada beberapa titik yang memiliki nilai keanggotaan sama, yaitu bernilai satu. Fungsi keanggotaan kurva trapesium adalah sebagai berikut:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ 1; & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{c-d}; & c \leq x \leq d \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad (2.62)$$

Bentuk fungsi keanggotaan kurva trapesium ditunjukkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Fungsi keanggotaan kurva trapesium



6. Mengaplikasikan *fuzzy rules*

Fuzzy rules merupakan aturan yang menjelaskan mengenai hubungan antara *output* dan nilai-nilai tertentu pada masing-masing variabel *input*. Selain itu, *fuzzy rules* juga merupakan alat penarik kesimpulan akan menghasilkan nilai *fuzzy* berdasarkan logika *fuzzy*. Biasanya *fuzzy rules* dibuat berdasarkan pengelompokkan dengan bentuk batasan aturan *if-then* (jika-maka), contohnya sebagai berikut:

Aturan ke-1: Jika x_1 adalah A_1 , x_2 adalah B_1 , ..., dan x_k adalah Y_1 maka y adalah Z_1 ,

Aturan ke-2: Jika x_1 adalah A_2 , x_2 adalah B_2 , ..., dan x_k adalah Y_2 maka y adalah Z_2 ,

Aturan -n : Jika x_1 adalah A_n , x_2 adalah B_n , ..., dan x_k adalah Y_n maka y adalah Z_n ,

Derajat keragaman dari keanggotaan dari himpunan *fuzzy* akan dihitung berdasarkan nilai dari x_1 , x_2 , hingga x_k , dan y , sedangkan A , B hingga Y adalah himpunan *fuzzy* yang ditetapkan berdasarkan fungsi keanggotaan. Sebuah *output fuzzy* multi respon dihasilkan dengan menggunakan operasi *max-min inference* dan *fuzzy rule*. Apabila x_1 , x_2 , hingga x_3 adalah GRC, maka fungsi keanggotaan dari y yang merupakan *output* multi respon dapat dirumuskan sebagai berikut (Lin dan Lin, 2002):

$$\mu Z_0(y) = ((\mu A_1(x_1) \wedge \mu B_1(x_2) \wedge \mu C_1(x_3) \wedge \mu Z_1(x_3)) \vee \dots \vee ((\mu A_k(x_1) \wedge \mu B_k(x_2) \wedge \mu C_k(x_3) \wedge \mu Z_n(x_3))) \quad (2.63)$$

Dimana secara berturut-turut \wedge dan \vee adalah operasi minimum dan maksimum.

7. *Defuzzification*

Defuzzification merupakan perubahan nilai *fuzzy* menjadi *grey fuzzy reasoning grade* (GFRG) dengan cara melakukan pemetaan himpunan *fuzzy* ke himpunan tegas (*crisp*). Metode yang paling sering digunakan pada proses *defuzzification* adalah metode *centroid*. Pada metode ini, *defuzzification* yang dilakukan dengan cara mengambil titik pusat (z^*)



daerah *fuzzy*. Metode ini dapat dirumuskan sebagai berikut (Lin dan Lin, 2002):

$$Z^* = \frac{\int_z^n z \mu(z) dz}{\int_z^n \mu(z) dz} \quad (2.64)$$

atau dapat dirumuskan (Kusumadewi dan Purnomo, 2010) sebagai berikut:

$$Z^* = \frac{\sum_{j=1}^n z_j \mu(z_j)}{\sum_{j=1}^n \mu(z_j)} \quad (2.65)$$

dengan:

z^* = nilai GFRG

z_j = nilai domain ke- j

$\mu(z_j)$ = derajat keanggotaan

8. Menentukan kombinasi variabel proses untuk respon optimum

Semakin besar nilai GFRG, semakin baik pula respon dari proses pada kombinasi variabel-variabel tersebut. Penentuan kombinasi variabel terbaik diawali dengan membuat tabel respon dari GFRG seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.9.

Tabel 2.9 Tabel respon *grey fuzzy reasoning grade*

	Level 1	Level 2	Level j
Variabel 1	Y_{11}	-	Y_{1j}
Variabel 2	Y_{21}	-	Y_{2j}
-			
Variabel i	Y_{i1}	-	Y_{ij}
Max-Min	Q_1		Q_j

Y_{ij} adalah rata-rata nilai GFRG yang dikelompokkan berdasarkan variabel i dan level j . Grafik respon dibuat berdasarkan tabel respon untuk memudahkan pemilihan level dari variabel yang menghasilkan respon yang optimal.



9. Memprediksi nilai GFRG hasil optimasi

Nilai prediksi GFRG berdasarkan kombinasi level variabel proses untuk menghasilkan respon yang optimal dapat dihitung menggunakan rumus (Lin dan Lin, 2002):

$$\hat{\gamma} = \gamma_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\gamma}_i - \gamma_m) \quad (2.66)$$

dengan:

γ_m = nilai rata-rata dari keseluruhan GFRG

$\bar{\gamma}_i$ = rata-rata GFRG pada level optimal

q = jumlah variabel proses yang mempengaruhi respon secara signifikan

2.6 Interpretasi Hasil Eksperimen

Interpretasi yang dilakukan pada hasil eksperimen dengan menggunakan desain eksperimen Taguchi adalah sebagai berikut:

1. Persen kontribusi

Persen kontribusi digunakan untuk mengindikasikan kekuatan relatif sebuah faktor dan/atau interaksi untuk mengurangi variasi yang terjadi. Perhitungan persen kontribusi pada dasarnya adalah fungsi dari jumlah kuadrat dari masing-masing faktor yang signifikan.

Komponen-komponen yang dihitung dalam persen kontribusi adalah faktor dan *error*. Jika persen kontribusi *error* kurang dari lima belas persen, maka berarti tidak ada faktor yang berpengaruh terabaikan. Tetapi jika persen kontribusi *error* lebih dari lima belas persen, maka ada faktor yang berpengaruh terabaikan, sehingga *error* yang terjadi terlalu besar. Persen kontribusi suatu faktor dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Ross, 1996):

$$\rho = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100 \% \quad (2.67)$$

Dengan:

$$SS'_A = SS_A - \nu_A \cdot MS_E \quad (2.68)$$

SS_A = jumlah kuadrat dari faktor yang dihitung persen kontribusinya



SS_T = jumlah kuadrat total

ν_A = derajat kebebasan dari faktor yang dihitung persen kontribusinya

MS_E = rata-rata kuadrat dari faktor *error*

2. Interval keyakinan $(1-\alpha)$ 100% untuk kondisi optimum (Ross, 1996):

$$CI_1 = \sqrt{\frac{F_{\alpha,1,\nu_E} \cdot MS_E}{n_{eff}}} \quad (2.69)$$

$$\hat{\mu}_{prediksi} - CI_1 \leq \mu_{prediksi} \leq \hat{\mu}_{prediksi} + CI_1 \quad (2.70)$$

Dengan:

$\hat{\mu}_{prediksi}$ = dugaan rata-rata GFRG pada kombinasi optimal

$$n_{eff} = \frac{\text{Jumlah total eksperimen}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan faktor-faktor untuk menduga rata-rata}} \quad (2.71)$$

2.7 Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen konfirmasi merupakan langkah terakhir yang harus dilakukan pada penelitian tentang optimasi proses. Eksperimen ini dilaksanakan dengan melakukan percobaan yang menggunakan kombinasi level faktor-faktor hasil optimasi. Jumlah sampel untuk eksperimen konfirmasi harus lebih besar dari jumlah sampel pada saat eksperimen. Tujuan eksperimen konfirmasi adalah untuk melakukan validasi terhadap kesimpulan yang diambil pada tahap analisis, serta untuk mencocokkan hasil prediksi dengan hasil secara aktual (Ross, 1996).

Langkah-langkah dalam eksperimen konfirmasi dapat dijabarkan sebagai berikut:

- Melakukan percobaan berdasarkan kombinasi untuk respon optimum.
- Membandingkan rata-rata hasil percobaan konfirmasi dengan rata-rata hasil prediksi.

Eksperimen konfirmasi dinyatakan berhasil apabila:

- Rata-rata hasil eksperimen konfirmasi mendekati rata-rata hasil prediksi.
- Interval keyakinan dari rata-rata respon eksperimen konfirmasi berhimpit atau beririsan dengan interval keyakinan $(1-\alpha)$ 100% dari rata-rata respon hasil



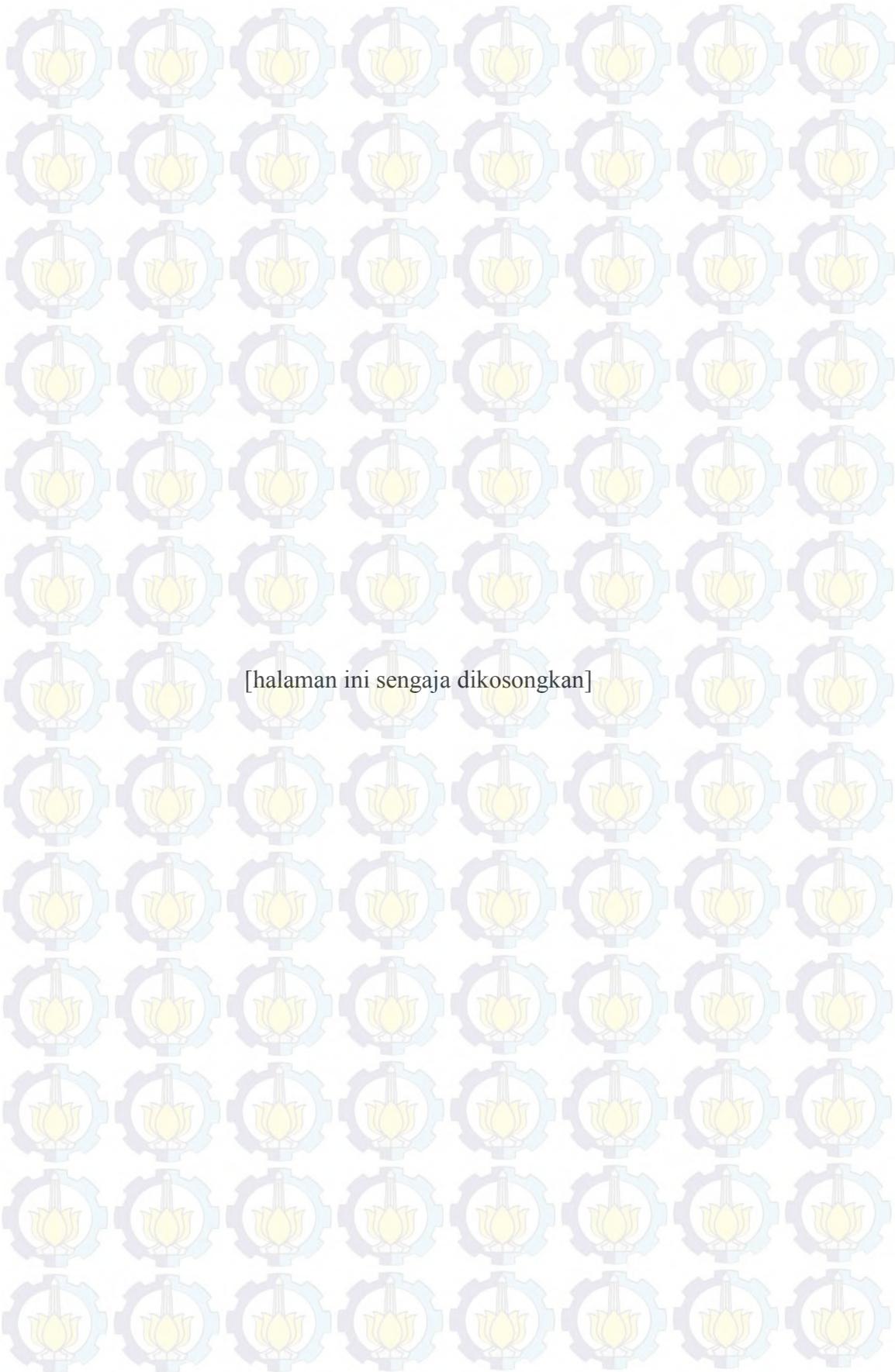
optimum. Interval keyakinan eksperimen konfirmasi dapat dihitung dengan menggunakan rumus (Ross, 1996):

$$CI_2 = \sqrt{F_{\alpha;1;v_E} \cdot MS_E \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right]} \quad (2.72)$$

$$\hat{\mu}_{konfirmasi} - CI_2 \leq \hat{\mu}_{konfirmasi} \leq \hat{\mu}_{konfirmasi} + CI_2 \quad (2.73)$$

Dengan:

r = Jumlah pengulangan dalam eksperimen konfirmasi



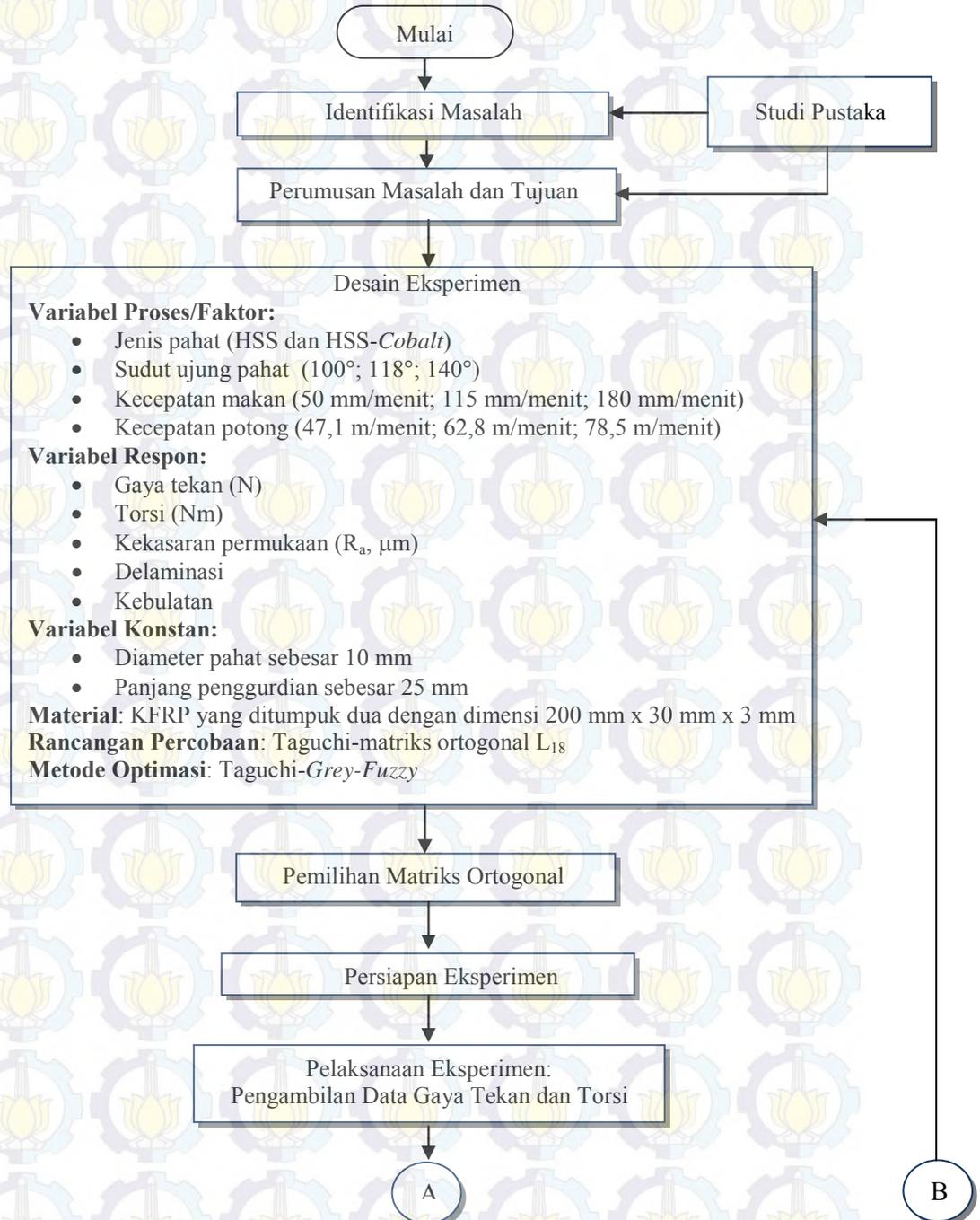
[halaman ini sengaja dikosongkan]



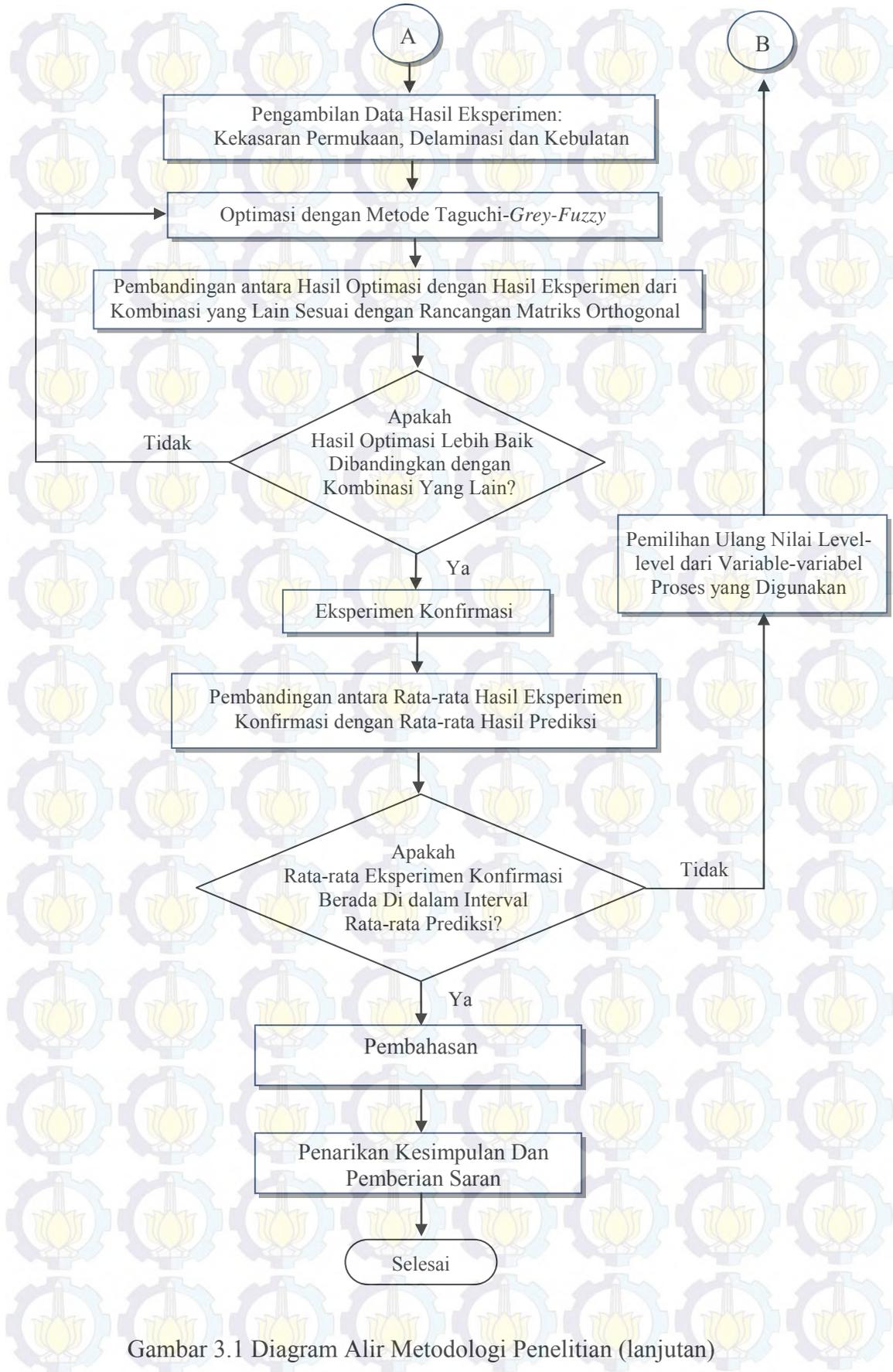
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan pada tesis ini mengikuti diagram alir yang ditunjukkan oleh Gambar 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian (lanjutan)



3.2 Variabel Penelitian

Data yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari hasil eksperimen. Variabel yang akan digunakan adalah sebagai berikut:

1. Variabel Proses

Variabel proses merupakan variabel yang dapat dikendalikan serta nilainya dapat ditentukan berdasarkan tujuan penelitian maupun pertimbangan yang lain.

Variabel proses yang akan digunakan pada penelitian ini adalah:

- a. Jenis pahat
- b. Sudut ujung pahat (PA , derajat)
- c. Kecepatan makan (V_f , mm/menit)
- d. Kecepatan potong (V_c , m/menit)

2. Variabel Respon

Variabel respon merupakan respon yang diamati dalam penelitian. Nilai variabel respon ini dipengaruhi oleh perlakuan yang diberikan dan tidak dapat ditentukan diawal. Variabel respon yang diamati pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Gaya tekan (F_z , N)
- b. Momen torsi (M_z , Nm)
- c. Kekasaran permukaan (R_a , μm)
- d. Delaminasi
- e. Kebulatan

3. Variabel Konstan

Variabel konstan merupakan variabel yang tidak diteliti dalam penelitian. Nilai variabel ini dijaga selalu konstan agar tidak berubah selama percobaan, sehingga tidak mempengaruhi hasil penelitian secara signifikan. Variabel-variabel konstan pada penelitian ini adalah:

- a. Diameter pahat sebesar 10 mm.
- b. Panjang penggurdian sebesar 25 mm.

3.3 Bahan dan Peralatan

Percobaan dilakukan dengan memberikan perlakuan tertentu yang dapat mempengaruhi nilai respon. Sebelum melakukan percobaan dilakukan persiapan-



persiapan terhadap benda kerja, pahat, mesin gurdi, peralatan pengukuran dan peralatan bantu yang akan digunakan.

