

TUGAS AKHIR - TM184835

**OPTIMASI GAYA POTONG DAN KEKASARAN
PERMUKAAN UNTUK PROSES GERINDA PERMUKAAN
PADA SUPERALLOY INCONEL 718**

DAVID VERREL JULIANO

NRP 0211184000012

Dosen Pembimbing

Mohammad Khoirul Effendi, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.

NIP 198204142010121001

PROGRAM STUDI SARJANA

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - TM184835

**OPTIMASI GAYA POTONG DAN KEKASARAN
PERMUKAAN UNTUK PROSES GERINDA PERMUKAAN
PADA SUPERALLOY INCONEL 718**

DAVID VERREL JULIANO

NRP 0211184000012

Dosen Pembimbing

Mohammad Khoirul Effendi, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.

NIP 198204142010121001

PROGRAM STUDI SARJANA

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



FINAL PROJECT - TM184835

**OPTIMIZATION OF CUTTING FORCE AND SURFACE
ROUGHNESS FOR SURFACE GRINDING PROCESSES ON
SUPERALLOY INCONEL 718**

DAVID VERREL JULIANO

NRP 02111840000012

Advisor

Mohammad Khoirul Effendi, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.

NIP 198204142010121001

UNDERGRADUATE STUDY PROGRAM

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

HALAMAN PENGESAHAN

OPTIMASI GAYA POTONG DAN KEKASARAN PERMUKAAN UNTUK PROSES GERINDA PERMUKAAN PADA *SUPERALLOY INCONEL 718*

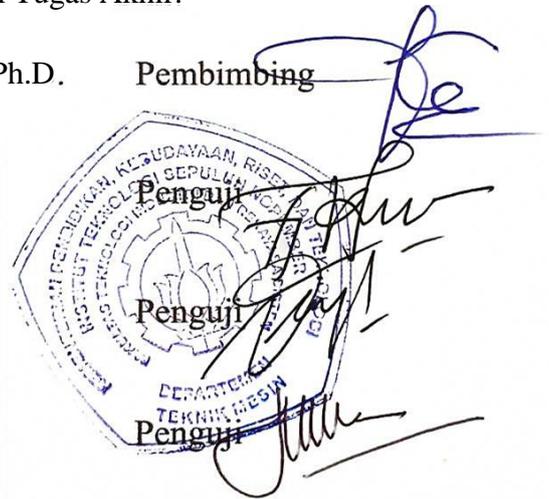
TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Mesin
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **DAVID VERREL JULIANO**
NRP. 0211184000012

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Mohammad Khoirul Effendi, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D. Pembimbing
2. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA Penguji
3. Dinny Harnany, S.T., M.Sc. Penguji
4. Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.T. Penguji



SURABAYA
Juli, 2022

APPROVAL SHEET

OPTIMIZATION OF CUTTING FORCE AND SURFACE ROUGHNESS FOR SURFACE GRINDING PROCESSES ON SUPERALLOY INCONEL 718

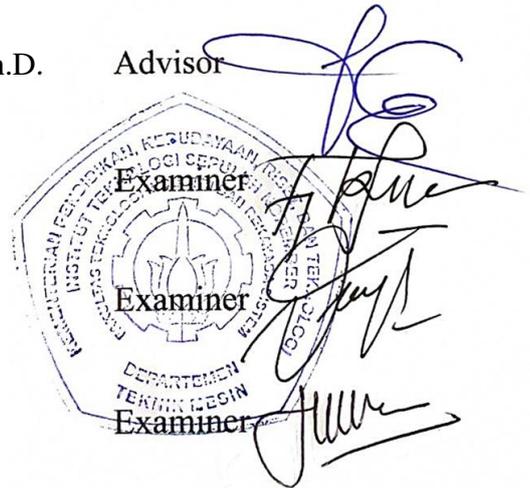
FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a bachelor of engineering degree at
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By: **DAVID VERREL JULIANO**
NRP. 0211184000012

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Mohammad Khoirul Effendi, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D. Advisor
2. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA Examiner
3. Dinny Harnany, S.T., M.Sc. Examiner
4. Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.T. Examiner



SURABAYA
July, 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

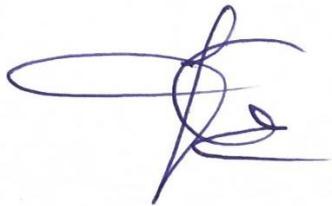
Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa / NRP : David Verrel Juliano / 0211184000012
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing / NIP : Mohammad Khoirul Effendi, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D. /
198204142010121001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Optimasi Gaya Potong dan Kekasaran Permukaan untuk Proses Gerinda Permukaan pada *Superalloy Inconel 718*” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Mengetahui,
Dosen Pembimbing



Mohammad Khoirul Effendi, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.
NIP. 198204142010121001

Surabaya, 25 Juli 2022

Mahasiswa



David Verrel Juliano
NRP. 0211184000012

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : David Verrel Juliano / 0211184000012
Departement : Mechanical Engineering
Advisor / NIP : Mohammad Khoirul Effendi, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D. /
198204142010121001

hereby declare that the Final Project with the title of “Optimization of Cutting Force and Surface Roughness for Surface Grinding Processes on Superalloy Inconel 718” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Acknowledged,
Advisor



Mohammad Khoirul Effendi, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.
NIP. 198204142010121001

Surabaya, July 25th, 2022

Student



David Verrel Juliano
NRP. 0211184000012

OPTIMASI GAYA POTONG DAN KEKASARAN PERMUKAAN UNTUK PROSES GERINDA PERMUKAAN PADA SUPERALLOY INCONEL 718

Nama Mahasiswa / NRP : David Verrel Juliano / 0211184000012
Departemen : Teknik Mesin FTIRS – ITS
Dosen Pembimbing : Mohammad Khoirul Effendi, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.

ABSTRAK

Proses gerinda adalah salah satu proses permesinan yang bertujuan untuk mengikis permukaan benda kerja sesuai bentuk yang diinginkan. Proses gerinda menggunakan bahan abrasif yang diputar oleh motor listrik dan proses pemakanan terjadi ketika benda kerja bersentuhan dengan material abrasif. Jenis *lubricant*, ukuran grit, kecepatan makan, dan kedalaman potong adalah beberapa parameter yang harus diperhatikan dalam proses gerinda karena akan mempengaruhi gaya potong serta hasil kekasaran permukaan benda kerja.