1. Benda kerja

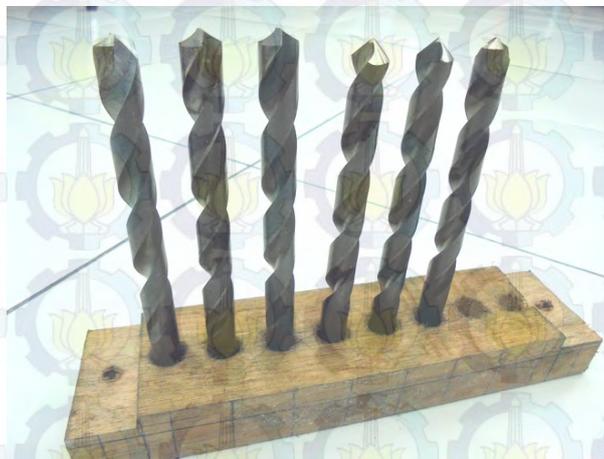
Material yang digunakan adalah KFRP atau *aramid epoxy* yang ditumpuk dua dengan dimensi 30 x 200 x 3 mm yang diperoleh dari PT. Dirgantara Indonesia. Material KFRP ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Benda kerja KFRP

2. Pahat

Pahat yang digunakan pada penelitian ini adalah *twist drill* diameter 10 mm dengan material HSS dan HSS-Cobalt. Sudut ujung pahat yang digunakan adalah 100°, 118° dan 140°. Pahat *twist drill* HSS dan HSS-Cobalt ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Pahat *twist drill* HSS dan HSS-Cobalt



3. Mesin Freis CNC

Penelitian ini menggunakan mesin freis CNC YCM MV 86A untuk proses penggurdian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4 dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Merk : YCM
- Negara Pembuat : Taiwan
- Model : MV 86A
- Panjang gerak sumbu X : 850 mm
- Panjang gerak sumbu Y : 600 mm
- Panjang gerak sumbu Z : 600 mm
- Putaran spindle : 8.000 rpm



Gambar 3.4 Mesin CNC YCM MV 86A

4. Dinamometer

Dinamometer yang digunakan dalam penelitian ini adalah dinamometer merek Kistler tipe 9272. Gaya yang diukur dengan menggunakan dinamometer pada saat proses penggurdian dilakukan adalah gaya tekan



dan torsi (F_z dan M_z). Dinamometer Kistler 9272 ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Dinamometer tipe 9272

5. Alat akuisisi data tipe 5697A

Alat akuisisi data yang digunakan dalam penelitian ini adalah DAQ Kistler tipe 5697A yang terhubung dengan *software* DynoWare pada komputer melalui kabel USB. DAQ ini digunakan untuk mengolah dan memperbesar sinyal dan memiliki 8 *channel output* dengan resolusi yang tinggi. Alat ini juga dapat mengukur sampel hingga frekuensi 125 kS/s, sehingga dapat dilakukan pengukuran pada proses dinamis. DAQ Kistler tipe 5697A ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Akuisisi data tipe 5697A

6. *Charge amplifier* type 5070A

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



Gambar 3.7 Charge amplifier type 5070A

7. *Notebook*

Notebook Compaq Presario digunakan untuk menampilkan dan mengolah data hasil percobaan. *Notebook* yang sudah memiliki perangkat lunak DynoWare dari Kistler ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 *Notebook* Compaq presario CQ35-336TX

8. *Roundtest* Roncorder EC-3D

Roundtest digunakan untuk mengukur kebulatan pada material hasil penggurdian. *Roundtest* ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 *Roundtest Roncorder EC-3D*

9. *Surface roughness tester*

Pengukuran angka kekasaran permukaan pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan Mitutoyo *surf test* 310 yang memiliki kecermatan sebesar $0,1 \mu\text{m}$. Gambar 3.10 menunjukkan alat ukur Mitutoyo *surf test* 310.



Gambar 3.10 Mitutoyo *Surf test* 310

10. Kamera digital

Kamera digital digunakan untuk mengambil gambar/foto lubang hasil penggurdian yang nantinya akan diukur faktor delaminasinya dengan menggunakan *software* Auto Cad. Kamera digital yang digunakan ialah kamera digital merk Sony dengan spesifikasi 20.1 *mega pixels* dan 6x *optical zoom*. Kamera digital ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Kamera digital Sony

11. Mistar insut

Pada penelitian ini digunakan mistar insut merek Mitutoyo seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.12. Mistar insut yang digunakan mempunyai kecermatan 0,05 mm. Panjang maksimum yang dapat diukur dengan menggunakan alat ini adalah 16 cm.



Gambar 3.12 Mistar insut Merek Mitutoyo

12. *Drill resharpening grinder*

Drill resharpening grinder digunakan untuk membentuk sudut ujung pahat sesuai dengan level variabel proses yang telah ditentukan sebelumnya, yaitu 100° , 118° , dan 140° . Proses pembentukan sudut ujung pahat ini menggunakan *drill resharpening grinder* merk Vertex seperti yang ditunjukkan Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Drill reshaping grinder

3.4 Rancangan Percobaan

3.4.1 Pengaturan Variabel Proses pada Mesin Gurdi

Pengaturan variabel proses pada mesin gurdi dirujuk dari penelitian-penelitian sebelumnya. Penentuan pengaturan variabel proses yang digunakan pada eksperimen ini ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Variabel Proses dan Pengaturan Level

Variabel proses			Level 1	Level 2	Level 3
A	Jenis pahat	mm	HSS	HSS-Cobalt	-
B	Sudut ujung pahat	derajat	100	118	140
C	Kecepatan makan	mm/menit	50	115	180
D	Kecepatan potong	m/menit	47,1	62,8	78,5

Variabel konstan yang dipertahankan dalam penelitian ini adalah:

- Diameter pahat sebesar 10 mm.
- Panjang penggurdian sebesar 25 mm.

3.4.2 Pemilihan Matriks Ortogonal

Matriks ortogonal yang digunakan harus memiliki derajat kebebasan yang sama atau lebih besar dari total derajat kebebasan variabel proses dan level yang



telah ditetapkan. Derajat kebebasan variabel proses dan level tersebut ditunjukkan pada Tabel 3.2 sebagai berikut:

Tabel 3.2 Total Derajat Kebebasan Faktor dan Level

No	Variabel proses	Jumlah level (k)	$v_n = (k-1)$
1	Jenis Pahat (A)	2	1
2	Sudut ujung pahat (B)	3	2
3	Kecepatan makan (C)	3	2
4	Kecepatan potong (D)	3	2
Total derajat kebebasan		7	

Tabel 3.2 menunjukkan bahwa total derajat kebebasan faktor dan level yang digunakan adalah tujuh. Hal ini mengakibatkan derajat kebebasan minimum yang harus dimiliki oleh matriks ortogonal yang digunakan adalah tujuh. Oleh karena itu, sesuai dengan pilihan yang tersedia, matriks ortogonal L_{18} memenuhi syarat untuk dijadikan sebagai rancangan percobaan. Penempatan variabel proses pada kolom adalah sebagai berikut:

- Variabel proses jenis pahat ditempatkan pada kolom 1
- Variabel proses sudut ujung pahat ditempatkan pada kolom 2
- Variabel proses gerak makan ditempatkan pada kolom 3
- Variabel proses putaran spindel ditempatkan pada kolom 4

Eksperimen ini tidak mengakomodasi adanya interaksi antar faktor. Rancangan percobaan matriks ortogonal L_{18} ditunjukkan oleh Tabel 3.3 sebagai berikut:



Tabel 3.3 Rancangan Percobaan Taguchi

Kombinasi ke-	Variabel Proses			
	Jenis Pahat	PA	V _f	V _c
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	1
5	1	2	2	2
6	1	2	3	3
7	1	3	1	2
8	1	3	2	3
9	1	3	3	1
10	2	1	1	3
11	2	1	2	1
12	2	1	3	2
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2

Eksperimen dilakukan secara acak dan mengacu pada Tabel 3.3. Pengacakan ini dilakukan dengan menggunakan bantuan *software Minitab 16*. Masing-masing eksperimen dilakukan dengan replikasi sebanyak dua kali untuk mengatasi faktor gangguan (*noise*) yang terjadi selama proses pemotongan berlangsung. Bila data hasil eksperimen dikumpulkan sesuai dengan kombinasi seting variabel proses yang sejenis, maka tampilan data yang akan diperoleh ditunjukkan oleh Tabel 3.4 sebagai berikut:

Tabel 3.4 Tampilan Data Hasil Eksperimen

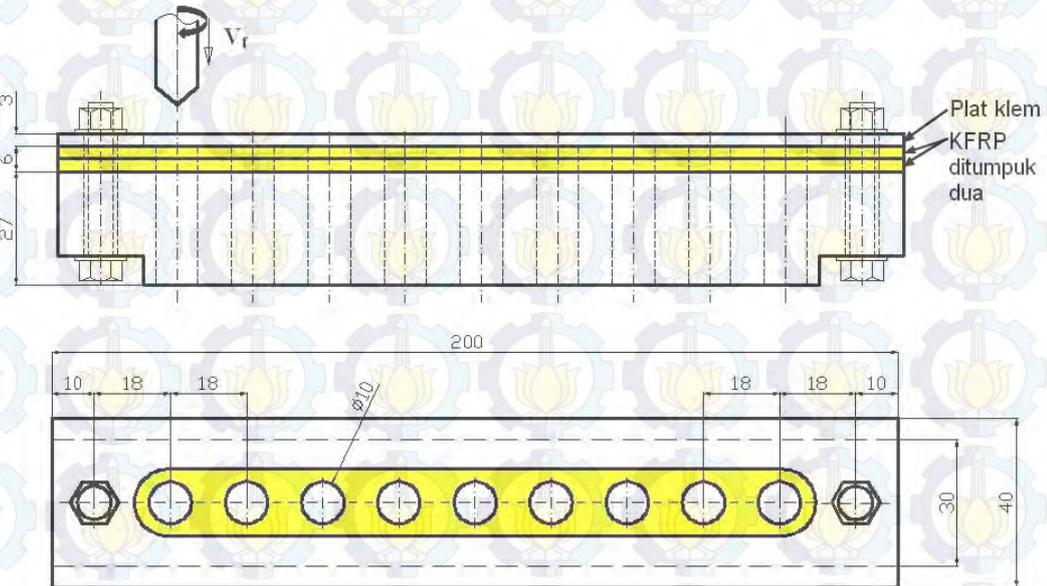
Kombinasi ke-	Gaya tekan		Torsi		Kekasaran permukaan		Kebulatan		Delaminasi	
	(N)		(N/m)							
	R1	R2	R1	R2	R1	R2	R1	R2	R1	R2
1	Y ₁₁₁	Y ₁₁₂	Y ₁₂₁	Y ₁₂₂	Y ₁₃₁	Y ₁₃₂	Y ₁₄₁	Y ₁₄₂	Y ₁₅₁	Y ₁₅₂
2	Y ₂₁₁	Y ₂₁₂	Y ₂₂₁	Y ₂₂₂	Y ₂₃₁	Y ₂₃₂	Y ₂₄₁	Y ₂₄₂	Y ₂₅₁	Y ₂₅₂
3	Y ₃₁₁	Y ₃₁₂	Y ₃₂₁	Y ₃₂₂	Y ₃₃₁	Y ₃₃₂	Y ₃₄₁	Y ₃₄₂	Y ₃₅₁	Y ₃₅₂
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
i	Y _{ijk}	Y _{ijk}	Y _{ijk}	Y _{ijk}	Y _{ijk}	Y _{ijk}				



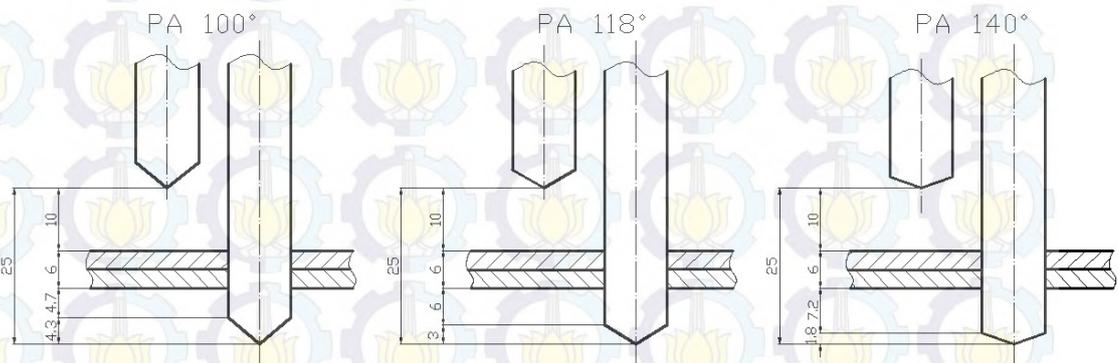
Keterangan:

Y_{ijk} adalah data respon untuk kombinasi kombinasi variable proses ke- i , respon ke- j , dan replikasi ke- k . Dengan $i = 1, 2, \dots, 18$; $j = 1, 2, \dots, 5$; $k = 1, 2$

Gambar 3.14 menunjukkan skema proses penggurdian benda kerja dengan jarak antar penggurdian sebesar 18 mm. Panjang penggurdian benda kerja diatur konstan sebesar 25 mm seperti ditunjukkan Gambar 3.15.



Gambar 3.14 Skema proses penggurdian benda kerja



Gambar 3.15 Panjang penggurdian benda kerja



3.5 Prosedur Percobaan

Langkah-langkah percobaan yang akan dilakukan pada penelitian ini untuk mendapatkan data gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan, kebulatan, dan delaminasi adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan spesimen uji yang meliputi penyesuaian ukuran, pemberian tanda/titik pada spesimen yang akan digurdi, pembersihan spesimen dari kotoran-kotoran yang dapat mengganggu proses penggurdian dan penomoran spesimen.
2. Memasang dinamometer beserta kelengkapannya pada mesin gurdi.
3. Menghubungkan dinamometer dan *charge amplifier* KISTLER tipe 5070A dengan kabel koneksi tipe KISTLER 16775A.
4. Menghubungkan *charge amplifier* KISTLER tipe 5070A dan DAQ KISTLER tipe 5697 dengan kabel koneksi 1700A111A2 dan 1200A27.
5. Menghubungkan sistem DAQ KISTLER tipe 5697A dan *notebook* dengan kabel USB.
6. Menghubungkan *charge amplifier* KISTLER tipe 5070A dan sistem DAQ KISTLER tipe 5697A ke sumber listrik dengan kabel *power* listrik.
7. Memasang spesimen uji pada dinamometer dengan *jig* yang tersedia pada mesin dan menjepit bagian spesimen yang tidak mengalami proses penggurdian.
8. Memasang pahat *twist drill* berdiameter 10 mm dan mengatur posisinya agar tepat pada tanda/titik yang telah disiapkan.
9. Memasang pahat baru pada pemegang pahat.
10. Menyalakan mesin gurdi dan menyeting variabel-variabel proses yang telah ditetapkan sesuai dengan rancangan percobaan.
11. Melaksanakan proses penggurdian sesuai dengan seting variabel proses yang telah ditentukan.
12. Menyimpan data grafik gaya tekan dan torsi yang diperoleh dari dinamometer untuk selanjutnya diolah sebagai data variabel respon penelitian.
13. Mengulang langkah ketujuh hingga keduabelas untuk kombinasi variabel proses berikutnya.

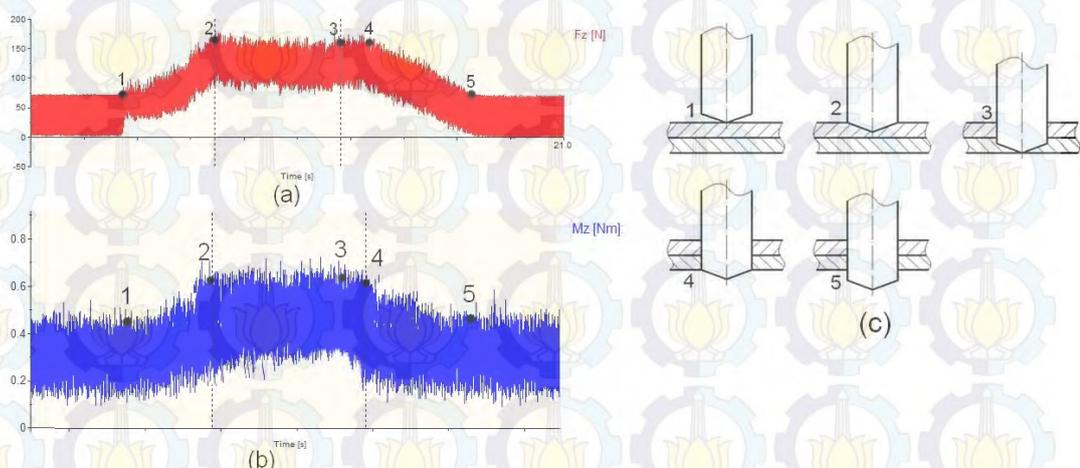


14. Melepas specimen uji setelah proses penggurdian selesai.
15. Mengukur kekasaran permukaan dengan menggunakan *surface roughness tester*.
16. Mengukur kebulatan lubang hasil penggurdian dengan menggunakan *Roundtest*.
17. Mengambil gambar lubang dengan kamera kemudian mengukur delaminasi lubang dengan bantuan *software* Auto Cad.

3.6 Pengukuran dan Pengambilan Data

3.6.1 Pengambilan Data Torsi dan Gaya Tekan

Gaya tekan dan torsi yang diukur dengan menggunakan dinamometer selama proses pemotongan dapat dilihat pada grafik yang ditampilkan oleh *software Dyno Wire* (Tanoto, 2013). Gambar 3.16 a) dan b) menunjukkan grafik hasil pengukuran gaya tekan dan torsi oleh dinamometer. Gaya tekan yang digunakan dalam penelitian ini adalah gaya rata-rata diantara titik 2 dan titik 3. Titik 2 merupakan posisi dimana seluruh sisi potong pahat telah berada di dalam benda kerja dan titik 3 merupakan posisi dimana ujung pahat sesaat akan menembus benda kerja. Torsi yang digunakan dalam penelitian ini adalah torsi rata-rata diantara titik 2 dan titik 4. Titik 4 merupakan posisi dimana seluruh sisi potong pahat sesaat akan menembus benda kerja.



Gambar 3.16 a). Grafik pengukuran gaya tekan. b). Grafik pengukuran torsi. c). Posisi pahat terhadap grafik gaya tekan dan torsi.



Grafik dinamometer menampilkan gaya tekan dan torsi sebagai fungsi dari waktu, sehingga untuk mencari rata-rata gaya tekan maupun torsi dari titik 2 sampai ke titik 3 perlu menghitung waktu penggurdian. Waktu penggurdian dapat dihitung dengan rumus 2.8, akan tetapi L_t (panjang total) diganti dengan L_h (panjang hitung) (Tanoto, 2013).

$$L_h = L_m - L_{up}$$

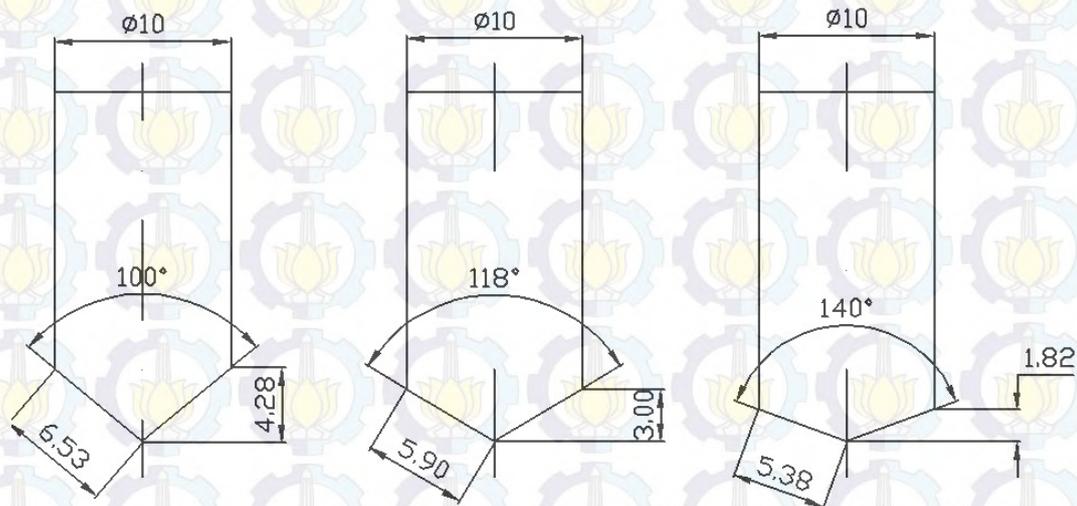
Dengan

L_h = Panjang material yang digunakan untuk menghitung gaya tekan dan torsi (mm)

L_m = Panjang total material (mm)

L_{up} = Panjang ujung pahat (mm)

Panjang ujung pahat dan lebar pemotongan (b) tergantung pada sudut ujung pahatnya, Gambar 3.17 menunjukkan panjang ujung pahat (L_{up}) dan lebar pemotongan (b) untuk masing-masing pahat.



Gambar 3.17 Panjang ujung pahat (L_{up})

3.6.2 Pengambilan Data Kekasaran Permukaan

Langkah-langkah dari pengukuran kekasaran permukaan adalah sebagai berikut:

1. Melakukan kalibrasi sensor pada *surface roughness tester*.
2. Meletakkan spesimen uji di meja rata.



3. Menyentuhkan ujung sensor dari *surface roughness tester* pada spesimen uji.
4. Mengaktifkan *surface roughness tester* untuk melakukan proses pengukuran kekasaran permukaan sepanjang 3 mm. Angka kekasaran permukaan yang diamati adalah kekasaran aritmatika (R_a) yang dinyatakan dalam μm .
5. Hasil kekasaran permukaan dapat dilihat pada layar *display surface roughness tester*.
6. Mengulang langkah ketiga hingga kelima untuk mendapatkan hasil kekasaran permukaan pada spesimen uji yang sama. Hal ini dilakukan berulang hingga mendapatkan 2 data nilai R_a untuk tiap spesimen uji.

3.6.3 Pengambilan Data Kebulatan

Kebulatan lubang hasil penggurdian diukur dengan menggunakan *Roundtest*. Adapun langkah-langkah untuk mengukur kebulatan ialah sebagai berikut:

1. Menyiapkan spesimen uji.
2. Meletakkan spesimen uji pada *Roundtest*.
3. Melakukan *setting Roundtest* dan benda kerja.
4. Mengaktifkan *Roundtest* untuk melakukan proses pengukuran kebulatan lubang hasil penggurdian.
5. Hasil kebulatan dapat dilihat pada gambar profil kebulatan dan kemudian diukur dengan mal kebulatan.
6. Mengulang langkah pertama hingga kelima untuk mendapatkan hasil kebulatan pada spesimen uji. Hal ini dilakukan berulang hingga mendapatkan 2 data nilai kebulatan untuk tiap spesimen uji.

3.6.3 Pengambilan Data Delaminasi

Langkah-langkah dari pengukuran delaminasi adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan specimen uji.
2. Mengambil semua gambar/foto lubang hasil penggurdian dengan menggunakan kamera.
3. Memasukkan gambar lubang hasil penggurdian ke dalam *software Auto Cad*.