Penelitian ini dilakukan untuk mengoptimasikan proses gerinda permukaan. Optimasi dilakukan untuk mendapatkan gaya potong dan kekerasan permukaan benda kerja yang paling minimum terhadap jenis *lubricant*, ukuran grit, kecepatan makan, dan kedalaman potong dari proses gerinda permukaan. Penelitian ini menggunakan rancangan eksperimen dengan 3 variasi jenis *lubricant*, 3 variasi ukuran grit, 3 variasi kecepatan makan, dan 3 variasi kedalaman potong. Penelitian dilakukan dengan menggunakan metode kecerdasan buatan yaitu *Backpropagation Neural Network* (BPNN) untuk memodelkan hubungan antara respon (gaya potong dan kekerasan permukaan) dengan parameter *input* yakni jenis *lubricant*, ukuran grit, kecepatan makan, dan kedalaman potong. *Network* yang dihasilkan oleh BPNN selanjutnya digunakan oleh metode *Harmony Search* dan *Ant Colony Optimization* untuk mendapatkan respon gaya potong sekecil mungkin dan kekerasan permukaan sehalus mungkin.

Hasil dari penelitian ini, didapatkan jaringan BPNN gaya potong tangensial dengan MSE terkecil 0,0072 dengan menggunakan 3 *hidden layer*, yaitu *neuron* sebanyak 7, 6, dan 8 di masing-masing *hidden layer* dengan fungsi aktivasi yaitu *satlins*, *satlins*, *tansig* untuk masing-masing *hidden layer*. Untuk jaringan BPNN gaya potong normal diperoleh MSE terkecil 0,0016 dengan menggunakan 3 *hidden layer*, dengan *neuron* sebanyak 8, 4, dan 2 di masing-masing *hidden layer* dan fungsi aktivasi yaitu *logsig*, *logsig*, dan *tansig* untuk masing-masing *hidden layer*. Pada jaringan BPNN kekasaran permukaan, didapatkan jaringan dengan MSE terkecil 0,0004 dengan menggunakan 3 *hidden layer*, dengan *neuron* sebanyak 8, 7, dan 3 di masing-masing *hidden layer* dan fungsi aktivasi yaitu *logsig*, *satlins*, dan *tansig* untuk masing-masing *hidden layer*. Hasil dari proses optimasi pada penelitian ini akan dibandingkan dengan proses optimasi yang telah dilakukan oleh Sandeep Huddedar (2012). Pada penelitian ini, diperoleh hasil yang sama untuk metode optimasi *Harmony Search* maupun *Ant Colony Optimization* yaitu dengan parameter *input* menggunakan jenis *lubricant* SAE+Graphite, ukuran grit sebesar 220, kecepatan makan sebesar 11,50 m/min, dan kedalaman potong 0,055 mm, akan menghasilkan gaya potong tangensial sebesar 63,6724 N, gaya potong normal sebesar 112,5939 N, dan kekasaran permukaan sebesar 0,1723 μm .

Kata kunci : *Ant Colony Optimization*, *Backpropagation Neural Network*, *Harmony Search*, Kekasaran Permukaan, Proses Gerinda

OPTIMIZATION OF CUTTING FORCE AND SURFACE ROUGHNESS FOR SURFACE GRINDING PROCESSES ON SUPERALLOY INCONEL 718

Student Name / NRP: David Verrel Juliano / 02111840000012

Department : Mechanical Engineering FTIRS - ITS

Advisor : Mohammad Khoirul Effendi, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D

ABSTRACT

Grinding process is machining processes that aims to erode surface of workpiece according to desired shape. Grinding process use abrasive material that rotated by electric motor and feeding process occurs when the workpiece in contact with abrasive material. Type of lubricant, grit size, feeding speed, and depth of cut are some of parameters that must considered in grinding process because they will affect cutting force and surface roughness of workpiece.

This research was conducted to optimize the surface grinding process. Optimization is carried out to obtain minimum cutting force and workpiece surface hardness with respect to type of lubricant, grit size, feeding speed, and depth of cut from the surface grinding process. This study uses an experimental design with 3 variations of lubricant types, 3 variations in grit size, 3 variations in feeding speed, and 3 variations in depth of cut. The research was conducted using an artificial intelligence method, namely Backpropagation Neural Network (BPNN) to model the relationship between response (cutting force and surface hardness) with input parameters, such as type of lubricant, grit size, feeding speed, and depth of cut. Network generated by BPNN then used by Harmony Search and Ant Colony Optimization methods to obtain the smallest possible cutting force response and the smoothest possible surface hardness.

Results of this study, obtained tangential cutting BPNN network with the smallest MSE of 0.0072 using 3 hidden layers, with 7, 6, and 8 neurons each with activation function satlins, satlins, tansig. For normal cutting force BPNN network, the smallest MSE is 0.0016 using 3 hidden layers, with 8, 4, and 2 neurons each with activation functions are logsig, logsig, and tansig. On surface roughness BPNN network, the smallest MSE of 0.0004 uses 3 hidden layers, with 8, 7, and 3 neurons each with activation functions are logsig, satlins, and tansig. The results of optimization process in this study will be compared with optimization process from Sandeep Huddedar (2012). In this study, same results were obtained for Harmony Search and Ant Colony Optimization methods, with the input parameters using lubricant type SAE+Graphite, grit size of 220, feeding speed of 11.50m/min, and depth of cut of 0.055mm, produces 63.6724 N tangential cutting force, 112.5939 N normal cutting force, and 0.1723 m surface roughness.

Keywords : Ant Colony Optimization, Backpropagation Neural Network, Grinding Process, Harmony Search, Surface Roughness

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis haturkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat-Nya Tugas Akhir dengan judul “Optimasi Gaya Potong dan Kekasaran Permukaan untuk Proses Gerinda Permukaan pada Superalloy Inconel 718” ini dapat dilaksanakan hingga selesai oleh penulis. Tugas Akhir ini disusun sebagai syarat kelulusan S1 Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari betul bahwa keberhasilan dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini tidak terlepas dari dukungan, bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, secara khusus penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis dan seluruh keluarga yang telah memberikan segala bentuk dukungan dan doa sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Mohammad Khoirul Effendi, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang telah memberi bimbingan, arahan, serta pembelajaran hingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Seluruh dosen penguji Tugas Akhir yang telah meluangkan waktu dan memberikan saran untuk Tugas Akhir ini.
4. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen Departemen Teknik Mesin ITS yang telah mendidik dan mengajarkan ilmu Teknik Mesin dan ilmu kehidupan selama masa perkuliahan.
5. Raisa Agil Puspita yang selalu menemani, membantu, memberikan segala dukungan, serta doa sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. Fikri Haykal yang telah menemani dan membantu penulis dalam menyediakan perangkat komputer.
7. Seluruh sahabat penulis di Teknik Mesin ITS terutama Beni, Samuel dan Didin yang telah membantu selama masa perkuliahan baik *online* maupun *offline*.
8. Teman-teman bimbingan Pak Khoirul yang telah berjuang bersama dalam mengerjakan dan menyelesaikan Tugas Akhir.
9. Seluruh civitas akademika ITS yang telah berdinamika selama kehidupan di kampus.
10. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu oleh penulis, yang telah membantu.

Penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penyusunan Tugas Akhir ini, maka penulis mengharapkan saran dan masukan dari berbagai pihak. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	iv
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Tujuan Penelitian.....	2
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. Penelitian Terdahulu.....	4
2.2. Proses Gerinda Permukaan.....	5
2.2.1. Bagian – Bagian Mesin Gerinda Permukaan	6
2.2.2. Elemen Dasar Proses Gerinda Permukaan	7
2.3. <i>Grinding Wheel</i>	10
2.4. <i>Lubricant</i> pada Proses Gerinda Permukaan	11
2.5. Gaya Potong pada Proses Gerinda	11
2.6. Kekasaran Permukaan Benda Kerja	13
2.7. <i>Superalloy Inconel 718</i>	14
2.8. Jaringan Syaraf Tiruan (<i>Artificial Neural Network</i>).....	14
2.8.1. Prinsip Dasar Jaringan Syaraf Tiruan.....	15
2.8.2. Fungsi Aktivasi	16
2.8.3. Metode Proses Pembelajaran (<i>Training</i>).....	19
2.9. <i>Backpropagation Neural Network</i>	19
2.10. <i>Harmony Search</i>	20
2.11. <i>Ant Colony Optimization</i>	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	22
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	22
3.1.1. Studi Literatur	22
3.1.2. Data	23

3.1.3.	Melakukan Permodelan BPNN	25
3.1.4.	Optimasi dengan Metode Algoritma <i>Harmony Search</i> dan <i>Ant Colony Optimization</i>	27
3.1.5.	Komparasi Hasil	29
3.1.6.	Penarikan Kesimpulan dan Pemberian Saran.....	29
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN		30
4.1.	Pengaruh Setiap Parameter Terhadap Fungsi Tujuan	30
4.2.	Permodelan <i>Backpropagation Neural Network</i>	30
4.2.1.	Jaringan BPNN untuk Gaya Potong Tangensial	31
4.2.2.	Jaringan BPNN untuk Gaya Potong Normal.....	33
4.2.3.	Jaringan BPNN untuk Kekasaran Permukaan.....	35
4.3.	Hasil Optimasi dengan Metode <i>Harmony Search</i>	38
4.4.	Hasil Optimasi dengan Metode <i>Ant Colony Optimization</i>	42
4.5.	Penentuan Parameter <i>Input Real</i>	45
4.6.	Perbandingan Hasil Optimasi dengan Metode <i>Harmony Search</i> dan <i>Ant Colony Optimization</i>	46
4.7.	Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu	47
4.7.1.	Metode <i>Harmony Search</i>	47
4.7.2.	Metode <i>Ant Colony Optimization</i>	48
4.7.3.	Perbandingan <i>Harmony Search</i> , <i>Ant Colony Optimization</i> , dan <i>Taguchi</i>	50
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		51
5.1.	Kesimpulan.....	51
5.2.	Saran	52
DAFTAR PUSTAKA		53
LAMPIRAN		55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Mesin Gerinda Permukaan [11]	6
Gambar 2. 2 Variabel Proses Gerinda[10]	7
Gambar 2. 3 Lingkaran Gaya Pemotongan[10]	12
Gambar 2. 4 Parameter Profil Kekasaran Permukaan [16].....	13
Gambar 2. 5 Jaringan Syaraf Tiruan [21]	15
Gambar 2. 6 Fungsi <i>Linear</i> [21]	16
Gambar 2. 7 Fungsi <i>Threshold</i> atau <i>Limit</i> [21].....	17
Gambar 2. 8 Fungsi <i>Sigmoid</i> [21]	17
Gambar 2. 9 Fungsi <i>Tangent Sigmoid</i> [21].....	18
Gambar 2. 10 <i>Double Bridge Experiment</i> [6].....	20
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	22
Gambar 3. 2 Diagram Alir Permodelan BPNN.....	25
Gambar 3. 3 Diagram Alir Algoritma <i>Harmony Search</i>	27
Gambar 3. 4 Diagram Alir Algoritma <i>Ant Colony Optimization</i>	28
Gambar 4. 1 Grafik Perbandingan Data Target dan Prediksi Gaya Tangensial	33
Gambar 4. 2 Grafik <i>Correlation Coefficient</i> untuk Prediksi BPNN Gaya Tangensial	33
Gambar 4. 3 Grafik Perbandingan Data Target dan Prediksi Gaya Normal.....	35
Gambar 4. 4 Grafik <i>Correlation Coefficient</i> untuk Prediksi BPNN Gaya Normal	35
Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan Data Target dan Prediksi Kekasaran Permukaan.....	37
Gambar 4. 6 Grafik <i>Correlation Coefficient</i> untuk Prediksi BPNN Kekasaran Permukaan ..	37
Gambar 4. 7 Grafik <i>Best Cost</i> setiap Iterasi pada Algoritma <i>Harmony Search</i>	39
Gambar 4. 8 Grafik <i>Best Cost</i> setiap Iterasi pada Algoritma <i>Ant Colony Optimization</i>	42