4. Menentukan titik pusat lubang hasil penggurdian.
5. Mengukur D_{\max} lubang hasil penggurdian.
6. Menghitung faktor delaminasi dengan rumus 2.31.
7. Mengulang langkah ketiga hingga keenam untuk mendapatkan hasil delaminasi pada spesimen uji yang sama. Hal ini dilakukan berulang hingga mendapatkan 2 data nilai faktor delaminasi untuk tiap spesimen uji.

3.7 Karakteristik Respon Optimal

Karakteristik respon optimal yang digunakan pada penelitian ini adalah semakin kecil semakin baik. Karakteristik semakin kecil semakin baik berlaku untuk gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan, kebulatan, dan delaminasi. Nilai gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan, kebulatan, dan delaminasi yang paling diharapkan adalah yang paling minimum.

3.8 Unit Logika Fuzzy

Unit logika *fuzzy* terdiri dari fuzzifikasi, fungsi keanggotaan, aturan *fuzzy*, mesin inferensi *fuzzy* dan defuzzifikasi. Pertama, fuzzifikasi menggunakan fungsi keanggotaan untuk mengubah koefisien *grey-relational* masing-masing respon menjadi himpunan *fuzzy*. Selanjutnya, mesin inferensi melakukan penalaran *fuzzy* sesuai dengan aturan (*rule*) untuk menghasilkan nilai *fuzzy*. Akhirnya, defuzzifikasi mengkonversi nilai *fuzzy* menjadi *grey fuzzy reasoning grade* (GFRG). Seluruh proses pada unit ini dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat komputasi numerik dengan fasilitas *toolbox fuzzy* pada perangkat lunak MATLAB.



BAB 4

OPTIMASI MULTI RESPON DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Hasil Percobaan

Hasil percobaan diperoleh dengan mengkombinasikan faktor-faktor pada proses penggurdian yang diduga memiliki pengaruh terhadap respon yang diteliti berdasarkan rancangan percobaan Taguchi berupa matriks ortogonal $L_{18} (2^1 \times 3^3)$. Faktor-faktor tersebut meliputi jenis pahat, sudut ujung pahat, kecepatan makan dan kecepatan potong.

Percobaan dilakukan secara acak dengan dua kali replikasi untuk mengatasi *noise* yang terjadi selama proses pemesinan. Proses penggurdian dilakukan dengan jarak yang telah ditentukan. Pengambilan data dilakukan dengan urutan langkah sebagai berikut:

a. Pengukuran gaya tekan dan torsi

Gaya tekan dan torsi dapat diukur secara langsung dengan menggunakan dinamometer pada saat proses pemotongan.

b. Pengukuran kekasaran permukaan

Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan dengan menggunakan alat *Surfetest* Mitutoyo SJ-310. Pengukuran dilakukan sebanyak empat kali untuk masing-masing kombinasi pada setiap replikasi dan dirata-ratakan. Data tersebut dapat dilihat pada Lampiran 3.

c. Pengukuran delaminasi

Pengukuran delaminasi dilakukan dengan cara pengambilan gambar lubang hasil penggurdian pada keempat permukaan benda kerja dengan menggunakan kamera digital. Setelah dilakukan pengambilan gambar lubang, kemudian dilakukan pengukuran diameter maksimum pada area delaminasi yang diamati dan diameter lubang nominal dengan menggunakan bantuan perangkat lunak AutoCAD. Setelah itu dilakukan perhitungan faktor delaminasi dengan menggunakan persamaan 2.27. Dari pengukuran tersebut didapatkan data rata-rata delaminasi pada



masing-masing lubang hasil penggurdian. Data dapat dilihat pada Lampiran 4.

d. Pengukuran kebulatan

Pengukuran kebulatan dilakukan dengan menggunakan *roncorder* Kosaka EC-3D. Hasil pengukuran berupa gambar profil kebulatan dan diukur dengan mal kebulatan untuk mendapatkan nilai ketidakbulatan lubang. Pengukuran dilakukan pada kedua *sheet* benda kerja dan kemudian dirata-ratakan. Data tersebut dapat dilihat pada Lampiran 5.

Hasil percobaan secara keseluruhan ditunjukkan pada Tabel 4.1 dan selanjutnya data diolah sesuai dengan langkah-langkah optimasi yang ditunjukkan pada Gambar 2.15.

Tabel 4.1 Data hasil percobaan

Komb.	Fz (N)		Mz (Nm)		Ra (μm)		DL		KB (μm)	
	R1	R2	R1	R2	R1	R2	R1	R2	R1	R2
1	32,16	31,36	0,749	0,869	1,988	1,848	1,093	1,103	170	190
2	67,84	68,64	1,138	1,018	2,219	2,079	1,085	1,095	220	220
3	97,81	98,61	0,916	1,036	2,945	2,805	1,327	1,337	260	260
4	76,35	75,95	0,558	0,458	3,112	3,164	1,310	1,306	250	230
5	46,73	46,33	0,362	0,462	2,960	3,012	1,168	1,164	290	310
6	129,10	129,50	2,049	1,949	3,763	3,711	1,423	1,419	400	400
7	46,15	45,15	0,662	0,722	1,900	1,938	1,277	1,293	260	300
8	167,00	168,00	1,065	1,005	3,358	3,320	1,430	1,414	390	370
9	210,70	211,70	1,601	1,541	3,045	3,083	1,495	1,511	400	400
10	83,40	84,00	0,103	0,153	2,227	2,165	1,047	1,037	190	210
11	53,13	52,53	1,621	1,571	2,376	2,438	1,178	1,187	220	220
12	72,27	71,67	1,695	1,745	2,133	2,071	1,152	1,142	210	190
13	58,09	58,59	0,416	0,310	1,955	2,035	1,081	1,086	190	170
14	108,55	108,05	0,924	1,030	3,044	2,964	1,291	1,286	270	290
15	96,75	97,25	1,616	1,510	2,839	2,919	1,335	1,340	330	310
16	124,47	123,73	0,522	0,564	2,047	1,939	1,254	1,240	210	230
17	173,87	173,13	0,380	0,338	2,578	2,686	1,242	1,228	260	260
18	166,83	167,57	1,324	1,366	2,026	1,918	1,300	1,313	290	270

Sumber: Hasil pengukuran



4.2. Perhitungan Rasio S/N

Metode Taguchi menggunakan pendekatan rasio S/N untuk meneliti faktor *noise* terhadap variasi yang timbul. Perhitungan nilai rasio S/N tergantung pada jenis karakteristik kualitas dari masing-masing respon. Respon gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan, delaminasi dan kebulatan memiliki karakteristik semakin kecil semakin baik. Nilai rasio S/N dihitung dengan menggunakan persamaan 2.53.

Contoh perhitungan rasio S/N gaya tekan dengan karakteristik kualitas respon semakin kecil semakin baik pada kombinasi pertama adalah sebagai berikut.

$$S/N = -10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} \right]$$

$$S/N = -10 \log \left[\frac{(32,16^2) + (31,36^2)}{2} \right]$$

$$S/N = -10 \log 1008,8576$$

$$S/N = -30,038$$

Sesuai dengan rumus perhitungan rasio S/N untuk setiap karakteristik kualitas pada masing-masing respon, nilai rasio S/N gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan, delaminasi dan kebulatan ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data rasio S/N

Komb.	Variabel Proses				Rasio S/N				
	DT	PA	Vf	Vc	Fz	Mz	Ra	DL	KB
1	HSS	100	50	47,1	-30,04	1,84	-5,66	-0,81	-45,11
2	HSS	100	115	62,8	-36,68	-0,65	-6,64	-0,75	-46,85
3	HSS	100	180	78,5	-39,84	0,21	-9,17	-2,49	-48,30
4	HSS	118	50	47,1	-37,63	5,88	-9,93	-2,33	-47,60
5	HSS	118	115	62,8	-33,35	7,70	-9,50	-1,33	-49,54
6	HSS	118	180	78,5	-42,23	-6,02	-11,45	-3,05	-52,04
7	HSS	140	50	62,8	-33,19	3,20	-5,66	-2,18	-48,94
8	HSS	140	115	78,5	-44,48	-0,30	-10,47	-3,06	-51,60
9	HSS	140	180	47,1	-46,49	-3,92	-9,73	-3,54	-52,04
10	HSS-Co	100	50	78,5	-38,45	17,86	-6,83	-0,36	-46,02
11	HSS-Co	100	115	47,1	-34,46	-4,06	-7,63	-1,46	-46,85
12	HSS-Co	100	180	62,8	-37,14	-4,71	-6,45	-1,19	-46,02
13	HSS-Co	118	50	62,8	-35,32	8,80	-6,00	-0,69	-45,11
14	HSS-Co	118	115	78,5	-40,69	0,20	-9,55	-2,20	-48,94
15	HSS-Co	118	180	47,1	-39,74	-3,88	-9,18	-2,53	-50,10



Tabel 4,2 Data rasio S/N (lanjutan)

Komb.	Variabel Proses				Rasio S/N				
	DT	PA	Vf	Vc	Fz	Mz	Ra	DL	KB
16	HSS-Co	140	50	78,5	-41,88	5,30	-5,99	-1,92	-46,85
17	HSS-Co	140	115	47,1	-44,79	8,90	-8,41	-1,83	-48,30
18	HSS-Co	140	180	62,8	-44,46	-2,57	-5,90	-2,32	-48,94
				Max	-30,03	17,85	-5,65	-0,35	-45,10
				Min	-46,49	-6,01	-11,45	-3,53	-52,04

Sumber: Hasil perhitungan

4.3. Normalisasi Rasio S/N

Normalisasi dilakukan untuk mentransformasi nilai rasio S/N menjadi nilai yang besarnya antara nol sampai satu. Proses normalisasi dilakukan berdasarkan karakteristik kualitas respon rasio S/N. Karakteristik kualitas untuk rasio S/N adalah semakin besar semakin baik. Karakteristik kualitas ini berlaku untuk semua rasio S/N dari masing-masing respon. Perhitungan rasio S/N dilakukan menggunakan persamaan 2.56.

Contoh perhitungan normalisasi rasio S/N untuk respon gaya tekan pada kombinasi pertama adalah sebagai berikut:

$$X_i^*(k) = \frac{X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)}$$

$$X_1^*(1) = \frac{-30,04 - (-46,49)}{-30,04 - (-46,49)}$$

$$X_1^*(1) = 1,000$$

Hasil perhitungan normalisasi rasio S/N masing-masing respon pada setiap kombinasi ditunjukkan pada Tabel 4.3 sebagai berikut.

Tabel 4.3 Data normalisasi rasio S/N

Komb.	Rasio S/N					Normalisasi Rasio S/N				
	Fz	Mz	Ra	DL	KB	Fz	Mz	Ra	DL	KB
1	-30,04	1,84	-5,66	-0,81	-45,11	1,0000	0,3291	1,0000	0,8581	1,0000
2	-36,68	-0,65	-6,64	-0,75	-46,85	0,5963	0,2247	0,8295	0,8758	0,7487
3	-39,84	0,21	-9,17	-2,49	-48,30	0,4041	0,2609	0,3931	0,3295	0,5395
4	-37,63	5,88	-9,93	-2,33	-47,60	0,5384	0,4984	0,2619	0,3800	0,6397
5	-33,35	7,70	-9,50	-1,33	-49,54	0,7984	0,5747	0,3364	0,6939	0,3603
6	-42,23	-6,02	-11,45	-3,05	-52,04	0,2590	0,0000	0,0000	0,1533	0,0000
7	-33,19	3,20	-5,66	-2,18	-48,94	0,8085	0,3860	0,9992	0,4283	0,4467
8	-44,48	-0,30	-10,47	-3,06	-51,60	0,1224	0,2395	0,1688	0,1518	0,0642



Tabel 4.3 Data normalisasi rasio S/N (lanjutan)

Komb.	Rasio S/N					Normalisasi Rasio S/N				
	Fz	Mz	Ra	DL	KB	Fz	Mz	Ra	DL	KB
9	-46,49	-3,92	-9,73	-3,54	-52,04	0,0000	0,0877	0,2977	0,0000	0,0000
10	-38,45	17,86	-6,83	-0,36	-46,02	0,4885	1,0000	0,7971	1,0000	0,8681
11	-34,46	-4,06	-7,63	-1,46	-46,85	0,7314	0,0819	0,6595	0,6544	0,7487
12	-37,14	-4,71	-6,45	-1,19	-46,02	0,5682	0,0547	0,8627	0,7377	0,8681
13	-35,32	8,80	-6,00	-0,69	-45,11	0,6790	0,6207	0,9410	0,8944	1,0000
14	-40,69	0,20	-9,55	-2,20	-48,94	0,3525	0,2605	0,3273	0,4203	0,4467
15	-39,74	-3,88	-9,18	-2,53	-50,10	0,4107	0,0895	0,3911	0,3184	0,2795
16	-41,88	5,30	-5,99	-1,92	-46,85	0,2806	0,4742	0,9425	0,5101	0,7487
17	-44,79	8,90	-8,41	-1,83	-48,30	0,1038	0,6248	0,5255	0,5361	0,5395
18	-44,46	-2,57	-5,90	-2,32	-48,94	0,1233	0,1442	0,9584	0,3819	0,4467

Sumber: Hasil perhitungan

4.4. Perhitungan Grey Relational Coefficient (GRC)

Nilai GRC pada masing-masing respon dihitung dengan menggunakan persamaan 2.60. Sebelum menghitung nilai GRC harus dihitung terlebih dahulu nilai *deviation squence* $\Delta_{0,i}(k)$ dari masing-masing respon. Perhitungan nilai $\Delta_{0,i}(k)$ dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.59.

Contoh perhitungan nilai $\Delta_{0,i}(k)$ untuk respon gaya tekan pada kombinasi pertama adalah sebagai berikut:

$$\Delta_{0,i}(k) = |X_0(k) - X_i^*(k)|$$

$$\Delta_{0,i}(1) = |1 - 1,000|$$

$$\Delta_{0,i}(1) = 0,000$$

Nilai GRC dihitung berdasarkan nilai $\Delta_{0,i}(k)$ dari masing-masing respon.

Contoh perhitungan nilai GRC untuk respon gaya tekan pada kombinasi pertama adalah sebagai berikut:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{0,i}(k) + \zeta \Delta_{\max}}$$

$$\xi_i(1) = \frac{0,000 + 0,5 \times 1,000}{0,000 + 0,5 \times 1,000}$$

$$\xi_i(1) = 1,000$$

Hasil perhitungan nilai $\Delta_{0,i}(k)$ dari masing-masing respon untuk setiap kombinasi ditunjukkan pada Tabel 4.4, dan nilai GRC ditunjukkan pada Tabel 4.5.



Tabel 4.4 *Deviation sequence*

Komb.	Deviation sequence				
	Fz	Mz	Ra	DL	KB
1	0,0000	0,6709	0,0000	0,1419	0,0000
2	0,4037	0,7753	0,1705	0,1242	0,2513
3	0,5959	0,7391	0,6069	0,6705	0,4605
4	0,4616	0,5016	0,7381	0,6200	0,3603
5	0,2016	0,4253	0,6636	0,3061	0,6397
6	0,7410	1,0000	1,0000	0,8467	1,0000
7	0,1915	0,6140	0,0008	0,5717	0,5533
8	0,8776	0,7605	0,8312	0,8482	0,9358
9	1,0000	0,9123	0,7023	1,0000	1,0000
10	0,5115	0,0000	0,2029	0,0000	0,1319
11	0,2686	0,9181	0,3405	0,3456	0,2513
12	0,4318	0,9453	0,1373	0,2623	0,1319
13	0,3210	0,3793	0,0590	0,1056	0,0000
14	0,6475	0,7395	0,6727	0,5797	0,5533
15	0,5893	0,9105	0,6089	0,6816	0,7205
16	0,7194	0,5258	0,0575	0,4899	0,2513
17	0,8962	0,3752	0,4745	0,4639	0,4605
18	0,8767	0,8558	0,0416	0,6181	0,5533
Max	1	1	1	1	1
Min	0	0	0	0	0

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.5 *Grey relational coefficient*

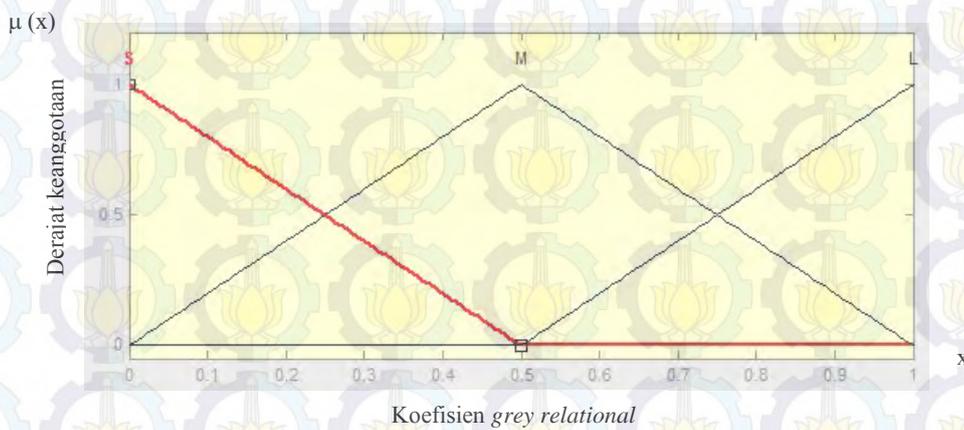
Komb.	Grey relational coefficient				
	Fz	Mz	Ra	DL	KB
1	1,0000	0,4270	1,0000	0,7789	1,0000
2	0,5533	0,3921	0,7457	0,8010	0,6655
3	0,4563	0,4035	0,4517	0,4272	0,5206
4	0,5200	0,4992	0,4038	0,4464	0,5812
5	0,7127	0,5403	0,4297	0,6203	0,4387
6	0,4029	0,3333	0,3333	0,3713	0,3333
7	0,7231	0,4488	0,9984	0,4666	0,4747
8	0,3629	0,3967	0,3756	0,3709	0,3482
9	0,3333	0,3540	0,4159	0,3333	0,3333
10	0,4943	1,0000	0,7113	1,0000	0,7912
11	0,6505	0,3526	0,5949	0,5913	0,6655
12	0,5366	0,3459	0,7845	0,6559	0,7912
13	0,6090	0,5687	0,8944	0,8257	1,0000
14	0,4357	0,4034	0,4264	0,4631	0,4747
15	0,4590	0,3545	0,4509	0,4231	0,4097
16	0,4101	0,4874	0,8968	0,5051	0,6655
17	0,3581	0,5713	0,5131	0,5187	0,5206
18	0,3632	0,3688	0,9231	0,4472	0,4747

Sumber: Hasil perhitungan



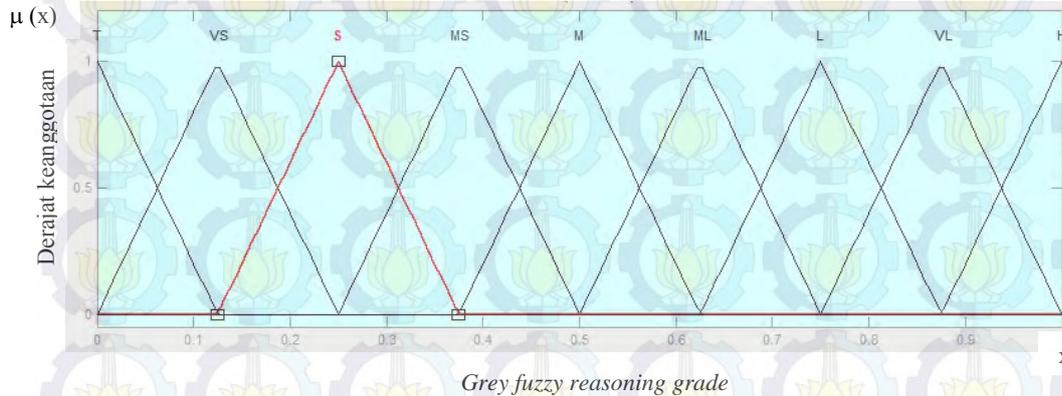
4.5. Fuzzification

Variabel-variabel *input* dari sistem logika *fuzzy* pada penelitian ini menggunakan nilai GRC dari masing-masing respon F_z , M_z , R_a , DL dan KB. Nilai GRC dari masing-masing respon akan diubah ke dalam *linguistic fuzzy subsets* dengan menggunakan fungsi keanggotaan. Fungsi keanggotaan yang digunakan pada variabel *input* adalah bentuk segitiga (*triangle*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. Fungsi keanggotaan dari masing-masing respon dikelompokkan secara uniform ke dalam tiga kelas *fuzzy subsets*, yaitu *small* (S), *medium* (M) dan *large* (L).



Gambar 4.1 Fungsi keanggotaan untuk F_z , M_z , R_a , DL dan KB

Variabel *output* dari dari sistem logika *fuzzy* pada penelitian ini adalah *grey fuzzy reasoning grade* (GFRG). Fungsi keanggotaan yang digunakan pada variabel *output* sama dengan fungsi keanggotaan pada variabel *input*, yaitu fungsi keanggotaan bentuk segitiga (*triangle*) seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2. Pada variabel *output* fungsi keanggotaan GFRG dikelompokkan ke dalam sembilan kelas *fuzzy subsets* yaitu *tiny* (T), *very small* (VS), *small* (S), *smaller middle* (SM), *middle* (M), *larger middle* (ML), *larger* (L), *very large* (VL) dan *huge* (H).



Gambar 4.2 Fungsi keanggotaan *grey fuzzy reasoning grade* (GFRG)

4.6. Penentuan *Fuzzy Rules*

Dasar aturan *fuzzy* adalah sekelompok aturan pengontrolan jika-maka (*if-then control*) yang menyatakan hubungan antara variabel *input* dan variabel *output*. Pada penelitian ini terdapat lima variabel *input*, yaitu GRC dari respon F_z , M_z , R_a , DL dan KB dengan masing-masing memiliki tiga *fuzzy subsets*. *Fuzzy rules* yang dibutuhkan untuk mengkombinasikan seluruh variabel *input* adalah sebanyak dua ratus empat puluh tiga *fuzzy rules*. Tabel 4.6 menunjukkan *fuzzy rules* yang digunakan pada penelitian ini.

Arti dari *fuzzy rules* pada Tabel 4.6 adalah sebagai berikut:

Rule 1 : Jika GRC (F_z) adalah S dan GRC (M_z) adalah S dan GRC (R_a) adalah S dan GRC (DL) adalah S dan GRC (KB) adalah S, maka GFRG adalah T.

Rule 2 : Jika GRC (F_z) adalah S dan GRC (M_z) adalah S dan GRC (R_a) adalah S dan GRC (DL) adalah S dan GRC (KB) adalah M, maka GFRG adalah T.

Rule 243: Jika GRC (F_z) adalah L dan GRC (M_z) adalah L dan GRC (R_a) adalah L dan GRC (DL) adalah L dan GRC (KB) adalah L, maka GFRG adalah H.



Tabel 4.6 Fuzzy rules

Rules No.	Variabel input GRC					Variabel output GFRG
	Fz	Mz	SR	DL	KB	
1	S	S	S	S	S	T
2	S	S	S	S	M	T
3	S	S	S	S	L	T
4	S	S	S	M	S	T
5	S	S	S	M	M	T
6	S	S	S	M	L	T
7	S	S	S	L	S	T
8	S	S	S	L	M	T
9	S	S	S	L	L	T
10	S	S	M	S	S	T
11	S	S	M	S	M	T
12	S	S	M	S	L	T
13	S	S	M	M	S	T
14	S	S	M	M	M	T
15	S	S	M	M	L	T
16	S	S	M	L	S	T
17	S	S	M	L	M	T
18	S	S	M	L	L	T
19	S	S	L	S	S	T
20	S	S	L	S	M	T
21	S	S	L	S	L	T
22	S	S	L	M	S	T
23	S	S	L	M	M	T
24	S	S	L	M	L	T
25	S	S	L	L	S	T
26	S	S	L	L	M	T
27	S	S	L	L	L	T
28	S	M	S	S	S	T
29	S	M	S	S	M	T
30	S	M	S	S	L	T
31	S	M	S	M	S	T
32	S	M	S	M	M	T
33	S	M	S	M	L	T
34	S	M	S	L	S	T
35	S	M	S	L	M	T
36	S	M	S	L	L	T
37	S	M	M	S	S	T
38	S	M	M	S	M	T
39	S	M	M	S	L	T
40	S	M	M	M	S	T
41	S	M	M	M	M	T



42	S	M	M	M	L	T
43	S	M	M	L	S	T

Tabel 4.6 *Fuzzy rules* (lanjutan)

Rules No.	Variabel input GRC					Variabel output GFRG
	Fz	Mz	SR	DL	KB	
44	S	M	M	L	M	T
45	S	M	M	L	L	T
46	S	M	L	S	S	T
47	S	M	L	S	M	T
48	S	M	L	S	L	T
49	S	M	L	M	S	T
50	S	M	L	M	M	T
51	S	M	L	M	L	T
52	S	M	L	L	S	T
53	S	M	L	L	M	T
54	S	M	L	L	L	T
55	S	L	S	S	S	T
56	S	L	S	S	M	T
57	S	L	S	S	L	T
58	S	L	S	M	S	T
59	S	L	S	M	M	T
60	S	L	S	M	L	T
61	S	L	S	L	S	T
62	S	L	S	L	M	T
63	S	L	S	L	L	T
64	S	L	M	S	S	T
65	S	L	M	S	M	T
66	S	L	M	S	L	T
67	S	L	M	M	S	T
68	S	L	M	M	M	T
69	S	L	M	M	L	T
70	S	L	M	L	S	T
71	S	L	M	L	M	T
72	S	L	M	L	L	T
73	S	L	L	S	S	T
74	S	L	L	S	M	T
75	S	L	L	S	L	T
76	S	L	L	M	S	T
77	S	L	L	M	M	T
78	S	L	L	M	L	T
79	S	L	L	L	S	T
80	S	L	L	L	M	T
81	S	L	L	L	L	T
82	M	S	S	S	S	T
83	M	S	S	S	M	T
84	M	S	S	S	L	T
85	M	S	S	M	S	T
86	M	S	S	M	M	T
87	M	S	S	M	L	T
88	M	S	S	L	S	T
89	M	S	S	L	M	T



90	M	S	S	L	L	T
91	M	S	M	S	S	T

Tabel 4.6 *Fuzzy rules* (lanjutan)

Rules No.	Variabel input GRC					Variabel output GFRG
	Fz	Mz	SR	DL	KB	
92	M	S	M	S	M	T
93	M	S	M	S	L	T
94	M	S	M	M	S	T
95	M	S	M	M	M	T
96	M	S	M	M	L	T
97	M	S	M	L	S	T
98	M	S	M	L	M	T
99	M	S	M	L	L	T
100	M	S	L	S	S	T
101	M	S	L	S	M	T
102	M	S	L	S	L	T
103	M	S	L	M	S	T
104	M	S	L	M	M	T
105	M	S	L	M	L	T
106	M	S	L	L	S	T
107	M	S	L	L	M	T
108	M	S	L	L	L	T
109	M	M	S	S	S	T
110	M	M	S	S	M	T
111	M	M	S	S	L	T
112	M	M	S	M	S	T
113	M	M	S	M	M	T
114	M	M	S	M	L	T
115	M	M	S	L	S	T
116	M	M	S	L	M	T
141	M	L	S	M	L	T
142	M	L	S	L	S	T
143	M	L	S	L	M	T
144	M	L	S	L	L	T
145	M	L	M	S	S	T
146	M	L	M	S	M	T
147	M	L	M	S	L	T
148	M	L	M	M	S	T
149	M	L	M	M	M	T
150	M	L	M	M	L	T
151	M	L	M	L	S	T
152	M	L	M	L	M	T
153	M	L	M	L	L	T
154	M	L	L	S	S	T
155	M	L	L	S	M	T
156	M	L	L	S	L	T
157	M	L	L	M	S	T
158	M	L	L	M	M	T
159	M	L	L	M	L	T
160	M	L	L	L	S	T
161	M	L	L	L	M	T



162	M	L	L	L	L	T
163	L	S	S	S	S	T

Tabel 4.6 Fuzzy rules (lanjutan)

Rules No.	Variabel input GRC					Variabel output GFRG
	Fz	Mz	SR	DL	KB	
164	L	S	S	S	M	T
165	L	S	S	S	L	T
166	L	S	S	M	S	T
167	L	S	S	M	M	T
168	L	S	S	M	L	T
169	L	S	S	L	S	T
170	L	S	S	L	M	T
171	L	S	S	L	L	T
172	L	S	M	S	S	T
173	L	S	M	S	M	T
174	L	S	M	S	L	T
175	L	S	M	M	S	T
176	L	S	M	M	M	T
177	L	S	M	M	L	T
178	L	S	M	L	S	T
179	L	S	M	L	M	T
180	L	S	M	L	L	T
181	L	S	L	S	S	T
182	L	S	L	S	M	T
183	L	S	L	S	L	T
184	L	S	L	M	S	T
185	L	S	L	M	M	T
186	L	S	L	M	L	T
187	L	S	L	L	S	T
188	L	S	L	L	M	T
189	L	S	L	L	L	T
190	L	M	S	S	S	T
191	L	M	S	S	M	T
192	L	M	S	S	L	T
193	L	M	S	M	S	T
194	L	M	S	M	M	T
195	L	M	S	M	L	T
196	L	M	S	L	S	T
197	L	M	S	L	M	T
198	L	M	S	L	L	T
199	L	M	M	S	S	T
200	L	M	M	S	M	T
201	L	M	M	S	L	T
202	L	M	M	M	S	T
203	L	M	M	M	M	T
204	L	M	M	M	L	T
205	L	M	M	L	S	T
206	L	M	M	L	M	T
207	L	M	M	L	L	T
208	L	M	L	S	S	T
209	L	M	L	S	M	T



210	L	M	L	S	L	T
211	L	M	L	M	S	T

Tabel 4.6 *Fuzzy rules* (lanjutan)

Rules No.	Variabel input GRC					Variabel output GFRG
	Fz	Mz	SR	DL	KB	
212	L	M	L	M	M	T
213	L	M	L	M	L	T
214	L	M	L	L	S	T
215	L	M	L	L	M	T
216	L	M	L	L	L	T
217	L	L	S	S	S	T
218	L	L	S	S	M	T
219	L	L	S	S	L	T
220	L	L	S	M	S	T
221	L	L	S	M	M	T
222	L	L	S	M	L	T
223	L	L	S	L	S	T
224	L	L	S	L	M	T
225	L	L	S	L	L	T
226	L	L	M	S	S	T
227	L	L	M	S	M	T
228	L	L	M	S	L	T
229	L	L	M	M	S	T
230	L	L	M	M	M	T
231	L	L	M	M	L	T
232	L	L	M	L	S	T
233	L	L	M	L	M	T
234	L	L	M	L	L	T
235	L	L	L	S	S	T
236	L	L	L	S	M	T
237	L	L	L	S	L	T
238	L	L	L	M	S	T
239	L	L	L	M	M	T
240	L	L	L	M	L	T
241	L	L	L	L	S	T
242	L	L	L	L	M	T
243	L	L	L	L	L	T

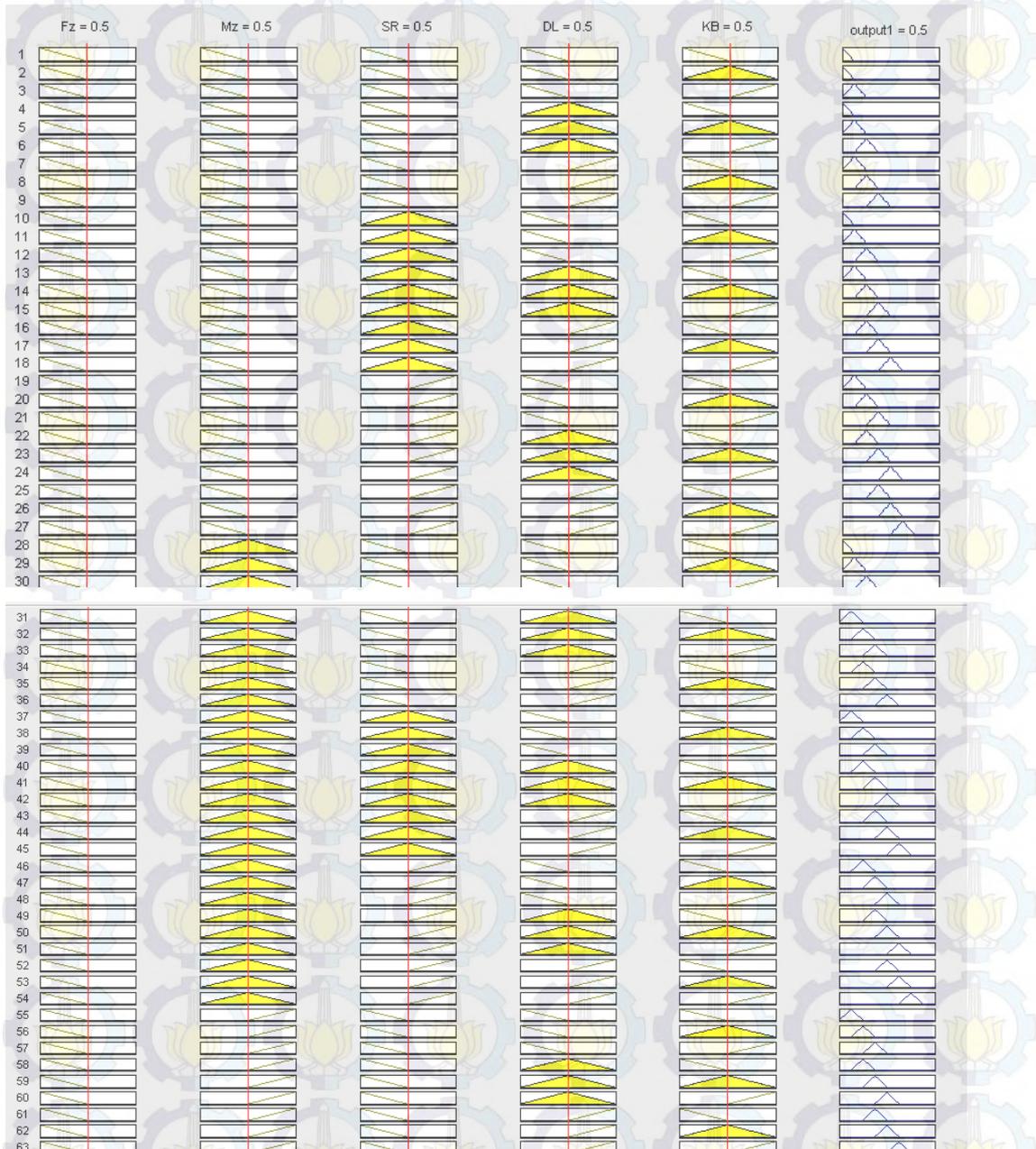
Sumber: Perangkat komputasi numerik

4.7. Defuzzification

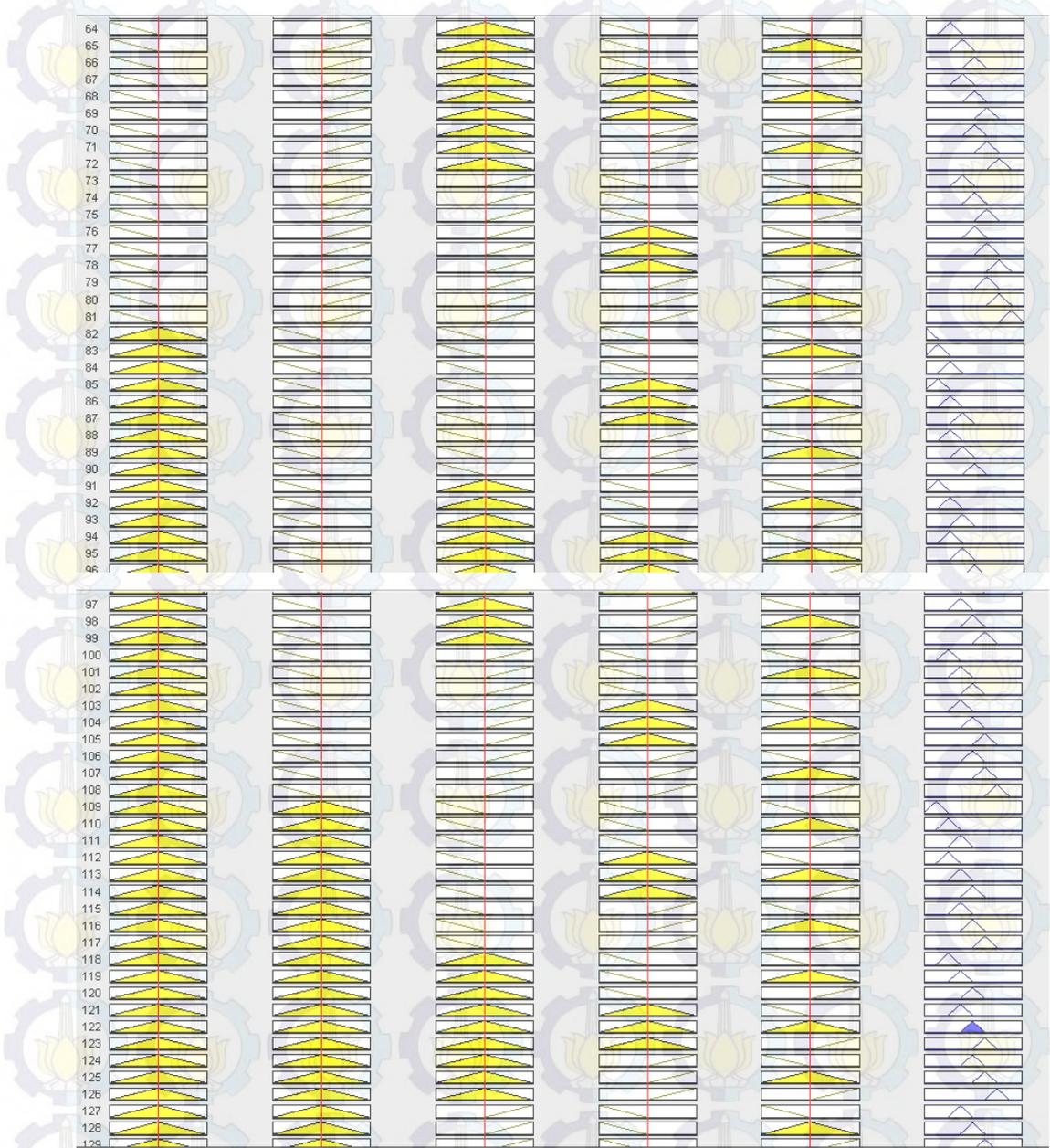
Defuzzification merupakan proses pemetaan himpunan *fuzzy* ke dalam himpunan tegas. GRC dari masing-masing respon digunakan sebagai variabel *input* pada proses *defuzzification*. Variabel *input* kemudian diolah didalam *fuzzy inference engine* berdasarkan komposisi *fuzzy rules* yang telah ditetapkan untuk menghasilkan suatu output. *Output* yang dihasilkan adalah GFRG yang berupa suatu bilangan pada domain himpunan *fuzzy* tersebut. Proses *defuzzification*



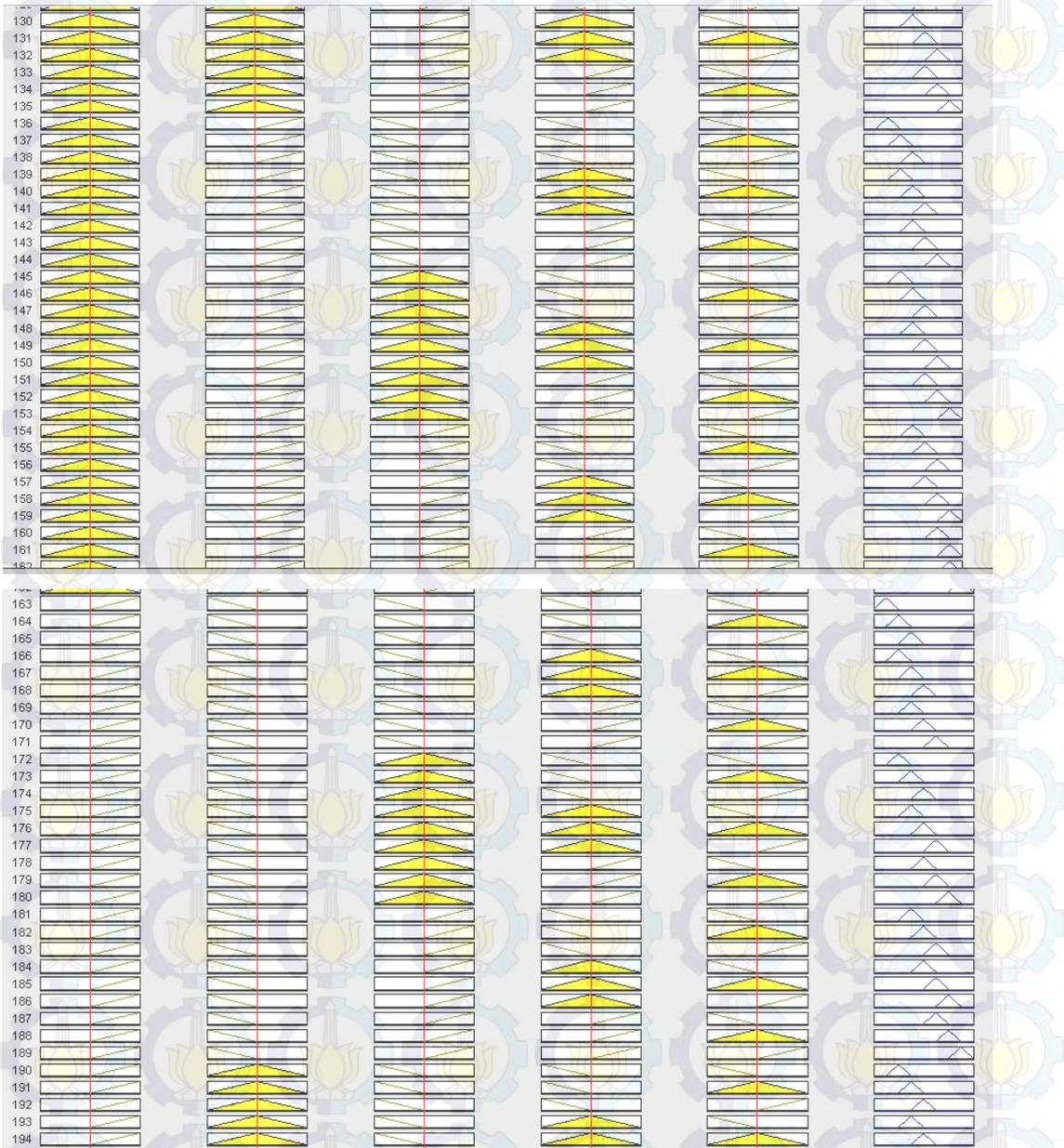
dilakukan dengan menggunakan metode *centroid* (titik tengah). Ilustrasi aturan *fuzzy* untuk proses penegasan ditunjukkan pada Gambar 4.3.



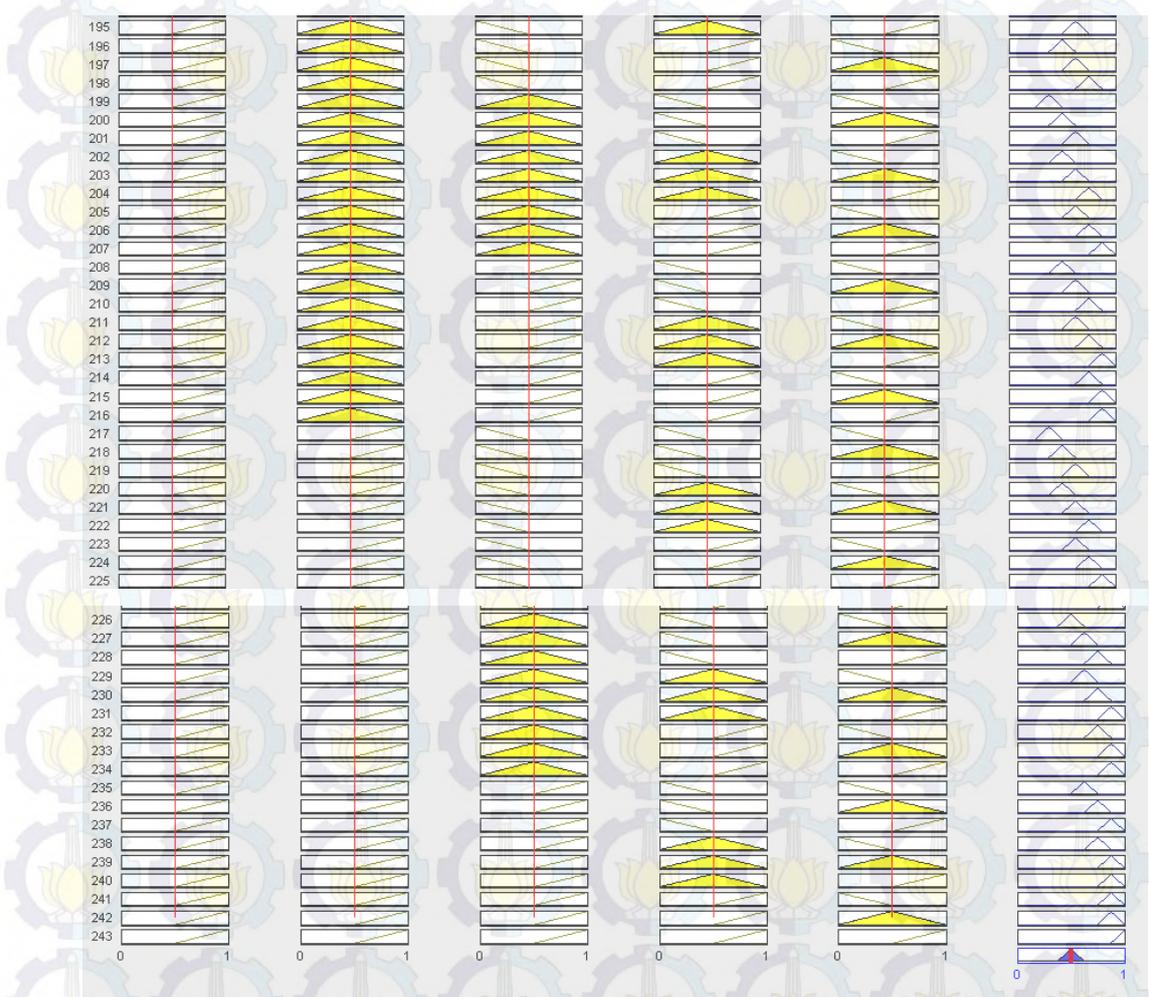
Gambar 4.3 Ilustrasi *fuzzy rules*



Gambar 4.3 Ilustrasi *fuzzy rules* (lanjutan)



Gambar 4.3 Ilustrasi *fuzzy rules* (lanjutan)



Gambar 4.3 Ilustrasi *fuzzy rules* (lanjutan)

Hasil proses *defuzzification* yang berupa nilai GFRG untuk setiap kombinasi ditunjukkan pada Tabel 4.7. GFRG akan digunakan sebagai variabel respon yang mewakili variabel respon F_z , M_z , R_a , DL dan KB secara serentak.