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Hasil Penelitian Optimasi Proses Gerinda Permukaan dengan <i>Taguchi</i> [7].....	4
Tabel 2. 2 Ukuran Grit <i>Grinding Wheel</i> Berdasarkan ISO 525-1999[14]	11
Tabel 2. 3 Nilai Kekasaran Berdasarkan Standar ISO[16]	13
Tabel 2. 4 Komposisi <i>Superalloy Inconel 718</i> [7]	14
Tabel 2. 5 Fungsi Aktivasi di MATLAB	18
Tabel 3. 1 <i>Design of Experiment</i> Penelitian.....	23
Tabel 3. 2 Data Hasil Eksperimen Proses Gerinda Permukaan pada <i>Superalloy Inconel 718</i>	24
Tabel 4. 1 Perbandingan Hasil Target dengan Prediksi Gaya Tangensial	32
Tabel 4. 2 Perbandingan Hasil Target dengan Prediksi Gaya Normal	34
Tabel 4. 3 Perbandingan Hasil Target dengan Prediksi Kekasaran Permukaan	36
Tabel 4. 4 Hasil Optimasi dengan Metode <i>Harmony Search</i> dan <i>Ant Colony Optimization</i> ..	46
Tabel 4. 5 Perbedaan Performa Metode <i>Harmony Search</i> dan <i>Ant Colony Optimization</i>	47
Tabel 4. 6 Perbandingan Hasil Optimasi Algoritma <i>Harmony Search</i> , <i>Ant Colony Optimization</i> , dan <i>Taguchi</i>	50

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Industri di sektor manufaktur memiliki peran yang sangat penting pada era saat ini. Sektor ini memiliki kendali dalam pengembangan industri di sektor lainnya. Selain itu, apabila industri sektor manufaktur di suatu negara dapat berkembang dengan pesat, maka berkontribusi pada pertumbuhan ekonomi yang pesat pula. Bahkan di era revolusi industri 4.0 saat ini, industri di sektor manufaktur akan terus dikembangkan, supaya dapat bertransformasi dari suatu industri yang konvensional menjadi suatu industri yang seluruh prosesnya dapat terdigitalisasi dan mampu berjalan secara otomatis [1]. Secara umum, industri di sektor manufaktur akan mengolah bahan mentah menjadi bahan jadi atau setengah jadi melalui suatu proses yang disebut proses permesinan. Proses permesinan pada industri di sektor manufaktur memiliki banyak ragamnya, yang akan disesuaikan dengan kebutuhan dari suatu proses. Salah satu contoh proses permesinan yang cukup banyak digunakan adalah proses gerinda permukaan.

Proses gerinda merupakan proses permesinan yang bertujuan untuk menghilangkan beberapa bagian dari benda kerja supaya memiliki bentuk yang diinginkan [2]. Sedangkan proses gerinda permukaan, memiliki tujuan untuk menghilangkan beberapa bagian dari permukaan benda kerja sehingga menghasilkan permukaan yang datar dan halus sesuai dengan kekasaran yang diinginkan [3]. Dalam suatu proses gerinda permukaan, terdapat beberapa variabel yang akan mempengaruhi hasil dari proses tersebut, seperti jenis *lubricant*, ukuran grit, kecepatan potong, dan kedalaman makan dari *grinding wheel*. Variabel-variabel tersebut tentunya akan berbeda-beda sesuai dengan material benda kerja. Kekasaran permukaan dan gaya potong yang dihasilkan dari proses gerinda permukaan akan diidentifikasi sebagai kualitas benda kerja, produktivitas, dan biaya produksi [3]. Semakin kecil gaya potong maka akan dibutuhkan daya yang lebih kecil pula untuk mengoperasikan mesin gerinda permukaan, sehingga akan biaya produksi menjadi lebih sedikit atau efisien. Sedangkan, kekasaran permukaan menjadi tujuan utama dari proses gerinda permukaan untuk menghasilkan permukaan benda kerja dengan permukaan yang sehalus mungkin [4].

Pengoptimalan proses gerinda permukaan dapat dilakukan untuk mendapatkan variabel proses yang memiliki kekasaran permukaan yang sehalus mungkin dan gaya potong yang sekecil mungkin. Penelitian ini mengacu kepada data pengujian yang telah dilakukan oleh Sandeep Huddedar, Pankaj Chitalkar, Arvind Chavan dan Raju S. Pawede (2012) dengan judul “*Effect of Cooling Environment on Grinding Performance of Nickel Based Superalloy Inconel 718*”. Pada penelitian tersebut, dilakukan pengujian eksperimental dari proses gerinda permukaan terhadap *superalloy Inconel 718*. Parameter performa proses gerinda permukaan seperti gaya potong, kekasaran permukaan, dan topografi permukaan diuji dengan menggunakan desain Taguchi. Parameter yang dipilih yang mempengaruhi proses gerinda permukaan yaitu jenis *lubricant*, ukuran grit (*grit size*), kecepatan makan, dan kedalaman potong. Uji eksperimen memiliki kekurangan yaitu biaya yang diperlukan lebih besar dan waktu yang diperlukan lebih lama. Selain itu, pengujian dengan menggunakan desain Taguchi juga memiliki kekurangan dimana tidak dapat mencari solusi diluar dari nilai yang telah ada sebelumnya. Oleh karena itu dilakukan proses optimasi dengan uji simulasi dengan menggunakan *Artificial Neural Network*. Proses optimasi dengan *Artificial Neural Network* dapat dilakukan untuk mencari hasil yang paling optimal pada seluruh *range* nilai yang diberikan. Uji simulasi dengan *Artificial Neural Network* dilakukan dengan menggunakan metode *Back Propagation Neural Network* untuk mendapatkan prediksi respon yang baik dengan menggunakan fungsi polinomial orde tinggi yang dapat diatur dari parameter seperti

jumlah *hidden layer*, jumlah *neuron*, dan fungsi aktivasi. Kemudian, nilai optimal diperoleh melalui metode *Harmony Search* dan *Ant Colony Optimization* untuk mendapatkan nilai yang paling baik. *Harmony Search* menggunakan prinsip improvisasi pada harmoni suatu nada yang dimainkan oleh pemain musik dan memiliki algoritma yang sederhana dan efisien dalam melakukan optimasi [5]. Sedangkan, algoritma *Ant Colony Optimization* merupakan algoritma proses optimasi yang meniru perilaku kawanan semut dalam mencari makan, dimana semut akan meninggalkan jejak berupa feromon untuk memberikan petunjuk kepada kawanan lainnya. Kemudian jalur terpendek yang ditempuh oleh semut akan memiliki akumulasi feromon yang lebih banyak, sehingga akan memperbesar probabilitas semut lain untuk menempuh jalur tersebut [6].