Tabel 4.7 Grey fuzzy reasoning grade (GFRG)

No.	GFRG	No.	GFRG
1	0,8475	10	0,8183
2	0,6453	11	0,5869
3	0,4198	12	0,6338
4	0,4825	13	0,7932
5	0,5612	14	0,4052
6	0,3380	15	0,3877
7	0,6305	16	0,5987
8	0,3537	17	0,5044
9	0,3362	18	0,4795

Sumber: Hasil perhitungan

4.8. Hasil Optimasi

Rancangan percobaan Taguchi berupa matriks ortogonal mampu untuk mengelompokkan pengaruh dari masing-masing variabel pada level yang berbeda. Contoh perhitungan rata-rata nilai GFRG variabel proses jenis pahat pada level 1 adalah sebagai berikut:

$$\bar{\eta}_V = \frac{0,8475+0,6453+0,4198+0,4825+0,5612+0,3380+0,6305+0,3537+0,3362}{9}$$

$$\bar{\eta}_V = 0,5127$$

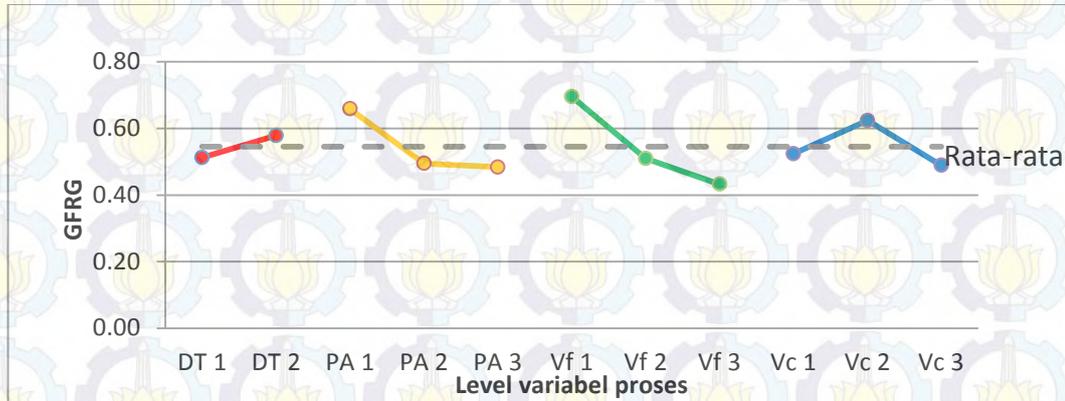
Perhitungan rata-rata nilai GFRG pada masing-masing variabel proses untuk setiap levelnya ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Rata-rata nilai GFRG pada masing-masing level

Variabel proses	Level 1	Level 2	Level 3	Selisih
DT	0,5127	0,5786		0,0659
PA	0,6586	0,4946	0,4838	0,1748
V _f	0,6951	0,5095	0,4325	0,2626
V _c	0,5242	0,6239	0,4890	0,0353
Rata-rata total	0,5457			

Sumber: Hasil perhitungan

Plot untuk nilai rata-rata dari GFRG pada masing-masing level dari variabel proses DT, PA, V_f dan V_c ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Plot nilai GFRG masing-masing level variabel proses

Level variabel proses yang paling optimum dapat dilihat dari nilai GFRG yang paling besar. Berdasarkan plot rata-rata nilai GFRG masing-masing level dari variabel proses yang ditunjukkan pada Gambar 4.4, maka dapat ditentukan kombinasi level-level variabel proses yang menghasilkan respon optimum. Kombinasi level dari variabel proses tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Kombinasi variabel proses respon optimum

Variabel proses	Level	Nilai
DT	2	HSS-Co
PA	1	100°
V_f	1	50 mm/menit
V_c	2	62,8 m/menit

Sumber: Hasil perhitungan

4.9. Analisis Variansi dan Persen Kontribusi

Analisis variansi (ANOVA) digunakan untuk mengetahui variabel-variabel proses yang memiliki pengaruh secara signifikan dan besarnya kontribusi terhadap respon yang diteliti. Pada penelitian ini ANOVA dilakukan terhadap data GFRG yang mewakili semua respon secara serentak.

Contoh perhitungan ANOVA GFRG dilakukan berdasarkan rumus pada Tabel 2.41 adalah sebagai berikut:



$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

$$\begin{aligned} SS_T &= (0,8475-0,5457)^2 + (0,6453-0,5457)^2 + (0,4198-0,5457)^2 + \\ &\quad (0,4825-0,5457)^2 + (0,5612-0,5457)^2 + (0,3380-0,5457)^2 + \\ &\quad (0,6305-0,5457)^2 + (0,3537-0,5457)^2 + (0,3362-0,5457)^2 + \\ &\quad (0,8183-0,5457)^2 + (0,5869-0,5457)^2 + (0,6338-0,5457)^2 + \\ &\quad (0,7932-0,5457)^2 + (0,4052-0,5457)^2 + (0,3877-0,5457)^2 + \\ &\quad (0,5987-0,5457)^2 + (0,5044-0,5457)^2 + (0,4795-0,5457)^2 \\ SS_T &= 0,4508 \end{aligned}$$

$$SS_{DT} = n_{DT} \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{y})^2$$

$$SS_{DT} = 9 \times [(0,5127-0,5457)^2 + (0,5786-0,5457)^2]$$

$$SS_{DT} = 0,01954$$

$$MS_{DT} = \frac{SS_{DT}}{df_{DT}}$$

$$MS_{DT} = \frac{0,01954}{1}$$

$$MS_{DT} = 0,01954$$

Hasil ANAVA untuk GFRG secara rinci ditunjukkan pada Lampiran 7. Hasil perhitungan ANAVA untuk GFRG secara keseluruhan ditunjukkan pada Tabel 4.10 beserta persen kontribusi untuk masing-masing faktor. Persentase kontribusi dihitung dari hasil analisis variansi dengan menggunakan persamaan 2.67 dan 2.68.

Contoh perhitungan persen kontribusi untuk variabel proses jenis pahat adalah sebagai berikut:

$$SS'_{DT} = SS_{DT} - db_{DT} \cdot MS_E$$

$$SS'_{DT} = 0,01954 - 1 \times 0,003865$$

$$SS'_{DT} = 0,0156711$$



$$\rho_{DT} = \frac{SS'_{DT}}{SS_T} \times 100 \%$$

$$\rho_{DT} = \frac{0,0156711}{0,450801} \times 100 \%$$

$$\rho_{DT} = 3,48 \%$$

Tabel 4.10 ANAVA dan kontribusi GRFG

Source	DF	SS	MS	F	SS'	P value	% Kontribusi (ρ)
DT	1	0,019536	0,019536	5,05	0,015671	0,048	3,48
PA	2	0,11509	0,057545	14,89	0,10736	0,001	23,82
V _f	2	0,218722	0,109361	28,3	0,210992	0,000	46,80
V _c	2	0,058804	0,029402	7,61	0,051074	0,010	11,33
Error	10	0,038649	0,003865				14,57
Total	17	0,450801					100

Sumber: Hasil perhitungan

Persen kontribusi menunjukkan pengaruh dari masing-masing variabel proses terhadap total variasi respon yang diamati. Jika besar persen kontribusi *error* kurang dari lima belas persen, maka tidak ada variabel proses yang berpengaruh terabaikan. Jika besar persen kontribusi *error* lebih dari lima belas persen, maka mengindikasikan ada variabel proses yang berpengaruh terabaikan.

Berdasarkan *p-value* pada Tabel 4.10 menunjukkan bahwa seluruh variabel proses memiliki pengaruh yang signifikan terhadap GRFG. Kondisi H_0 untuk masing-masing variabel proses ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Kondisi hipotesis nol multi respon

Sumber variasi	Kondisi H_0
DT	ditolak
PA	ditolak
V _f	ditolak
V _c	ditolak

4.10. Pengujian Asumsi Residual

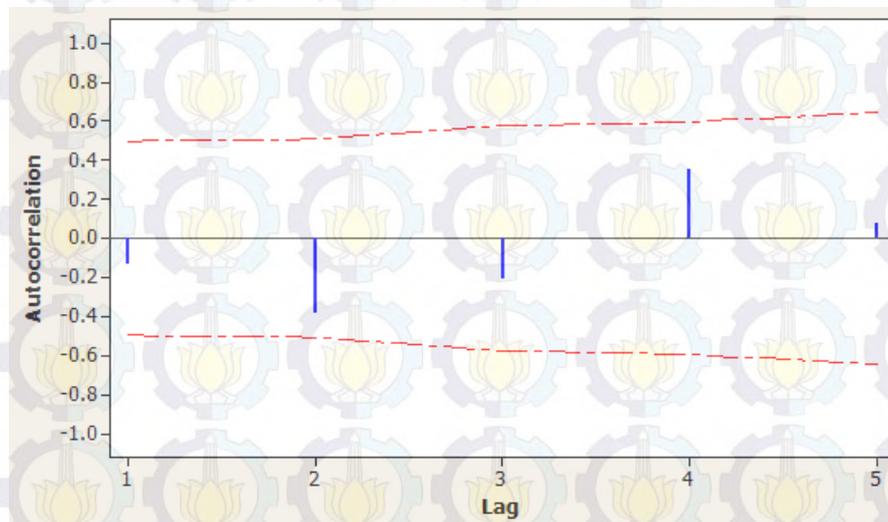
Analisis variansi mensyaratkan bahwa residual harus memenuhi asumsi IIDN ($0, \sigma^2$), yaitu residual harus bersifat identik, independen dan berdistribusi



normal dengan mean nol dan nilai variansi tertentu. Berikut ini adalah pengujian yang dilakukan terhadap residual:

4.10.1. Uji Independen

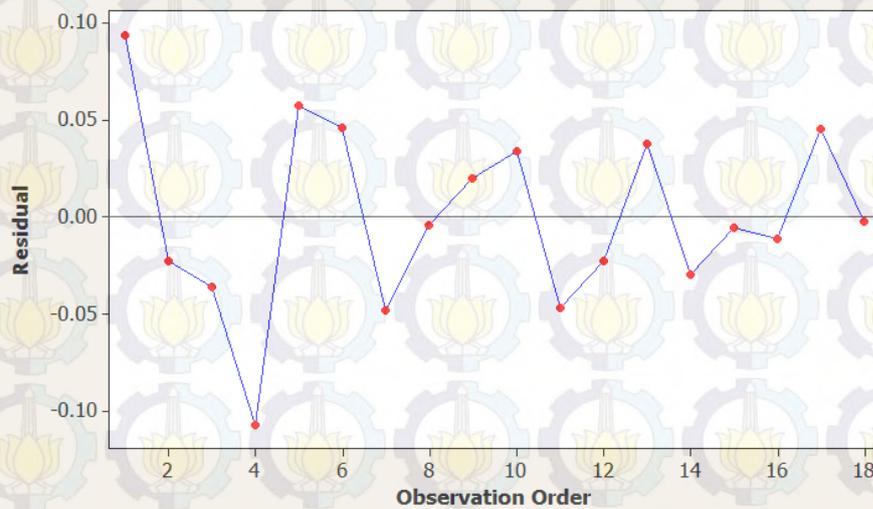
Pengujian independen pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *auto correlation function* (ACF). Berdasarkan plot ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.5, tidak ada nilai ACF pada setiap *lag* yang keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antar residual yang berarti residual bersifat independen.



Gambar 4.5 Plot ACF

4.10.2. Uji Identik

Asumsi residual bersifat identik pada penelitian ini dilakukan secara visual, yaitu dengan menggambar plot antara residual dan *observation order* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6. Dari plot menunjukkan bahwa data tersebar secara acak dan tidak membentuk tren atau pola tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa asumsi residual bersifat identik terpenuhi.



Gambar 4.6 Plot *residual versus observation order*

4.10.3. Uji Kenormalan

Pengujian asumsi residual normal $(0, \sigma^2)$ dilakukan melalui uji Kolmogorov-Smirnov. Hipotesis yang digunakan adalah:

H_0 : Residual berdistribusi normal

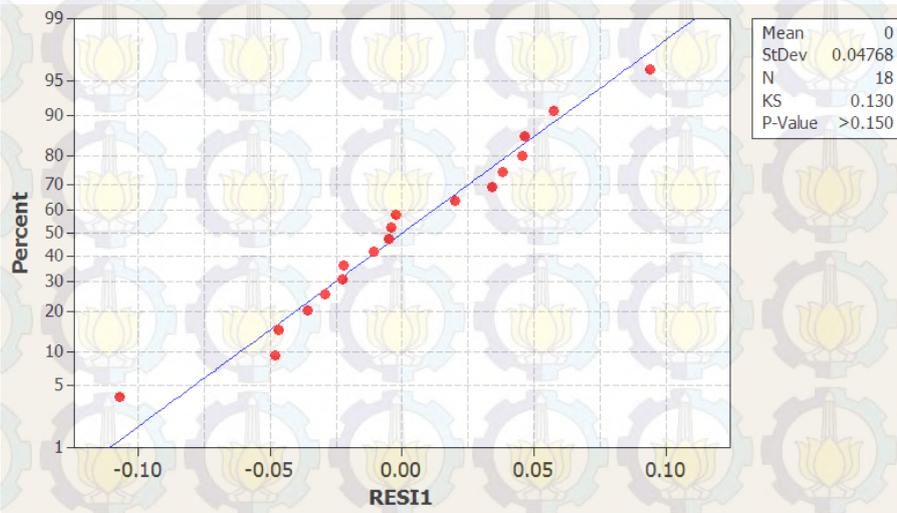
H_1 : Residual tidak berdistribusi normal

H_0 ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada $\alpha = 0,05$.

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa dengan uji Kolmogorov-Smirnov diperoleh:

- $P\text{-value} > 0,150$ yang berarti lebih besar dari $\alpha = 0,05$. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa H_0 gagal ditolak atau residual berdistribusi normal.
- *Mean* bernilai sebesar 0 yang berarti sangat kecil.
- Variansi residual adalah sebesar $(0,130)^2 = 0,0169$

Dengan demikian asumsi residual berdistribusi normal dengan nilai *mean* sama dengan nol (atau mendekati nol) dan memiliki variasi tertentu (sebesar 0,0169) telah terpenuhi.



Gambar 4.7 Plot uji distribusi normal

4.11. Prediksi Respon Optimum

Prediksi dari nilai GFRG optimum dapat dihitung berdasarkan kombinasi nilai rata-rata GFRG pada masing-masing level dari variabel proses yang menghasilkan respon optimum seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.8. Kombinasi dari variabel proses yang berpengaruh secara signifikan dan menghasilkan nilai GFRG yang optimum adalah sebagai berikut:

1. Variabel proses DT pada level 2
2. Variabel proses PA pada level 1
3. Variabel proses V_f pada level 1
4. Variabel proses V_c pada level 2

Nilai prediksi GFRG dihitung dengan menggunakan persamaan 2.66 sebagai berikut:

$$\hat{\mu} = \gamma_m + \sum_{i=1}^o (\bar{\gamma}_i - \gamma_m)$$

$$\hat{\mu} = 0,5457 + (0,5786 - 0,5457) + (0,6586 - 0,5457) + (0,6951 - 0,5457) + (0,6239 - 0,5457)$$

$$\hat{\mu} = 0,9192$$

Dari perhitungan diperoleh nilai rata-rata GFRG prediksi untuk kombinasi variabel proses yang menghasilkan respon optimum adalah sebesar 0,9192.



Interval keyakinan rata-rata GFRG prediksi dihitung berdasarkan persamaan 2.69. Jumlah pengamatan efektif dihitung dengan menggunakan persamaan 2.71 sebagai berikut:

$$n_{\text{eff}} = \frac{\text{jumlah total percobaan}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan variabel proses untuk menduga rata - rata}}$$

$$n_{\text{eff}} = \frac{18 \times 2}{1 + (1 + 2 + 2 + 2)}$$

$$n_{\text{eff}} = 4,5$$

Perhitungan interval keyakinan rata-rata GFRG prediksi hasil optimasi adalah sebagai berikut:

$$CI_p = \sqrt{\frac{F_{(\alpha, 1, df_E)} MS_E}{n_{\text{eff}}}}$$

$$CI_p = \sqrt{\frac{F_{(0,05,1,10)} 0,003865}{4,5}}$$

$$CI_p = \sqrt{\frac{4,96 \times 0,003865}{4,5}}$$

$$CI_p = \pm 0,065269356$$

Dengan demikian interval keyakinan nilai rata-rata GFRG prediksi yang menghasilkan respon optimum dengan tingkat keyakinan 95% adalah $0,9192 \pm 0,0653$ ($0,8539 \leq \hat{\mu}_{GFRG} \leq 0,9845$).

4.12. Percobaan Konfirmasi

Untuk memvalidasi hasil percobaan yang telah dilakukan maka perlu dilakukan pembandingan antara nilai rata-rata GFRG hasil percobaan konfirmasi dengan interval keyakinan rata-rata GFRG prediksi. Percobaan konfirmasi dilakukan dengan pengaturan menggunakan kombinasi optimum hasil optimasi seperti ditunjukkan pada Tabel 4.9. Pada penelitian ini percobaan konfirmasi dilakukan dengan replikasi sebanyak tiga kali. Hasil percobaan konfirmasi secara



rinci ditunjukkan pada Lampiran 6. Hasil dari percobaan konfirmasi dapat dilihat pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Hasil respon percobaan konfirmasi pada kombinasi optimum

Percobaan	F_z	M_z	R_a	DL	KB
1	36,23	0,149	1,904	1,034	180
2	34,52	0,132	1,926	1,021	200
3	34,31	0,150	1,828	1,041	160
Rata-rata	35,02	0,144	1,886	1,032	180

Sumber: Hasil percobaan

Langkah berikutnya yaitu perhitungan rasio S/N terhadap nilai-nilai respon yang diperoleh dari percobaan konfirmasi. Hasil perhitungan rasio S/N pada masing-masing respon percobaan konfirmasi ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Rasio S/N percobaan konfirmasi kombinasi optimum

	Rasio S/N				
	F_z	M_z	R_a	DL	KB
Kombinasi optimum	-30,89	16,86	-5,51	-0,27	-45,11

Sumber: Hasil perhitungan

Setelah menghitung rasio S/N kemudian dilakukan perhitungan *deviation sequence* dan GRC. Langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan GFRG. Hasil perhitungan GFRG percobaan konfirmasi ditunjukkan pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 GFRG percobaan konfirmasi untuk kombinasi optimum

	GRC					GFRG
	F_z	M_z	R_a	DL	KB	
Kombinasi Optimum	0,9065	0,9232	0,9520	0,9508	1,0000	0,8606

Sumber: Hasil perhitungan

Interval keyakinan rata-rata GFRG percobaan konfirmasi dihitung dengan menggunakan persamaan 2.72. Perhitungan interval keyakinan GFRG adalah sebagai berikut:



$$n_{\text{eff}} = \frac{\text{jumlah total percobaan}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan variabel proses untuk menduga rata - rata}}$$

$$n_{\text{eff}} = \frac{18 \times 2}{1 + (1 + 2 + 2 + 2)}$$

$$n_{\text{eff}} = 4,5$$

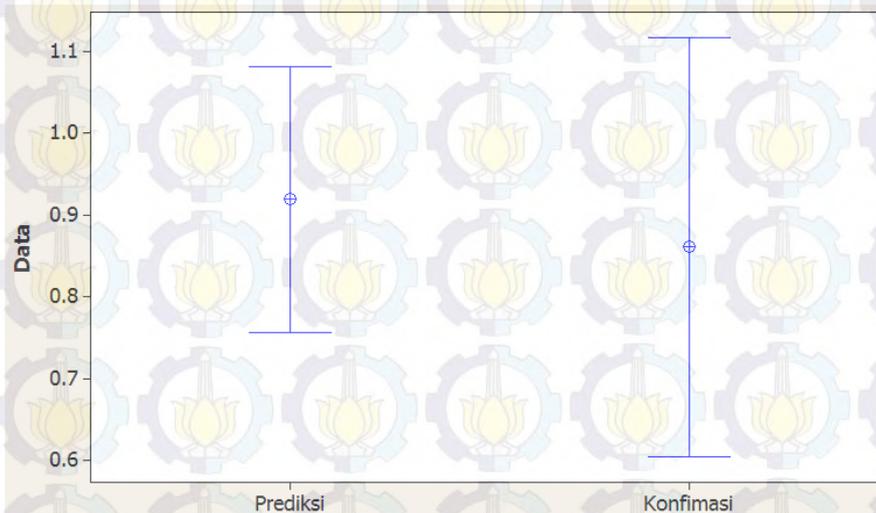
$$CI_{CE} = \sqrt{F_{(\alpha,1,df_E)} MS_E \left[\frac{1}{n_{\text{eff}}} + \frac{1}{r} \right]}$$

$$CI_{CE} = \sqrt{F_{(0,05,1,10)} 0,003865 \left[\frac{1}{4,5} + \frac{1}{3} \right]}$$

$$CI_{CE} = \sqrt{4,96 \times 0,003865 \times \left[\frac{1}{4,5} + \frac{1}{3} \right]}$$

$$CI_{CE} = 0,1032$$

Dengan demikian interval keyakinan nilai rata-rata GFRG percobaan konfirmasi dengan tingkat keyakinan 95% adalah $0,8606 \pm 0,1032$ ($0,7574 \leq \hat{\mu}_{GFRG} \leq 0,9638$).



Gambar 4.8 Plot rata-rata percobaan konfirmasi dan interval keyakinan prediksi



Gambar 4.8 menunjukkan interval keyakinan nilai rata-rata GFRG hasil percobaan konfirmasi dan interval keyakinan nilai rata-rata GFRG hasil prediksi. Kombinasi level-level dari variabel proses yang menghasilkan respon optimum dinyatakan valid apabila nilai rata-rata GFRG percobaan konfirmasi berada di dalam interval rata-rata GFRG prediksi.

Berdasarkan Gambar 4.8, nilai rata-rata GFRG percobaan konfirmasi (0,8606) berada didalam interval rata-rata prediksi ($0,8539 \leq \hat{\mu}_{GFRG} \leq 0,9845$). Maka dapat disimpulkan bahwa pengaturan kombinasi level-level variabel proses pada kondisi optimum yang telah didapat adalah valid.

4.13. Pengujian Perbedaan Respon Hasil Kombinasi Awal dan Hasil Kombinasi Optimum

Nilai respon hasil kombinasi awal dan nilai respon hasil kombinasi optimum perlu diuji secara statistik untuk mengetahui apakah nilai-nilai tersebut sama atau berbeda. Adapun uji statistik yang digunakan adalah sebagai berikut:

- a. Uji kenormalan
- b. Uji kesamaan variansi
- c. Uji kesamaan rata-rata

- a. Uji kenormalan

Hipotesis untuk uji kenormalan data adalah sebagai berikut:

H_0 : Data berdistribusi normal

H_1 : Data tidak berdistribusi normal

Kriteria penolakan adalah:

H_0 ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada $\alpha = 0,05$.

Hasil uji kenormalan data untuk masing-masing respon secara rinci ditunjukkan pada Lampiran 9. Hasil uji kenormalan data untuk kombinasi awal ditunjukkan pada Tabel 4.15 dan untuk kombinasi optimum ditunjukkan pada Tabel 4.16.



Tabel 4.15 Hasil uji kenormalan data pada kombinasi awal

Respon	P-value	Keterangan	Kesimpulan
F_z	$> 0,150$	H_0 gagal ditolak	Berdistribusi normal
M_z	$> 0,150$	H_0 gagal ditolak	Berdistribusi normal
R_a	$> 0,150$	H_0 gagal ditolak	Berdistribusi normal
DL	$> 0,150$	H_0 gagal ditolak	Berdistribusi normal
KB	$> 0,150$	H_0 gagal ditolak	Berdistribusi normal

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.16 Hasil uji kenormalan data pada kombinasi optimum

Respon	P-value	Keterangan	Kesimpulan
F_z	$> 0,150$	H_0 gagal ditolak	Berdistribusi normal
M_z	0,099	H_0 gagal ditolak	Berdistribusi normal
R_a	$> 0,150$	H_0 gagal ditolak	Berdistribusi normal
DL	0,119	H_0 gagal ditolak	Berdistribusi normal
KB	$> 0,150$	H_0 gagal ditolak	Berdistribusi normal

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.15 dan Tabel 4.16 menunjukkan bahwa *p-value* untuk masing-masing respon, baik pada kombinasi awal maupun pada kombinasi optimum adalah lebih besar dari $\alpha = 0,05$. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa data pada kombinasi awal dan data pada kombinasi optimum adalah berdistribusi normal.

b. Uji kesamaan variansi

Hipotesis untuk pengujian ini adalah sebagai berikut:

$$H_0 : \sigma_1^2 (\text{variansi kombinasi awal}) = \sigma_2^2 (\text{variansi kombinasi optimum})$$

$$H_1 : \sigma_1^2 (\text{variansi kombinasi awal}) \neq \sigma_2^2 (\text{variansi kombinasi optimum})$$

Kriteria penolakan adalah:

H_0 ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada $\alpha = 0,05$.

Uji kesamaan variansi pada semua respon secara rinci ditunjukkan pada

Lampiran 9. Hasil uji kesamaan variansi antara data pada kombinasi awal dan data pada kombinasi optimum untuk masing-masing respon ditunjukkan pada Tabel 4.17.



Tabel 4.17 Hasil uji kesamaan variansi

Respon	P-value	Keterangan	Kesimpulan
F_z	0,645	H_0 gagal ditolak	Variansi sama
M_z	0,284	H_0 gagal ditolak	Variansi sama
R_a	0,547	H_0 gagal ditolak	Variansi sama
DL	0,930	H_0 gagal ditolak	Variansi sama
KB	1,000	H_0 gagal ditolak	Variansi sama

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.17 menunjukkan bahwa *p-value* pada masing-masing respon adalah lebih besar dari $\alpha = 0,05$. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa data dari kedua sumber, yaitu kombinasi awal dan kombinasi optimum memiliki variansi yang sama.

c. Uji kesamaan rata-rata

Hipotesis untuk pengujian ini adalah sebagai berikut:

$H_0 : \mu_1$ (rata-rata kombinasi awal) = μ_2 (rata-rata kombinasi optimum)

$H_1 : \mu_1$ (rata-rata kombinasi awal) > μ_2 (rata-rata kombinasi optimum)

Kriteria penolakan adalah:

H_0 ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada $\alpha = 0,05$.

Uji kesamaan rata-rata untuk masing-masing respon kombinasi secara rinci ditunjukkan pada Lampiran 9. Hasil uji kesamaan rata-rata antara data pada kombinasi awal dan data pada kombinasi optimum untuk masing-masing respon ditunjukkan pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Hasil uji kesamaan rata-rata

Respon	P-value	Keterangan	Kesimpulan
F_z	0,000	H_0 ditolak	$\mu_1 > \mu_2$
M_z	0,000	H_0 ditolak	$\mu_1 > \mu_2$
R_a	0,000	H_0 ditolak	$\mu_1 > \mu_2$
DL	0,000	H_0 ditolak	$\mu_1 > \mu_2$
KB	0,001	H_0 ditolak	$\mu_1 > \mu_2$

Sumber: Hasil perhitungan

Berdasarkan hasil pengujian kesamaan rata-rata yang ditunjukkan pada Tabel 4.18, *p-value* untuk masing-masing respon adalah kurang dari $\alpha = 0,05$.



Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa secara statistik dengan tingkat keyakinan 95%, nilai rata-rata masing-masing respon pada kondisi awal lebih besar dari nilai rata-rata masing-masing respon pada kondisi optimum. Dengan demikian hasil kombinasi optimum lebih baik jika dibandingkan dengan hasil kombinasi awal.

4.14. Perbandingan antara Respon Hasil Kombinasi Awal dan Kombinasi Optimum

Kombinasi awal merupakan pengaturan kombinasi variabel proses yang biasa digunakan dalam proses pengurdian. Pada penelitian ini kombinasi awal diatur pada level tengah, yaitu pada level dua untuk variabel proses yang memiliki tiga level. Untuk variabel proses yang memiliki dua level kombinasi awal diatur pada level satu. Tujuan dari percobaan dengan menggunakan kombinasi awal ini adalah untuk mengetahui peningkatan karakteristik kinerja dari masing-masing respon baik secara individu maupun secara serentak. Hal ini dilakukan dengan membandingkan hasil respon sebelum dilakukan optimasi (kombinasi awal) dengan respon setelah dilakukan optimasi (kombinasi optimum). Pengaturan kombinasi variabel proses yang digunakan sebagai kondisi awal ditunjukkan pada Tabel 4.19.

Tabel 4.19 Pengaturan level kombinasi awal

Variabel proses	Kombinasi awal	
	Level	Nilai
DT	1	HSS
PA	2	118°
V_f	2	115 mm/menit
V_c	2	62,8 m/menit

Perbandingan rata-rata respon hasil kombinasi awal dan rata-rata respon hasil kombinasi optimum dari masing-masing respon dapat dilihat pada Tabel 4.20.



Tabel 4.20 Perbandingan respon hasil kombinasi awal dan respon hasil kombinasi optimum

Kombinasi	F_z (N)	M_z (Nm)	R_a (μm)	DL	KB (μm)
Kombinasi awal	45,23	0,432	3,123	1,154	320
	48,21	0,385	3,086	1,175	280
	46,15	0,419	2,749	1,159	300
Rata-rata	46,53	0,412	2,986	1,163	300
Kombinasi optimum	36,23	0,149	1,904	1,034	180
	34,52	0,132	1,926	1,021	200
	34,31	0,150	1,828	1,041	160
Rata-rata	35,02	0,144	1,886	1,032	180

Sumber: Hasil pengukuran

Hasil percobaan kombinasi awal secara rinci ditunjukkan pada Lampiran 6. Tabel 4.20 menunjukkan nilai rata-rata respon hasil kombinasi awal untuk tiga kali replikasi, F_z sebesar 46,53 N, M_z sebesar 0,412 Nm, R_a sebesar 2,986 μm , DL sebesar 1,163 dan KB sebesar 300 μm . Nilai rata-rata percobaan konfirmasi untuk tiga kali replikasi seperti yang ditunjukkan Tabel 4.21, F_z sebesar 35,02 N, M_z sebesar 0,144 Nm, R_a sebesar 1,886 μm , DL sebesar 1,032 dan KB sebesar 180 μm .

Langkah berikutnya yaitu perhitungan rasio S/N terhadap nilai-nilai respon yang diperoleh. Hasil perhitungan rasio S/N pada masing-masing respon percobaan pada kondisi awal ditunjukkan pada Tabel 4.21.

Tabel 4.21 Rasio S/N kombinasi awal

	Rasio S/N				
	F_z	M_z	R_a	DL	KB
Kombinasi awal	-33,35	7,70	-9,50	-1,31	-49,54

Sumber: Hasil perhitungan

Setelah menghitung rasio S/N masing-masing respon kemudian dilakukan normalisasi terhadap rasio S/N untuk mendapatkan nilai GRC. Langkah terakhir adalah menentukan nilai GFRG untuk dibandingkan dengan nilai GFRG pada kondisi optimum.



Tabel 4.22 menunjukkan hasil perhitungan nilai GFRG pada percobaan dengan menggunakan kombinasi optimum adalah sebesar 0,8606 dan nilai GFRG pada percobaan dengan menggunakan kombinasi awal adalah sebesar 0,5625. Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa, nilai GFRG setelah dilakukan optimasi mengalami peningkatan sebesar 53 % dibandingkan dengan nilai GFRG sebelum dilakukan optimasi.

Tabel 4.22 Perbandingan GFRG kondisi awal dan kondisi optimum

	GRC					GFRG
	F_z	M_z	R_a	DL	KB	
Kombinasi awal	0,7127	0,5403	0,4297	0,6257	0,4387	0,5625
Kombinasi optimum	0,9065	0,9232	0,9520	0,9508	1,0000	0,8606
Peningkatan						53%

Sumber: Hasil perhitungan

Karakteristik kualitas semakin kecil semakin baik dari respon F_z , M_z , R_a , delaminasi dan kebulatan telah terpenuhi. Hal tersebut ditunjukkan dengan adanya penurunan nilai dari masing-masing respon secara individu setelah dilakukan optimasi. Besarnya penurunan nilai dari masing-masing respon F_z , M_z , R_a , delaminasi dan kebulatan berturut-turut adalah sebesar 24,74%, 65,17%, 36,84%, 11,22% dan 40%. Perbandingan nilai masing-masing respon secara individu sebelum dan setelah dilakukan optimasi ditunjukkan pada Tabel 4.23.

Tabel 4.23 Perbandingan respon individu pada kondisi awal dan kondisi optimum

Variabel respon	Kombinasi awal	Kombinasi optimum	Persentase	Keterangan
F_z	46,53	35,02	24,74%	Turun
M_z	0,412	0,144	65,17%	Turun
R_a	2,986	1,886	36,84%	Turun
DL	1,163	1,032	11,22%	Turun
KB	300	180	40,00%	Turun

Sumber: Hasil perhitungan



4.15. Pembahasan

4.15.1 Pengaruh Variabel-variabel Proses Terhadap Multi Respon

Penelitian optimasi proses penggurdian ini dilakukan dengan menggunakan mesin CNC milling YCM MV86A, dan material yang digunakan adalah KFRP yang ditumpuk/disusun. Analisis variansi dari pengaruh variabel proses DT, PA, V_f dan V_c terhadap multi respon (GFRG) ditunjukkan pada Tabel 4.10. Hasil analisis menunjukkan bahwa variabel proses V_f memiliki pengaruh yang paling besar terhadap nilai GFRG. Variabel proses V_f memiliki kontribusi terhadap total variansi sebesar 46,8%. Selanjutnya, variabel proses PA memberikan kontribusi sebesar 23,82%, variabel proses V_c memberikan kontribusi sebesar 11,33% dan variabel proses DT memberikan kontribusi sebesar 3,48%. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Khrisnamoorthy (2012) tentang optimasi gaya tekan, torsi, *entry delamination*, *exit delamination* dan kesilindrisan lubang pada proses gurdian material CFRP. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa faktor yang memiliki persen kontribusi terbesar ialah gerak makan, sudut ujung pahat dan kecepatan spindel.

Tabel 4.10 juga menunjukkan bahwa *error* memberikan kontribusi yang relatif cukup besar, yaitu sebesar 14,57%. Hal ini berarti bahwa masih ada variabel-variabel lain yang memiliki pengaruh terhadap respon yang diamati. Variabel-variabel tersebut biasa dikenal sebagai faktor *noise*, yaitu variabel-variabel yang sulit atau bahkan tidak bisa dikendalikan. Penentuan nilai-nilai level dari variabel-variabel proses yang kurang tepat juga bisa mengakibatkan variabel-variabel tersebut menjadi tidak signifikan, atau besar kontribusi variabel-variabel terhadap total variansi respon yang diteliti menjadi relatif kecil.

4.15.2 Pengaruh Variabel-variabel Proses Terhadap Respon Individu

Pengaruh dari variabel-variabel proses yang meliputi DT, PA, V_f dan V_c terhadap respon individu F_z , M_z , R_a , DL dan KB dapat diketahui dengan analisis variansi seperti ditunjukkan pada Lampiran 8. Ringkasan hasil



perhitungan persen kontribusi masing-masing faktor dalam mempengaruhi respon secara individu ditunjukkan pada Tabel 4.24 berikut ini.

Tabel 4.24 Persen kontribusi faktor terhadap respon individu

Faktor	Fz		Mz		Ra		DL		KB	
	F	% Kontribusi	F	% Kontribusi	F	% Kontribusi	F	% Kontribusi	F	% Kontribusi
DT	0,29	1,19	0,07	3,31	19,41	14,89	13,6	10,15	14,95	15,41
PA	14,07	43,65	0,14	6,16	16,41	24,93	22,4	34,67	14,81	30,50
Vf	6,96	19,90	8,68	54,72	14,55	21,92	18	27,55	14,45	29,71
Vc	3,77	9,24	0,18	5,84	16,15	24,50	9,59	13,89	3,54	5,61
Error		26,01		29,97		13,75		13,75		18,77

Sumber: Hasil perhitungan

Pengaruh dari variabel-variabel proses terhadap respon individu gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan, delaminasi dan kebulatan dapat dijelaskan sebagai berikut.

a. Respon Gaya Tekan

Berdasarkan Tabel 4.24, faktor-faktor yang signifikan secara statistik mempengaruhi gaya tekan adalah sudut ujung pahat dan kecepatan makan. Kontribusi terbesar terhadap respon gaya tekan diberikan oleh sudut ujung pahat, yaitu sebesar 43,65%, diikuti oleh kecepatan makan sebesar 19,9%. Hal ini sesuai dengan teori gaya tekan pada proses gurdi (Rochim, 1993) yang menyatakan bahwa peningkatan sudut potong utama (K_r) akan meningkatkan gaya tekan (F_z), dimana besarnya K_r adalah setengah dari besarnya sudut ujung pahat (PA). Selain itu, peningkatan gerak makan juga akan meningkatkan gaya tekan.

b. Respon Torsi

Tabel 4.24 menunjukkan faktor-faktor yang signifikan secara statistik mempengaruhi torsi, faktor tersebut ialah kecepatan makan. Kontribusi terbesar terhadap respon torsi diberikan oleh kecepatan makan, yaitu sebesar 53,82%. Hal ini juga sesuai dengan teori torsi pada proses gurdi (Rochim, 1993) yang menyatakan bahwa peningkatan gerak makan akan meningkatkan torsi (M_z).



c. Respon Kekasaran Permukaan

Berdasarkan Tabel 4.24, faktor-faktor yang signifikan secara statistik mempengaruhi kekasaran permukaan adalah jenis pahat, sudut ujung pahat, kecepatan makan dan kecepatan potong. Kontribusi terbesar terhadap respon kekasaran permukaan diberikan oleh sudut ujung pahat, yaitu sebesar 24,93%, diikuti oleh kecepatan potong yaitu sebesar 24,5%, kemudian kecepatan makan sebesar 21,92% dan jenis pahat sebesar 14,89%. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan Davim dkk. (2004) tentang penggurdian pada material GFRP. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa faktor yang paling berpengaruh terhadap respon kekasaran permukaan ialah gerak makan dan kecepatan potong. Kekasaran permukaan yang rendah dapat dicapai dengan kecepatan makan yang rendah dan kecepatan potong yang tinggi.

d. Respon Delaminasi

Berdasarkan Tabel 4.24, faktor-faktor yang signifikan secara statistik mempengaruhi delaminasi adalah jenis pahat, sudut ujung pahat, kecepatan makan dan kecepatan potong. Kontribusi terbesar terhadap respon delaminasi diberikan oleh sudut ujung pahat, yaitu sebesar 34,67%, diikuti oleh kecepatan makan sebesar 27,55%, kemudian kecepatan potong sebesar 13,89% dan jenis pahat sebesar 10,15%. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Khrisnamoorthy (2012) tentang penggurdian pada material komposit. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa faktor yang paling berpengaruh terhadap delaminasi adalah sudut ujung pahat, gerak makan dan kecepatan spindel. Peningkatan sudut ujung pahat, gerak makan dan kecepatan spindel akan meningkatkan delaminasi.

Delaminasi pada material komposit timbul karena adanya mekanisme *bending*. Pada saat ujung pahat gurdi menyentuh lapisan komposit, tidak terjadi pemotongan benda kerja, melainkan terjadi penekanan/ekstrusi benda kerja karena kecepatan potong di ujung pahat gurdi sama dengan nol. Hal ini mengakibatkan terjadinya *bending* pada benda kerja. Pada saat benda kerja dibebani gaya tekan yang melebihi kekuatan ikatan antar lapisan, maka

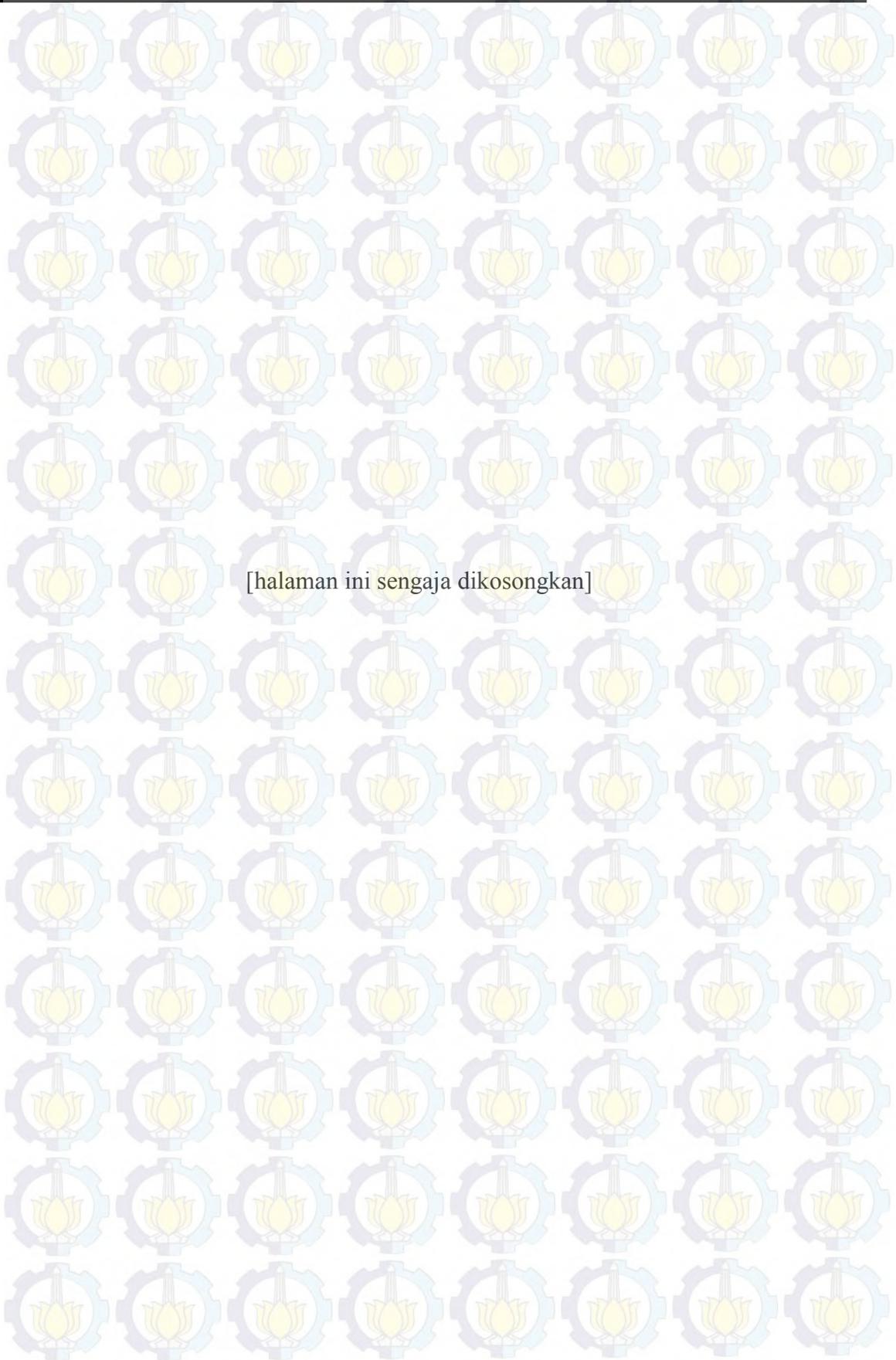


lapisan atas dari benda kerja akan terpisah dengan lapisan di bawahnya (seperti terkelupas). Hal ini menimbulkan terjadinya zona delaminasi di sekitar sisi masuk/permukaan atas dari lubang hasil pengurdian yang disebut *peel up delamination*. Peningkatan sudut ujung pahat dan kecepatan makan akan meningkatkan gaya tekan, sehingga delaminasi akan meningkat.