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka diperoleh rumusan masalah untuk tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana memilih parameter-parameter dari *Back Propagation Neural Network* (BPNN) yang paling baik, sehingga menghasilkan respon prediksi dengan kesalahan yang sekecil mungkin?
2. Bagaimana menentukan variabel jenis *lubricant*, ukuran grit (*grit size*), kecepatan makan, dan kedalaman potong yang tepat untuk mendapatkan respon gaya potong tangensial dan gaya normal yang sekecil mungkin serta kekasaran permukaan sehalus mungkin dengan menggunakan metode BPNN-*Harmony Search* dan BPNN-*Ant Colony Optimization*?

1.3. Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, supaya penelitian dapat berjalan secara fokus dan terarah, sehingga diperoleh tujuan yang diinginkan, maka diperlukan batasan pada masalah sebagai berikut:

1. Data yang digunakan diambil dari jurnal dengan judul "*Effect of Cooling Environment on Grinding Performance of Nickel Based Superalloy Inconel 718*" oleh Sandeep Huddedar, Pankaj Chitalkar, Arvind Chavan dan Raju S. Pawede [7].
2. Tidak membahas variabel biaya pada proses permesinan.
3. Tidak membahas faktor getaran pada mesin gerinda.
4. Pada permodelan BPNN, jumlah *hidden layer* adalah 1 hingga 3 *layer*, jumlah *neuron* tiap *layer* adalah 2 hingga 8 *neuron*, menggunakan fungsi aktivasi yaitu *logsig*, *tansig*, *purelin*, *satlin*, dan *satlins*.
5. Pada permodelan BPNN, pembagian data yang digunakan sebagai training adalah 70%, data yang digunakan sebagai *validation* adalah 15%, dan data yang digunakan sebagai *testing* adalah 15%.

1.4. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan parameter dari *Back Propagation Neural Network* (BPNN) yang menghasilkan respon prediksi dengan tingkat kesalahan yang sekecil mungkin.
2. Menentukan variabel jenis *lubricant*, ukuran grit (*grit size*), kecepatan makan, dan kedalaman potong yang tepat untuk mendapatkan respon gaya potong yang sekecil mungkin dan kekasaran permukaan sehalus mungkin dengan menggunakan metode BPNN-*Harmony Search* dan BPNN-*Ant Colony Optimization*

1.5. Manfaat Penelitian

Dari tugas akhir ini, maka diperoleh manfaat adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan variabel jenis *lubricant*, ukuran grit (*grit size*), kecepatan makan, dan kedalaman potong dari proses grinding yang paling optimal.
2. Sebagai referensi untuk penelitian atau pengembangan ilmu di bidang optimasi proses gerinda.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Pada penelitian sebelumnya, telah dilakukan pengujian pada jurnal yang berjudul “*Effect of Cooling Environment on Grinding Performance of Nickel Based Superalloy Inconel 718*” oleh Sandeep Huddedar, Pankaj Chitalkar, Arvind Chavan dan Raju S. Pawede pada tahun 2012. Penelitian tersebut menggunakan beberapa variabel proses gerinda permukaan yaitu jenis *lubricant*, ukuran grit (*grit size*), kecepatan makan, dan kedalaman potong. Jenis *lubricant* yang digunakan yaitu *coconut oil*, *SAE+graphite*, dan *liquid nitrogen*, sedangkan ukuran grit yang digunakan yaitu 60, 120, dan 220. Untuk kecepatan makan dipilih yaitu 8 m/min, 10 m/min, dan 12 m/min, serta kedalaman potong sebesar 0,05 mm, 0,10 mm, dan 0,15 mm. Untuk mendapatkan nilai optimum dari gaya potong tangensial, gaya potong normal, dan kekasaran permukaan, digunakan metode desain *Taguchi* pada penelitian tersebut [7].

Dari hasil penelitian didapatkan bahwa ukuran grit memiliki dampak yang paling besar terhadap kekasaran permukaan dibandingkan parameter lainnya. Semakin besar ukuran grit maka permukaan akan semakin halus atau nilai kekasaran permukaan semakin rendah. Selain itu, penggunaan *coconut oil* juga memiliki dampak yang paling efisien untuk menurunkan temperatur benda kerja selama proses gerinda. Hal ini dapat dilihat dari kekasaran permukaan terkecil dihasilkan ketika menggunakan *coconut oil*, sedangkan kekasaran permukaan terbesar dihasilkan ketika menggunakan *liquid nitrogen* sebagai *lubricant* [7].

Untuk gaya potong tangensial, didapatkan bahwa penggunaan *coconut oil* memberikan dampak pendinginan yang paling efisien karena memiliki kapasitas pelepasan panas yang lebih besar sehingga temperatur benda kerja akan lebih cepat turun dan besar gaya untuk memotong material benda kerja akan semakin kecil. Gaya potong terbesar terjadi ketika menggunakan *SAE+graphite* sebagai *lubricant*. Sedangkan untuk ukuran grit, semakin kecil ukuran grit maka akan semakin besar gaya yang dibutuhkan untuk memotong material pada proses gerinda. Hal ini disebabkan karena luas material benda kerja yang akan dipotong per butir abrasif akan semakin besar. Selanjutnya, kecepatan makan yang menghasilkan gaya terkecil adalah kecepatan makan pada level tertinggi. Sedangkan kedalaman potong terkecil didapatkan ketika kedalaman makan 0.10 mm [7].

Dari gambar 2.7 didapatkan hasil bahwa untuk gaya potong normal, penggunaan *coconut oil* akan memberikan dampak pendinginan terbesar sehingga gaya potong normal yang terjadi menjadi rendah, sedangkan gaya potong normal terbesar terjadi ketika menggunakan *liquid nitrogen* sebagai *lubricant*. Selanjutnya, gaya potong normal terkecil terjadi ketika menggunakan ukuran grit yang paling kecil. Hal ini disebabkan karena luas material benda kerja yang akan dipotong per butir abrasif akan semakin kecil. Kecepatan makan terbesar menghasilkan gaya potong normal terkecil, sedangkan kecepatan makan terkecil menghasilkan gaya potong terbesar [7].

Berdasarkan penelitian tersebut, didapatkan parameter proses gerinda permukaan untuk *Superalloy Inconel 718* yang optimal adalah seperti pada tabel berikut:

Tabel 2.1 Hasil Penelitian Optimasi Proses Gerinda Permukaan dengan *Taguchi* [7]

Parameter Output	Jenis Lubricant	Ukuran Grit	Kecepatan Makan (m/min)	Kedalaman Potong (mm)
Kekasaran Permukaan	<i>Coconut Oil</i>	220	10	0,10
Gaya Tangensial	<i>Coconut Oil</i>	220	12	0,10
Gaya Normal	<i>Coconut Oil</i>	60	12	0,15

Berdasarkan tabel 2.1 diatas dapat dilihat bahwa parameter proses gerinda yang optimal untuk mendapatkan kekasaran permukaan terkecil dan gaya tangensial terkecil memiliki kesamaan kecuali kecepatan makan. Besar ukuran grit memiliki pengaruh yang sama untuk mendapatkan kekasaran permukaan yang halus dan gaya potong tangensial terkecil, namun kecepatan makan terbesar hanya baik digunakan untuk mendapatkan gaya potong terkecil. Selanjutnya, parameter proses gerinda untuk mendapatkan gaya potong normal terkecil memiliki beberapa perbedaan dengan parameter untuk mendapatkan kekasaran permukaan terkecil. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa untuk mendapatkan kekasaran permukaan yang halus dan gaya potong terkecil, pemilihan *lubricant* yang terbaik yaitu dengan menggunakan *coconut oil* [7].

Pada penelitian yang berjudul “*Optimum Surface Roughness Prediction in Face Milling by Using Neural Network and Harmony Search Algorithm*” yang telah dilakukan oleh Mohammad Reza Razfar pada tahun 2011, dilakukan optimasi pada parameter proses *face milling* untuk mendapatkan kekasaran permukaan yang minimum pada X20Cr13 *stainless steel*. Untuk mendapatkan prediksi model pada kekasaran permukaan digunakan *feed forward neural network* dan untuk proses optimasi diselesaikan oleh algoritma *Harmony Search*. Hasil dari penelitian tersebut didapatkan bahwa algoritma *Harmony Search* yang dipadukan dengan *feed forward neural network* memiliki hasil yang paling efisien dan akurat dalam memperoleh kekasaran permukaan yang paling kecil [8]. Hal ini juga diperkuat oleh penelitian yang berjudul “*Optimization of Multi-Pass Face-Milling via Harmony Search Algorithm*” yang dilakukan oleh Zarei pada tahun 2009 dimana menggunakan algoritma *Harmony Search* dan algoritma *Genetic Algorithm* sebagai validasi untuk mengoptimasikan parameter proses *multi-pass face-milling*. Dari penelitian tersebut, didapatkan hasil bahwa algoritma *Harmony Search* memiliki hasil yang lebih konvergen untuk mendapatkan hasil yang optimal dengan akurasi yang tinggi dibandingkan *Genetic Algorithm* [9].

2.2. Proses Gerinda Permukaan

Untuk menghasilkan spesifikasi benda kerja yang diinginkan dari proses manufaktur, terkadang dibutuhkan beberapa proses permesinan dengan peralatan yang berbeda-beda sesuai dengan kebutuhannya. Terdapat banyak jenis proses permesinan dimana memiliki fungsi yang berbeda-beda. Salah satu proses permesinan yang sering digunakan adalah proses gerinda. Proses gerinda adalah suatu proses permesinan yang biasanya digunakan sebagai proses akhir untuk menghaluskan permukaan benda kerja, mengikis material benda kerja yang keras, dan mendapatkan toleransi yang diinginkan pada permukaan benda kerja. Terdapat dua jenis proses gerinda yaitu proses gerinda permukaan yang menghasilkan permukaan datar dan proses gerinda silindris yang menghasilkan permukaan silindris [3].

Prinsip dasar proses gerinda adalah dengan cara mengikis material di permukaan benda kerja menjadi bagian-bagian yang sangat kecil. Dalam proses gerinda, terdapat material abrasif yang berperan untuk mengikis benda kerja, yang umumnya berbentuk kepingan lingkaran menyerupai *disk*. Material abrasif ini sering disebut dengan *grinding wheel*. *Grinding wheel* memiliki peran layaknya sebuah pahat pada proses gudi maupun proses *milling*. Pengikisan pada benda kerja terjadi ketika *grinding wheel* diputar dengan kecepatan yang sangat tinggi dan bergesekan dengan benda kerja, sehingga partikel-partikel abrasif pada *grinding wheel* akan mengikis material benda kerja sedikit demi sedikit.