Mekanisme bending juga terjadi pada sisi keluar lubang/permukaan bawah benda kerja. Ketika ujung pahat menyentuh lapisan paling bawah dari benda kerja, maka terjadi penekanan pada lapisan benda kerja tersebut, sehingga menimbulkan *bending*. Jika benda kerja dibebani gaya tekan yang melebihi kekuatan ikatan antar lapisan, maka lapisan bawah dari benda kerja akan terpisah dari lapisan di atasnya, sehingga timbul zona delaminasi di sekitar sisi keluar lubang yang disebut *push out delamination*.

e. Respon Kebulatan

Berdasarkan Tabel 4.24, faktor-faktor yang signifikan secara statistik mempengaruhi kebulatan adalah jenis pahat, sudut ujung pahat dan kecepatan makan. Kontribusi terbesar terhadap respon kebulatan diberikan oleh sudut ujung pahat, yaitu sebesar 30,5%, kemudian diikuti oleh kecepatan makan dengan kontribusi sebesar 29,71% dan jenis pahat dengan kontribusi sebesar 15,41%. Dari data eksperimen yang diperoleh, terlihat bahwa peningkatan sudut ujung pahat dan kecepatan makan menyebabkan terjadinya peningkatan terhadap gaya tekan. Rochim (1993) menyatakan bahwa peningkatan gaya tekan dan gaya ekstrusi pada ujung pahat akan meningkatkan penyimpangan kebulatan. Dengan demikian, untuk menurunkan penyimpangan kebulatan, maka perlu dilakukan penurunan sudut ujung pahat dan kecepatan makan.



[halaman ini sengaja dikosongkan]



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil percobaan, proses optimasi, percobaan konfirmasi dan analisis yang telah dilakukan, maka dari penelitian yang berjudul “Optimasi Multi Respon dengan Metode Taguchi-grey-fuzzy pada Proses Gurdi Material *Kevlar Fiber Reinforced Polymer* (KFRP) yang Ditumpuk,” ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Kontribusi variabel-variabel proses dalam mengurangi variasi total dari respon gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan, delaminasi dan kebulatan secara serentak adalah sebagai berikut:

- Jenis pahat sebesar 3,48%.
- Sudut ujung pahat sebesar 23,82%.
- Kecepatan makan sebesar 46,8%.
- Kecepatan potong sebesar 11,33%.

2. Pengaturan kombinasi variabel-variabel proses yang secara signifikan dapat meminimalkan gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan, delaminasi dan kebulatan secara serentak adalah sebagai berikut:

- Jenis pahat menggunakan HSS-Cobalt.
- Sudut ujung pahat sebesar 100°.
- Kecepatan makan sebesar 50 mm/menit.
- Kecepatan potong pada 62,8 m/menit.

5.2. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian adalah sebagai berikut:



1. Metode optimasi multi respon dalam penelitian ini adalah *grey relational analysis* dan *fuzzy logic*. Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan metode-metode optimasi yang lain sebagai perbandingan.
2. Pada penelitian ini kontribusi *error* masih sebesar 14,57%, maka pada penelitian selanjutnya disarankan untuk mencoba menggunakan level faktor yang lain, dan menambahkan faktor-faktor penting yang lain untuk mengurangi besarnya *error*.
3. Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk mencoba menggunakan level variabel-variabel proses dengan rentang yang berbeda untuk membandingkan besarnya kontribusi variabel proses dalam mengurangi variasi total respon yang diteliti.

DAFTAR PUSTAKA

Callister, Jr. W. D. (2007), *Material Science and Engineering An Introduction*, Seventh edition, United States of America: Quebeecor Versailles.

Datta, S. dan Mahapatra, S. S. (2010), "Modeling, Simulation and Parametric Optimization of Wire EDM Process using Response Surface Methodology Coupled with Grey-Taguchi Technique," *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 2, hal. 162-183.

Davim, J.P., Reis, P. dan Antonio, C.C. (2004), "Experimental Study of Drilling Glass Fiber Reinforced Plastics (GFRP) Manufactured By Hand Lay-Up," *Composites Science and Technology*, Vol. 64, hal. 289–297.

Dhavamani, C. dan Alwarsamy, T. (2011), "Review On Optimization of Machining Operation," *International Journal of Academy Research*, Vol. 3, hal. 124-132.

Faraz, A., Biermann, D. dan Weinert, K. (2009), "Cutting Edge Rounding: An Innovative Tool Wear Criterion in Drilling CFRP Composite Laminate," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, hal. 1185-1196.

Gaitonde, V. N., Karnik, S. R. dan Davim, J. P. (2007), "Taguchi Multiple-Performance Characteristics Optimization in Drilling of Medium Density Fibreboard (MDF) to Minimize Delamination Using Utility Concept." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 196, hal. 73-78.

Hansda, S., dan Banerjee, S. (2014), "Optimizing Multi Characteristics in Drilling of GFRP Composite using Utility Concept with Taguchi's Approach." *International Conference on Material Processing and Characterisation*, Vol. 3, hal. 1476-1488.

Huang, J. T. dan Liao, Y. S. (2003), "Optimization of Machining Parameters of Wire-EDM based on Grey Relational and Statistical Analysis," *International Journal of Production Research*, Vol. 41, hal. 1707–1720.

Jie, L. (2013), "The formation and effect of interlayer gap in dry drilling of stacked metal materials," *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, Vol. 38, hal. 350-355.

Jones, P. M. (1975), *Mechanics of Composite Materials*, First edition, Scripta Book Company, Washington D.C.

Kalpakjian, S. dan Schmid, S. R. (2009), *Manufacturing Engineering and Technology*, Sixth Edition, Pearson, New York.

Khrisnamoorthy, A., Boopathy, S., Palanikumar,k. dan Davim J. (2012), "Application of Grey Fuzzy Logic for the Optimization of Drilling

- Parameters for CFRP Composites with Multiple Performance Characteristic,” *Measurement*, Vol 45, hal. 1286-1296.
- Kusumadewi, S. dan Purnomo, H. (2010), *Aplikasi Logika Fuzzy untuk Pendukung Keputusan*, Edisi kedua, Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Lin, J. L. dan Lin, C. L. (2002), “The Use of Orthogonal Array with Grey Relational Analysis to Optimize the Electrical Discharge Machining Process Performance with Multiple Characteristics,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, hal. 237–244.
- Liu, D., Tang, Y. dan Cong, W.L. (2012), “A Review of Mechanical Drilling for Composite Laminates,” *Composite Structures*, Vol. 94, hal. 1265–1279.
- Montgomery, D. C. (2009), *Design and Analysis of Experiment*, Seventh edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Mukherjee, I. dan Pradip, K. R. (2006), “A Review of Optimization Techniques In Metal Cutting Processes,” *Journal Computers & Industrial Engineering*, Vol. 50, hal. 15–34.
- Nagaraja, Herbert, M. A., Shetty, D., Shetty, R. dan Shivamurthy, B. (2013), “Effect of Process Parameters on Delamination, Thrust Force, and Torque in Drilling of Carbon Fiber Epoxy Composite,” *Research Journal of Recent Sciences*, Vol. 2, hal. 47-51.
- Palanikumar, K., Prakash, S. dan Shanmugam, K. (2008), “Evaluation of Delamination in Drilling GFRP Composites,” *International Journal of Materials and Manufacturing Processe*, Vol. 8, hal. 858-864.
- Park, K. H., Kwon, P. dan Kim, D. (2012), “Wear Characteristic on BAM Coated Carbide Tool in Drilling of Composite/Titanium Stack,” *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, Vol. 13, hal. 1073-1076.
- Rochim, T. (1993), *Proses Pemesinan*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Rochim, T. (2001), *Spesifikasi Metrologi dan Kontrol Kualitas Geometrik*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Ross, P. J. (1996), *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, Second edition, McGraw-Hill Companies, Inc., Taiwan.
- Schwartz, W. F. (1986), *Composite Materials Handbook*, First edition, McGraw-Hill Inc., New York.
- Singiresu, S. R. (2009), *Engineering Opimization, Theory and Practice*. Fourth edition, John Wiley & Sons, New York.
- Soejanto, I. (2009), *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*, Graha Ilmu, Yogyakarta.

Tanoto, Y. Y. (2013), *Optimasi Multirespon pada Proses Gurdi dengan Menggunakan Metode Taguchi-Grey-Fuzzy*, Tesis yang Tidak Dipublikasikan, Program Magister Teknik Mesin, FTI ITS, Surabaya.

Tosun, N. (2006), "Determination of optimum parameters for multi-performance characteristics in drilling by using grey relational analysis," *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, Vol. 28, hal. 450-455.

Vankanti, V. K. dan Ganta, V. K. (2013), "Optimization of Process Parameters in Drilling of GFRP Composite Using Taguchi Method," *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 3, hal. 35-41.

Vesudevan, H., Rajguru, R. R. dan Deshpande. (2014), "Multiobjective Optimization of Drilling Characteristics for NEMA G-11 GFRP/Epoxy Composite using Desirability coupled with Taguchi Method," *Procedia Engineering Global Congress On Manufacturing And Management*, Vol. 97, hal. 522 – 530.

Zheng, L., Zhou, H. dan Gao, C. (2012), "Hole drilling in ceramics/Kevlar fiber reinforced plastics double-plate composite armor using diamond core drill," *Journal Material and Design*, Vol. 40, hal. 461-466.

Zadeh, L. (1965), "Fuzzy Sets," *Jurnal Information and Control*, Vol. 8, hal. 338–353.

http://en.wikipedia.org/wiki/surface_finish, diakses 25 maret 2015.

Lampiran 1

DATA GAYA TEKAN (F_z)

Tabel L-1 Gaya tekan

Komb,	Gaya Tekan		Rata-rata F_z (N)
	Replikasi 1 (N)	Replikasi 2 (N)	
1	32,16	31,36	31,76
2	67,84	68,64	68,24
3	97,81	98,61	98,21
4	76,35	75,95	76,15
5	46,73	46,33	46,53
6	129,10	129,50	129,30
7	46,15	45,15	45,65
8	167,00	168,00	167,50
9	210,70	211,70	211,20
10	83,40	84,00	83,70
11	53,13	52,53	52,83
12	72,27	71,67	71,97
13	58,09	58,59	58,34
14	108,55	108,05	108,30
15	96,75	97,25	97,00
16	124,47	123,73	124,10
17	173,87	173,13	173,50
18	166,83	167,57	167,20

Sumber: Hasil pengukuran

Lampiran 2

DATA TORSI (M_z)

Tabel L-2 Torsi

Komb,	TORSI		
	Replikasi 1 (Nm)	Replikasi 2 (Nm)	Rata-rata M_z (Nm)
1	0,749	0,869	0,809
2	1,138	1,018	1,078
3	0,916	1,036	0,976
4	0,558	0,458	0,508
5	0,362	0,462	0,412
6	2,049	1,949	1,999
7	0,662	0,722	0,692
8	1,065	1,005	1,035
9	1,601	1,541	1,571
10	0,103	0,153	0,128
11	1,621	1,571	1,596
12	1,695	1,745	1,720
13	0,416	0,310	0,363
14	0,924	1,030	0,977
15	1,616	1,510	1,563
16	0,522	0,564	0,543
17	0,380	0,338	0,359
18	1,324	1,366	1,345

Sumber: Hasil pengukuran

Lampiran 3

DATA KEKASARAN PERMUKAAN (R_a)

Tabel L-3 Kekasaran Permukaan

Komb,	Replikasi 1				Replikasi 2				R_a 1 rata-rata (μm)	R_a 1 rata-rata (μm)
	Lokasi				Lokasi					
	1 (μm)	2 (μm)	3 (μm)	4 (μm)	1 (μm)	2 (μm)	3 (μm)	4 (μm)		
1	2,008	1,978	1,982	1,984	1,840	1,858	1,847	1,848	1,988	1,848
2	2,239	2,209	2,213	2,215	2,071	2,089	2,078	2,079	2,219	2,079
3	2,965	2,935	2,939	2,941	2,797	2,815	2,804	2,805	2,945	2,805
4	3,132	3,102	3,106	3,108	3,156	3,174	3,163	3,164	3,112	3,164
5	2,980	2,950	2,954	2,956	3,004	3,022	3,011	3,012	2,960	3,012
6	3,783	3,753	3,757	3,759	3,703	3,721	3,710	3,711	3,763	3,711
7	1,920	1,890	1,894	1,896	1,930	1,948	1,937	1,938	1,900	1,938
8	3,378	3,348	3,352	3,354	3,312	3,330	3,319	3,320	3,358	3,320
9	3,065	3,035	3,039	3,041	3,075	3,093	3,082	3,083	3,045	3,083
10	2,247	2,217	2,221	2,223	2,157	2,175	2,164	2,165	2,227	2,165
11	2,396	2,366	2,370	2,372	2,430	2,448	2,437	2,438	2,376	2,438
12	2,153	2,123	2,127	2,129	2,063	2,081	2,070	2,071	2,133	2,071
13	1,975	1,945	1,949	1,951	2,027	2,045	2,034	2,035	1,955	2,035
14	3,064	3,034	3,038	3,040	2,956	2,974	2,963	2,964	3,044	2,964
15	2,859	2,829	2,833	2,835	2,911	2,929	2,918	2,919	2,839	2,919
16	2,067	2,037	2,041	2,043	1,931	1,949	1,938	1,939	2,047	1,939
17	2,598	2,568	2,572	2,574	2,678	2,696	2,685	2,686	2,578	2,686
18	2,046	2,016	2,020	2,022	1,910	1,928	1,917	1,918	2,026	1,918

Sumber: Hasil pengukuran

Lampiran 4

DATA DELAMINASI

Tabel L-4 Delaminasi

NO	Replikasi 1				Replikasi 2				DL 1 rata-rata	DL 2 rata- rata
	Lokasi				Lokasi					
	1	2	3	4	1	2	3	4		
1	1,113	1,083	1,087	1,089	1,095	1,113	1,101	1,102	1,093	1,103
2	1,105	1,075	1,079	1,081	1,087	1,105	1,094	1,095	1,085	1,095
3	1,347	1,317	1,321	1,323	1,329	1,347	1,336	1,337	1,327	1,337
4	1,330	1,300	1,304	1,306	1,298	1,316	1,304	1,305	1,310	1,306
5	1,188	1,158	1,162	1,164	1,156	1,174	1,162	1,163	1,168	1,164
6	1,443	1,413	1,417	1,419	1,411	1,429	1,417	1,418	1,423	1,419
7	1,297	1,267	1,271	1,273	1,285	1,303	1,291	1,292	1,277	1,293
8	1,450	1,420	1,424	1,426	1,406	1,424	1,412	1,413	1,430	1,414
9	1,515	1,485	1,489	1,491	1,503	1,521	1,509	1,510	1,495	1,511
10	1,067	1,037	1,041	1,043	1,029	1,047	1,036	1,037	1,047	1,037
11	1,198	1,168	1,172	1,174	1,179	1,197	1,186	1,187	1,178	1,187
12	1,172	1,142	1,146	1,148	1,134	1,152	1,141	1,142	1,152	1,142
13	1,101	1,071	1,075	1,077	1,078	1,096	1,084	1,085	1,081	1,086
14	1,311	1,281	1,285	1,287	1,278	1,296	1,284	1,285	1,291	1,286
15	1,355	1,325	1,329	1,331	1,332	1,350	1,338	1,339	1,335	1,340
16	1,274	1,244	1,248	1,250	1,232	1,250	1,238	1,239	1,254	1,240
17	1,262	1,232	1,236	1,238	1,220	1,238	1,227	1,228	1,242	1,228
18	1,320	1,290	1,294	1,296	1,305	1,323	1,312	1,313	1,300	1,313

Sumber: Hasil pengukuran

Lampiran 5

DATA KEBULATAN

Tabel L-5 Kebulatan

Komb,	Replikasi 1		Replikasi 2		KB 1 rata-rata (μm)	KB 1 rata-rata (μm)
	Lokasi 1 (μm)	Lokasi 2 (μm)	Lokasi 1 (μm)	Lokasi 2 (μm)		
1	180	160	200	180	170	190
2	220	220	200	240	220	220
3	240	280	220	300	260	260
4	260	240	240	220	250	230
5	260	320	320	300	290	310
6	400	400	400	400	400	400
7	240	280	280	320	260	300
8	400	380	380	360	390	370
9	400	400	400	400	400	400
10	200	180	220	200	190	210
11	220	220	200	240	220	220
12	220	200	200	180	210	190
13	200	180	180	160	190	170
14	280	260	300	280	270	290
15	340	320	320	300	330	310
16	220	200	240	220	210	230
17	260	260	280	240	260	260
18	300	280	280	260	290	270

Sumber: Hasil pengukuran

Lampiran 6

PERCOBAAN AWAL DAN PERCOBAAN KONFIRMASI

Tabel L-6 Gaya tekan pada Kombinasi Awal

Percobaan					F _z Kombinasi Awal (N)
No	DT	PA	V _f	V _c	
1	1	2	2	2	45,23
2	1	2	2	2	48,21
3	1	2	2	2	46,15

Sumber: Hasil pengukuran

Tabel L-7 Gaya tekan pada Kombinasi Optimum

Percobaan					F _z Kombinasi Optimum (N)
No	DT	PA	V _f	V _c	
1	2	1	1	2	36,23
2	2	1	1	2	34,52
3	2	1	1	2	34,31

Sumber: Hasil pengukuran

Tabel L-8 Torsi pada Kombinasi Awal

Percobaan					M _z Kombinasi Awal (N)
No	DT	PA	V _f	V _c	
1	1	2	2	2	0,432
2	1	2	2	2	0,385
3	1	2	2	2	0,419

Sumber: Hasil pengukuran

Tabel L-9 Torsi pada Kombinasi Optimum

Percobaan					M _z Kombinasi Optimum (N)
No	DT	PA	V _f	V _c	
1	2	1	1	2	0,149
2	2	1	1	2	0,132
3	2	1	1	2	0,150

Sumber: Hasil pengukuran

Tabel L-10 Kekasaran Permukaan pada Kombinasi Awal

Percobaan					R _a Kombinasi Awal				R _a rata-rata (μm)
No	DT	PA	V _f	V _c	L1	L2	L3	L4	
1	1	2	2	2	3,143	3,143	3,113	3,117	3,119
2	1	2	2	2	3,106	3,106	3,076	3,080	3,082
3	1	2	2	2	3,156	2,769	2,739	2,743	2,745

Sumber: Hasil pengukuran

Tabel L-11 Kekasaran Permukaan pada Kombinasi Optimum

Percobaan					R _a Kombinasi Optimum				R _a rata-rata (μm)
No	DT	PA	Vf	Vc	L1	L2	L3	L4	
1	2	1	1	2	1,924	1,894	1,898	1,900	1,904
2	2	1	1	2	1,946	1,916	1,920	1,922	1,926
3	2	1	1	2	1,848	1,818	1,822	1,824	1,828

Sumber: Hasil pengukuran

Tabel L-12 Delaminasi pada Kombinasi Awal

Percobaan					DL Kombinasi Awal				DL rata-rata
No	DT	PA	Vf	Vc	L1	L2	L3	L4	
1	2	1	1	2	1,174	1,144	1,148	1,150	1,154
2	2	1	1	2	1,195	1,165	1,169	1,171	1,175
3	2	1	1	2	1,179	1,149	1,153	1,155	1,159

Sumber: Hasil pengukuran

Tabel L-13 Delaminasi pada Kombinasi Optimum

Percobaan					DL Kombinasi Optimum				DL rata-rata
No	DT	PA	Vf	Vc	L1	L2	L3	L4	
1	2	1	1	2	1,054	1,024	1,028	1,030	1,034
2	2	1	1	2	1,041	1,011	1,015	1,017	1,021
3	2	1	1	2	1,061	1,031	1,035	1,037	1,041

Sumber: Hasil pengukuran

Tabel L-14 Kebulatan pada Kombinasi Awal

Percobaan					KB Kombinasi Awal		KB rata-rata (μm)
No	DT	PA	Vf	Vc	L1 (μm)	L2 (μm)	
1	1	2	2	2	330	310	320
2	1	2	2	2	280	280	280
3	1	2	2	2	310	290	300

Sumber: Hasil pengukuran

Tabel L-15 Kebulatan pada Kombinasi Optimum

Percobaan					KB Kombinasi Optimum		KB rata-rata (μm)
No	DT	PA	Vf	Vc	L1 (μm)	L2 (μm)	
1	1	2	2	2	180	180	180
2	1	2	2	2	210	190	200
3	1	2	2	2	160	160	160

Sumber: Hasil pengukuran

Lampiran 7

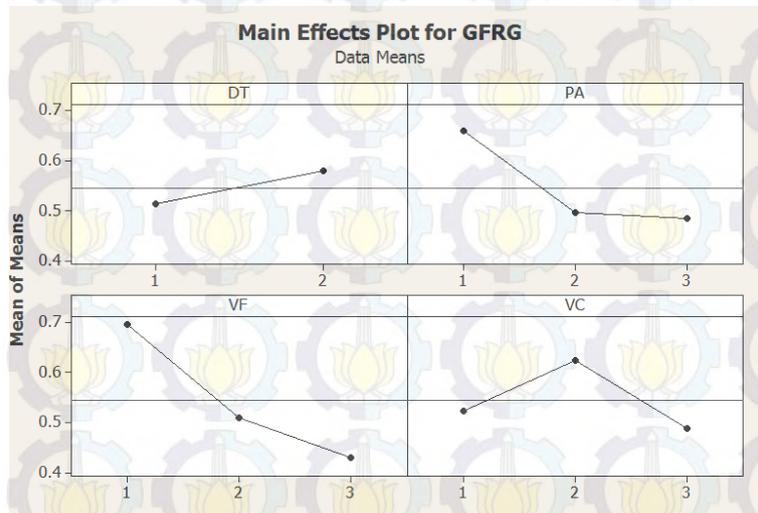
ANAVA GFRG

Tabel L-16 ANAVA GFRG

Analysis of Variance for GFRG, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
DT	1	0,019536	0,019536	0,019536	5,05	0,048
PA	2	0,115090	0,115090	0,057545	14,89	0,001
VF	2	0,218722	0,218722	0,109361	28,30	0,000
VC	2	0,058804	0,058804	0,029402	7,61	0,010
Error	10	0,038649	0,038649	0,003865		
Total	17	0,450801				