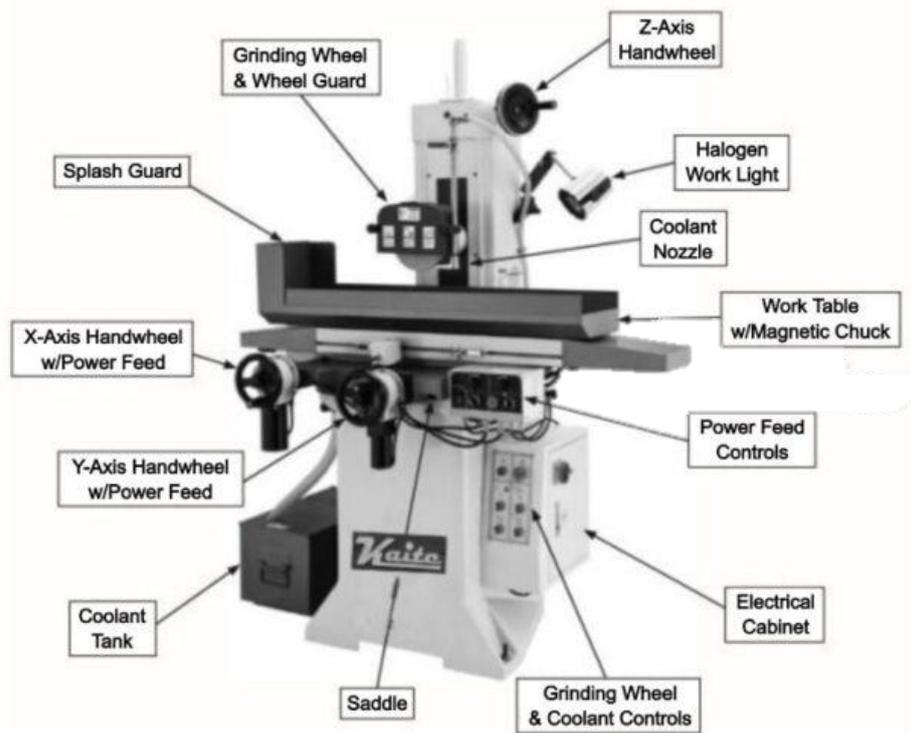
Proses gerinda memiliki ciri khusus yang membedakan dengan proses pemesinan lainnya. Beberapa ciri proses gerinda antara lain: [10]

- Kehalusan permukaan benda kerja yang tinggi dapat dicapai dengan mudah.
- Toleransi geometrik yang sempit dapat dicapai dengan mudah.

- Kecepatan penghasilan geram yang rendah, karena hanya mungkin dilakukan proses gerinda untuk lapisan tipis permukaan benda kerja.
- Dapat digunakan untuk menghaluskan benda kerja yang telah dikeraskan (*heat-treated*).

2.2.1. Bagian – Bagian Mesin Gerinda Permukaan

Pada mesin gerinda permukaan, terdapat berbagai bagian yang memiliki fungsinya masing-masing. Bagian-bagian mesin gerinda permukaan dapat dilihat pada gambar 2.1 dibawah ini:



Gambar 2. 1 Mesin Gerinda Permukaan [11]

Keterangan:

1. *Worktable*
Worktable merupakan bagian untuk meletakkan benda kerja, supaya benda kerja tidak bergerak saat proses gerinda berlangsung.
2. *Power Feed Controls*
Power Feed Controls merupakan bagian untuk mengatur gerakan meja kerja secara elektrik pada sumbu x, y, maupun z.
3. *Electrical Cabinet*
Electrical Cabinet merupakan tempat untuk meletakkan seluruh komponen elektrik seperti kabel supaya tidak berantakan.
4. *Grinding Wheel and Wheel Guard*
Grinding Wheel merupakan material abrasif yang digunakan untuk mengikis benda kerja yang sering disebut dengan batu gerinda. Sedangkan *wheel guard* merupakan pelindung yang diletakkan diluar batu gerinda untuk melindungi daerah sekitarnya ketika batu gerinda berputar sehingga mengurangi resiko kecelakaan kerja.
5. *Splash Guard*
Splash Guard merupakan bagian untuk melindungi dari percikan api selama proses gerinda berlangsung.

dimana:

- l_t : jarak gerak melintang (mm)
- l_w : panjang proses gerinda benda kerja (mm)
- l_n : panjang langkah pengakhiran (mm)
- l_v : panjang langkah pengawalan (mm)
- v : kecepatan makan tangensial (mm/s)
- f_a : gerak makan aksial (mm/langkah)
- f_r : gerak makan radial (mm/langkah)
- D : diameter roda gerinda (mm)
- b_s : lebar roda gerinda (mm)
- n_s : putaran roda gerinda (r/min)
- V : kecepatan periferal roda gerinda (m/s)
- d : kedalaman potong (mm)
- w : lebar benda kerja (mm)

Proses gerinda pada prinsipnya akan memutar batu gerinda atau *grinding wheel* yang telah terpasang pada *spindle* atau poros mesin gerinda dengan kecepatan tertentu. Kecepatan periferal pada tepi luar *grinding wheel* tergantung pada diameter batu gerinda dan putarannya, yaitu seperti pada persamaan berikut: [10]

$$v_s = \frac{\pi d_s n_s}{1000} \text{ m/min} \quad (2.1)$$

atau

$$v_s = \frac{\pi d_s n_s}{60000} \text{ m/s} \quad (2.2)$$

dimana:

- v_s : kecepatan periferal batu gerinda (m/min atau m/s)
- d_s : diameter batu gerinda (mm)
- n_s : putaran batu gerinda (r/min)

Kecepatan makan pada proses gerinda permukaan didefinisikan sebagai kecepatan makan tangensial (v_{ft}) dalam satuan mm/s. Kecepatan makan tangensial merupakan gerakan osilasi dari meja mesin gerinda dan dianggap sebagai kecepatan benda kerja (v_w). Pada umumnya, kecepatan makan tangensial pada proses gerinda berkisar antara 200 hingga 500 mm/s. Jika suatu mesin gerinda permukaan dilengkapi dengan gerakan translasi untuk meja yang lambat (antara 0,15 hingga 0,35 mm/s), maka dapat dilakukan proses *creep grinding* (serupa dengan *slab milling*). *Creep grinding* merupakan proses gerinda yang umumnya digunakan untuk melakukan proses gerinda profil dengan pemakanan sekaligus dan produktivitas tinggi, namun memerlukan batu gerinda yang berporositas besar sehingga aliran geram lebih besar dan cairan pendingin lebih banyak [10].

Proses pemakanan pada proses gerinda permukaan dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu pemakanan melintang atau *traverse grinding* dan pemakanan radial atau *plunge grinding*. Gerak makan radial (f_r) pada umumnya diatur pada nilai sekitar 0,001 hingga 0,025 mm/langkah, sedangkan gerak makan aksial (f_a) diatur sesuai dengan lebar batu gerinda (b_s) dan derajat overlap (U) dengan rumus sebagai berikut: [10]

$$U = \frac{b_s}{f_a} \quad (2.3)$$

maka,

$$f_a = \frac{b_s}{U} \quad (2.4)$$

dimana nilai U berkisar antara 2 hingga 12.