S = 0,0621680 R-Sq = 91,43% R-Sq(adj) = 85,43%



Lampiran 8

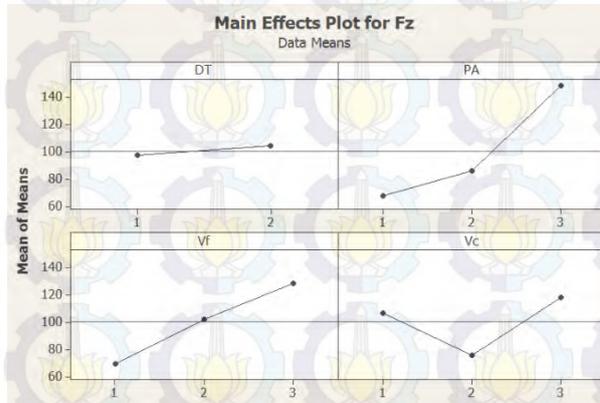
ANAVA RESPON INDIVIDUAL

Tabel L-17 ANAVA Gaya Tekan

Analysis of Variance for Fz, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
DT	1	216,3	216,3	216,3	0,29	0,605
PA	2	21340,8	21340,8	10670,4	14,07	0,001
Vf	2	10555,5	10555,5	5277,7	6,96	0,013
Vc	2	5714,4	5714,4	2857,2	3,77	0,060
Error	10	7585,0	7585,0	758,5		
Total	17	45412,0				

S = 27,5408 R-Sq = 83,30% R-Sq(adj) = 71,61%

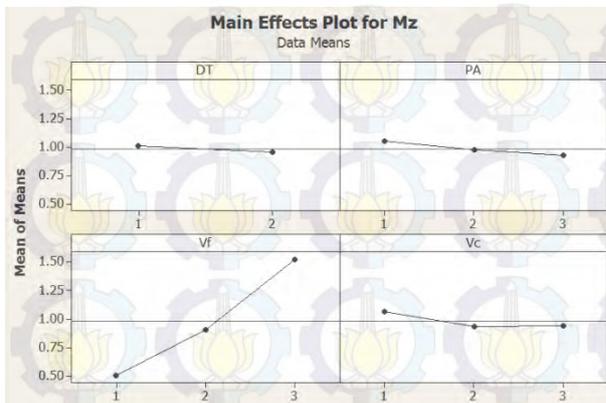


Tabel L-18 ANAVA Torsi

Analysis of Variance for Mz, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
DT	1	0,0131	0,0131	0,0131	0,07	0,794
PA	2	0,0496	0,0496	0,0248	0,14	0,875
Vf	2	3,1796	3,1796	1,5898	8,68	0,007
Vc	2	0,0664	0,0664	0,0332	0,18	0,837
Error	10	1,8325	1,8325	0,1832		
Total	17	5,1412				

S = 0,428075 R-Sq = 64,36% R-Sq(adj) = 39,41%



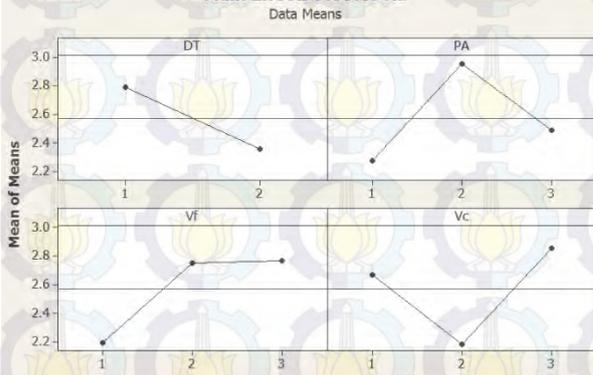
Tabel L-19 ANAVA Kekasaran Permukaan

Analysis of Variance for Ra, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
DT	1	0,86461	0,86461	0,86461	19,41	0,001
PA	2	1,46194	1,46194	0,73097	16,41	0,001
Vf	2	1,29609	1,29609	0,64804	14,55	0,001
Vc	2	1,43827	1,43827	0,71914	16,15	0,001
Error	10	0,44542	0,44542	0,04454		
Total	17	5,50633				

S = 0,211050 R-Sq = 91,91% R-Sq(adj) = 86,25%

Main Effects Plot for Ra



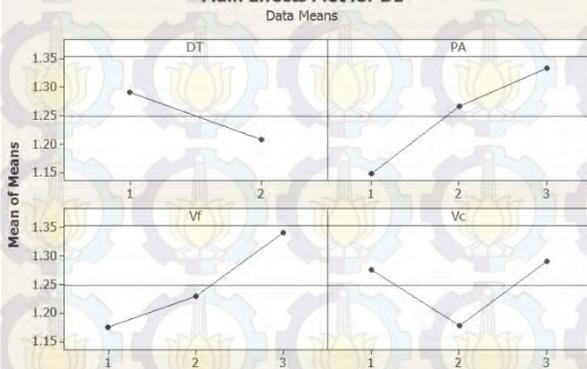
Tabel L-20 ANAVA Delaminasi

Analysis of Variance for DL, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
DT	1	0,031617	0,031617	0,031617	13,55	0,004
PA	2	0,104735	0,104735	0,052368	22,44	0,000
Vf	2	0,084166	0,084166	0,042083	18,03	0,000
Vc	2	0,044745	0,044745	0,022372	9,59	0,005
Error	10	0,023337	0,023337	0,002334		
Total	17	0,288600				

S = 0,0483087 R-Sq = 91,91% R-Sq(adj) = 86,25%

Main Effects Plot for DL

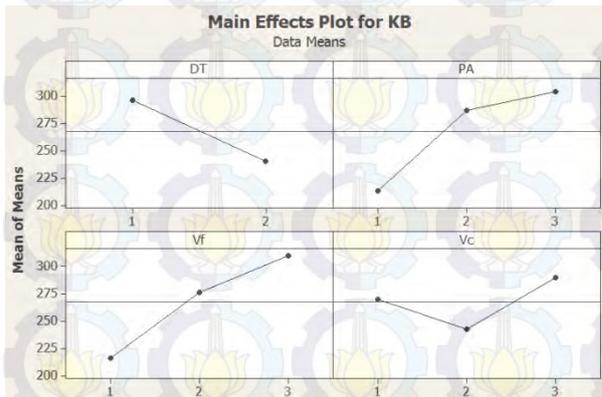


Tabel L-21 ANAVA Kebulatan

Analysis of Variance for KB, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
DT	1	13889	13889	13889	14,95	0,003
PA	2	27511	27511	13756	14,81	0,001
Vf	2	26844	26844	13422	14,45	0,001
Vc	2	6578	6578	3289	3,54	0,069
Error	10	9289	9289	929		
Total	17	84111				

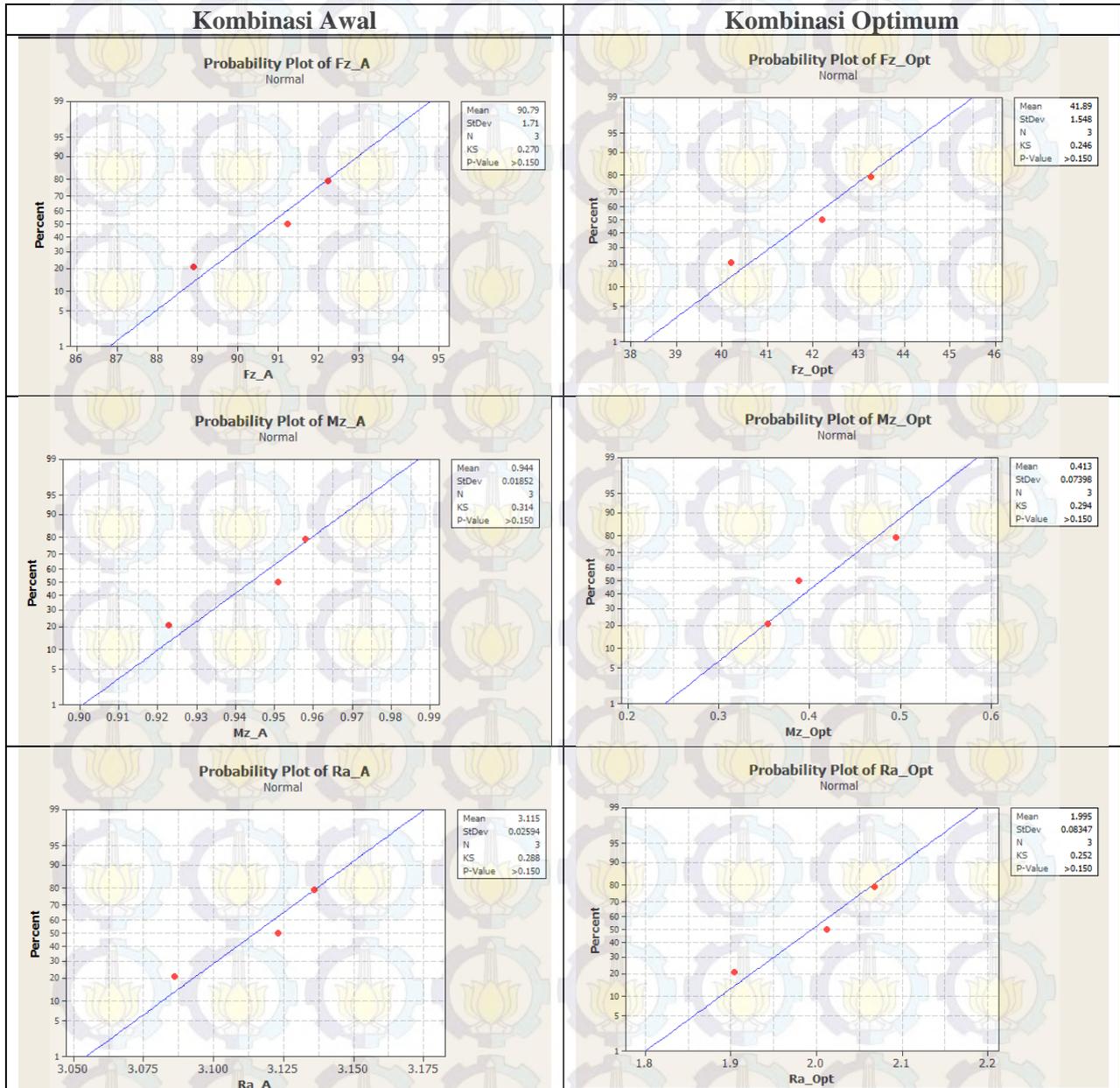
S = 30,4777 R-Sq = 88,96% R-Sq(adj) = 81,23%

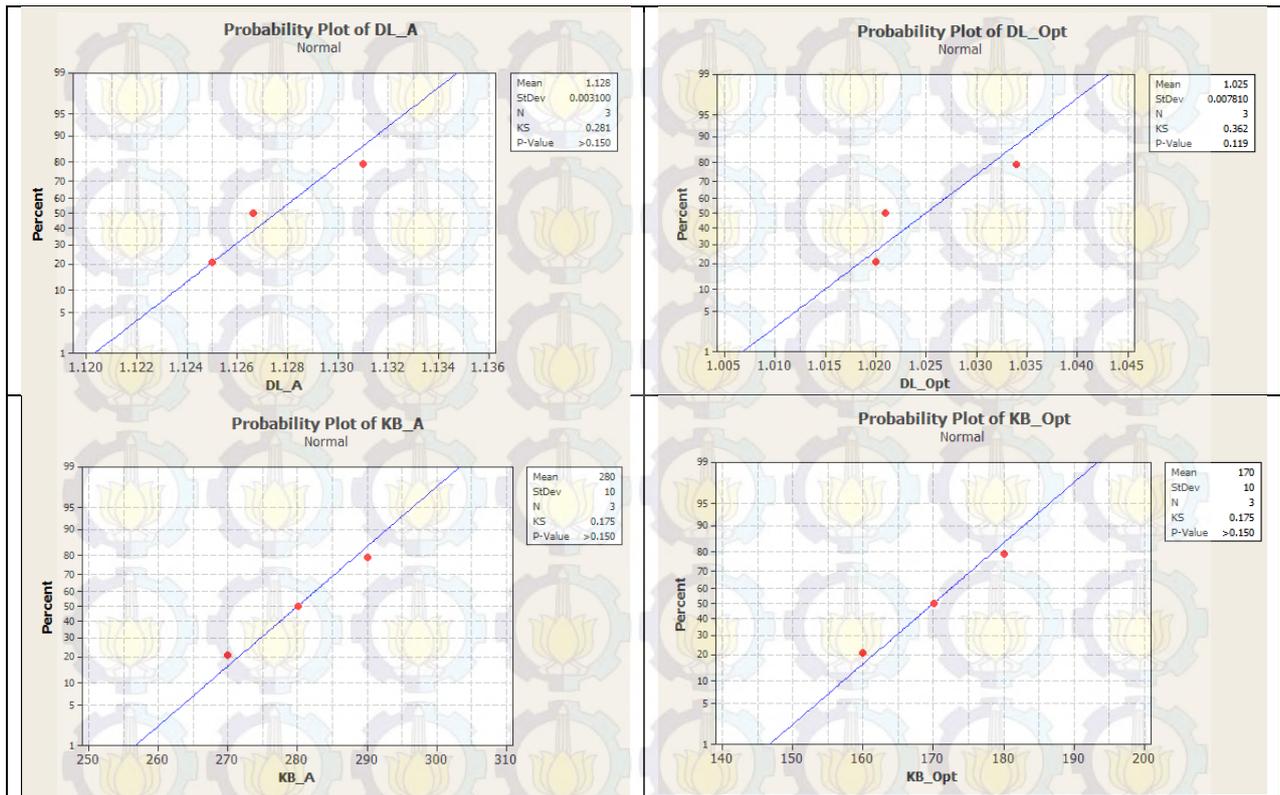


Lampiran 9

UJI PERBEDAAN RESPON KOMBINASI AWAL DAN KOMBINASI OPTIMUM

1. Uji Kenormalan Kombinasi Awal dan Kombinasi Optimum





2. Uji Kesamaan Variansi

Test and CI for Two Variances: Fz_A, Fz_Opt

Method

Null hypothesis $\text{Sigma}(\text{Fz_A}) / \text{Sigma}(\text{Fz_Opt}) = 1$
 Alternative hypothesis $\text{Sigma}(\text{Fz_A}) / \text{Sigma}(\text{Fz_Opt}) \text{ not } = 1$
 Significance level $\text{Alpha} = 0,05$

Statistics

Variable	N	StDev	Variance
Fz_A	3	1,526	2,328
Fz_Opt	3	1,053	1,109

Ratio of standard deviations = 1,449
 Ratio of variances = 2,099

95% Confidence Intervals

Distribution	CI for StDev Ratio	CI for Variance Ratio
Normal	(0,232, 9,048)	(0,054, 81,875)
Continuous	(*, *)	(*, *)

Tests

Method	DF1	DF2	Test Statistic	P-Value
F Test (normal)	2	2	2,10	0,645
Levene's Test (any continuous)	1	4	0,19	0,683

Test and CI for Two Variances: Mz_A, Mz_Opt

Method

Null hypothesis $\text{Sigma}(\text{Mz_A}) / \text{Sigma}(\text{Mz_Opt}) = 1$
 Alternative hypothesis $\text{Sigma}(\text{Mz_A}) / \text{Sigma}(\text{Mz_Opt}) \text{ not} = 1$
 Significance level Alpha = 0,05

Statistics

Variable	N	StDev	Variance
Mz_A	3	0,024	0,001
Mz_Opt	3	0,010	0,000

Ratio of standard deviations = 2,456
 Ratio of variances = 6,033

95% Confidence Intervals

Distribution of Data	CI for StDev Ratio	CI for Variance Ratio
Normal	(0,393, 15,339)	(0,155, 235,286)
Continuous	(*, *)	(*, *)

Tests

Method	DF1	DF2	Test Statistic	P-Value
F Test (normal)	2	2	6,03	0,284
Levene's Test (any continuous)	1	4	0,76	0,433

Test and CI for Two Variances: Ra_A, Ra_Opt

Method

Null hypothesis $\text{Sigma}(\text{Ra_A}) / \text{Sigma}(\text{Ra_Opt}) = 1$
 Alternative hypothesis $\text{Sigma}(\text{Ra_A}) / \text{Sigma}(\text{Ra_Opt}) \text{ not} = 1$
 Significance level Alpha = 0,05

Statistics

Variable	N	StDev	Variance
Ra_A	3	0,084	0,007
Ra_Opt	3	0,051	0,003

Ratio of standard deviations = 1,629
 Ratio of variances = 2,654

95% Confidence Intervals

Distribution of Data	CI for StDev Ratio	CI for Variance Ratio
Normal	(0,261, 10,173)	(0,068, 103,494)
Continuous	(*, *)	(*, *)

Tests

Method	DF1	DF2	Test Statistic	P-Value
F Test (normal)	2	2	2,65	0,547
Levene's Test (any continuous)	1	4	0,23	0,655

Test and CI for Two Variances: DL_A, DL_Opt

Method

Null hypothesis $\Sigma(\text{DL_A}) / \Sigma(\text{DL_Opt}) = 1$
 Alternative hypothesis $\Sigma(\text{DL_A}) / \Sigma(\text{DL_Opt}) \text{ not} = 1$
 Significance level Alpha = 0,05

Statistics

Variable	N	StDev	Variance
DL_A	3	0,011	0,000
DL_Opt	3	0,010	0,000

Ratio of standard deviations = 1,073
 Ratio of variances = 1,151

95% Confidence Intervals

Distribution of Data	CI for StDev Ratio	CI for Variance Ratio
Normal	(0,172, 6,699)	(0,030, 44,882)
Continuous	(*, *)	(*, *)

Tests

Method	DF1	DF2	Test Statistic	P-Value
F Test (normal)	2	2	1,15	0,930
Levene's Test (any continuous)	1	4	0,00	0,972

Test and CI for Two Variances: KB_A, KB_Opt

Method

Null hypothesis $\Sigma(\text{KB_A}) / \Sigma(\text{KB_Opt}) = 1$
 Alternative hypothesis $\Sigma(\text{KB_A}) / \Sigma(\text{KB_Opt}) \text{ not} = 1$
 Significance level Alpha = 0,05

Statistics

Variable	N	StDev	Variance
KB_A	3	20,000	400,000
KB_Opt	3	20,000	400,000

Ratio of standard deviations = 1,000
 Ratio of variances = 1,000

95% Confidence Intervals

Distribution of Data	CI for StDev Ratio	CI for Variance Ratio
Normal	(0,160, 6,245)	(0,026, 39,000)
Continuous	(*, *)	(*, *)

Tests

Method	DF1	DF2	Test Statistic	P-Value
F Test (normal)	2	2	1,00	1,000
Levene's Test (any continuous)	1	4	0,00	1,000

3. Uji Kesamaan Rata-Rata

Two-Sample T-Test and CI: Fz_A, Fz_Opt

Two-sample T for Fz_A vs Fz_Opt

	N	Mean	StDev	SE Mean
Fz_A	3	46,53	1,53	0,88
Fz_Opt	3	35,02	1,05	0,61

Difference = mu (Fz_A) - mu (Fz_Opt)

Estimate for difference: 11,51

95% lower bound for difference: 9,23

T-Test of difference = 0 (vs >): T-Value = 10,75 P-Value = 0,000 DF = 4

Both use Pooled StDev = 1,3110

Two-Sample T-Test and CI: Mz_A, Mz_Opt

Two-sample T for Mz_A vs Mz_Opt

	N	Mean	StDev	SE Mean
Mz_A	3	0,4120	0,0243	0,014
Mz_Opt	3	0,14350	0,00988	0,0057

Difference = mu (Mz_A) - mu (Mz_Opt)

Estimate for difference: 0,2685

95% lower bound for difference: 0,2362

T-Test of difference = 0 (vs >): T-Value = 17,75 P-Value = 0,000 DF = 4

Both use Pooled StDev = 0,0185

Two-Sample T-Test and CI: Ra_A, Ra_Opt

Two-sample T for Ra_A vs Ra_Opt

	N	Mean	StDev	SE Mean
Ra_A	3	3,0573	0,0838	0,048
Ra_Opt	3	1,8860	0,0514	0,030

Difference = mu (Ra_A) - mu (Ra_Opt)

Estimate for difference: 1,1713

95% lower bound for difference: 1,0504

T-Test of difference = 0 (vs >): T-Value = 20,64 P-Value = 0,000 DF = 4

Both use Pooled StDev = 0,0695

Two-Sample T-Test and CI: DL_A, DL_Opt

Two-sample T for DL_A vs DL_Opt

	N	Mean	StDev	SE Mean
DL_A	3	1,1625	0,0110	0,0064
DL_Opt	3	1,0321	0,0103	0,0059

Difference = mu (DL_A) - mu (DL_Opt)

Estimate for difference: 0,13045

95% lower bound for difference: 0,11189

T-Test of difference = 0 (vs >): T-Value = 14,98 P-Value = 0,000 DF = 4

Both use Pooled StDev = 0,0107

Two-Sample T-Test and CI: KB_A, KB_Opt

Two-sample T for KB_A vs KB_Opt

			SE	
	N	Mean	StDev	Mean
KB_A	3	300,0	20,0	12
KB_Opt	3	180,0	20,0	12

Difference = μ (KB_A) - μ (KB_Opt)

Estimate for difference: 120,0

95% lower bound for difference: 85,2

T-Test of difference = 0 (vs >): T-Value = 7,35 P-Value = 0,001 DF = 4

Both use Pooled StDev = 20,0000

BIODATA PENULIS



AM. Mufarrih, dilahirkan di Kota Madiun pada tanggal 30 April 1989. Penulis adalah anak pertama dari empat bersaudara pasangan Bapak Basyirul Fuat dan Ibu Marfungatin. Pendidikan dasar ditempuh di SDN 2 Kepet, lulus pada tahun 2000. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan sekolah menengah pertama di SMP Negeri 1 Dagangan, lulus pada tahun 2003. Pendidikan sekolah menengah atas ditempuh di SMK Negeri 1 Madiun sampai pada tahun 2006. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan S1 selama empat tahun di Universitas Negeri Surabaya jurusan Pendidikan Teknik Mesin bidang studi Mesin Produksi. Gelar sarjana pendidikan diperoleh setelah menamatkan pendidikannya pada tahun 2010. Pada tahun 2013 penulis melanjutkan studi S2 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS) tepatnya di jurusan Teknik Mesin program studi Rekayasa dan Sistem Manufaktur dengan program beasiswa BPPDN Calon Dosen. Saat ini penulis mempunyai keinginan untuk mengembangkan hasil dari tesisnya menjadi penelitian-penelitian lanjut di bidang proses manufaktur.