Sedangkan untuk menghitung kecepatan penghasiian geram (*rate of metal removal*) dari proses gerinda permukaan dibagi menjadi dua rumus berdasarkan cara pemakanannya. Untuk pemakanan melintang atau *traverse grinding*, besar kecepatan penghasiian geram didapatkan melalui persamaan dibawah ini: [10]

$$Z = a f_a U v_{ft} \quad (2.5)$$

Sedangkan untuk pemakanan radial atau *plunge grinding*, kecepatan penghasiian geram didapatkan melalui persamaan dibawah ini: [10]

$$Z = a b_s v_{ft} = f_r b_s v_{ft} \quad (2.6)$$

dimana:

- Z : kecepatan penghasiian geram (mm³/s)
- a : kedalaman penggerindaan (mm)
- f_a : gerak makan aksial (mm/langkah)
- f_r : gerak makan radial (mm/langkah)
- b_s : lebar batu gerinda (mm)
- U : derajat overlap
- v_{ft} : kecepatan makan tangensial (mm/s)

Waktu pemotongan pada proses gerinda permukaan juga dibedakan menjadi dua berdasarkan cara pemakanannya. Waktu pemotongan dapat dihitung berdasarkan panjang benda kerja maupun kedalaman penggerindaan. Untuk pemakanan melintang atau *traverse grinding*, waktu pemotongan didapatkan melalui persamaan dibawah ini: [10]

$$t_c = \frac{l_t}{v_{ft}} \frac{w}{f_a} + (t_{dw} + t_{sp}) \quad (2.7)$$

Sedangkan, untuk pemakanan radial atau *plunge grinding*, waktu pemotongan didapatkan melalui persamaan dibawah ini: [10]

$$t_c = \frac{l_t}{v_{ft}} \frac{h}{f_r} + (t_{dw} + t_{sp}) \quad (2.8)$$

dimana:

- t_c : waktu penggerindaan (s)
- l_t : jarak gerak melintang (mm)
- v_{ft} : kecepatan makan tangensial (mm/s)

w	: lebar material yang akan digerinda (mm)
h	: tebal geram (mm)
f _a	: gerak makan aksial (mm/langkah)
f _r	: gerak makan radial (mm/langkah)
t _{dw}	: waktu <i>dwell</i> (s); sekitar 2 sampai 6 detik
t _{sp}	: waktu <i>sparking out</i> (s); sekitar 2 sampai 6 detik

Untuk mendapatkan daya yang dibutuhkan untuk melakukan suatu proses gerinda permukaan maka dibutuhkan gaya potong tangensial (F_t) dan kecepatan perifer batu gerinda seperti pada persamaan dibawah ini: [12]

$$P = F_t \times v_s \quad (2.9)$$

dimana:

P	: daya penggerindaan (W)
F _t	: gaya potong tangensial (N)
v _s	: kecepatan perifer batu gerinda (m/s)

2.3. *Grinding Wheel*

Grinding wheel atau yang sering disebut sebagai batu gerinda merupakan material yang berfungsi sebagai pengikis benda kerja pada proses gerinda. *Grinding wheel* tersusun dari partikel-partikel abrasif dengan bahan pengikat sehingga memiliki bentuk tertentu sesuai dengan fungsinya. Bahan partikel-partikel abrasif sangat menentukan karakteristik dari *grinding wheel* tersebut, yang akan berpengaruh terhadap variabel-variabel pada proses gerinda seperti kecepatan makan dan kedalaman potong. Ada beberapa parameter yang mempengaruhi karakteristik dari *grinding wheel*, yaitu: [13]

- Jenis material abrasif
- Ukuran partikel abrasif
- Material pengikat
- Kualitas material
- Struktur batu gerinda

Namun, ada beberapa karakteristik dasar yang harus dimiliki dari *grinding wheel*, yaitu: [13]

- Memiliki kekerasan yang tinggi
- Memiliki ketahanan terhadap aus yang baik
- Memiliki ketangguhan yang tinggi
- Memiliki friabilitas yang baik

Kekerasan, ketahanan terhadap aus, dan ketangguhan merupakan karakteristik dasar dari semua material pahat. Sedangkan friabilitas merupakan karakteristik khusus yang harus dimiliki *grinding wheel*. Friabilitas adalah kemampuan partikel-partikel abrasif untuk patah ketika partikel-partikel abrasif sudah menjadi tumpul, sehingga akan membentuk sisi tajam yang baru. Beberapa jenis material abrasif yang digunakan sebagai *grinding wheel* antara lain *aluminum oxide*, *silicon carbide*, *cubic boron nitride*, dan *diamond* [13].

Berdasarkan standar ISO 525-1999, grit batu gerinda memiliki beberapa ukuran yang diklasifikasikan menjadi *macrogrits* dan *microgrits*. Ukuran grit dalam kategori *macrogrits* dibagi menjadi 3 jenis yaitu *coarse* (kasar), *medium*, *fine* (halus), sedangkan ukuran grit dalam kategori *microgrits* hanya memiliki satu kategori yaitu *very fine* (sangat halus). Rentang ukuran grit berdasarkan ISO 525-1999 mulai dari 4 hingga 1200, seperti pada tabel 2.2 dibawah ini: [14]

Tabel 2. 2 Ukuran Grit *Grinding Wheel* Berdasarkan ISO 525-1999[14]

<i>Macrogrits</i>			<i>Microgrits</i>
Coarse	Medium	Fine	Very Fine
4	30	70	230
5	36	80	240
6	40	90	280
7	46	100	320
8	54	120	360
10	60	150	400
12	-	180	500
14		220	600
16		-	800
20			1000
22			1200
24			-

2.4. *Lubricant* pada Proses Gerinda Permukaan

Pada proses gerinda permukaan, pasti terjadi gesekan yang akan menimbulkan panas dan keausan, sehingga proses pendinginan dan pelumasan memiliki peran yang sangat penting dalam proses gerinda permukaan. Dengan penggunaan *lubricant* selama proses gerinda permukaan, maka dapat melindungi dan mencegah terjadinya kerusakan pada benda kerja maupun *grinding wheel* seperti *microcracks*, *thermal burn*, perubahan fasa, maupun tegangan residual. Terdapat beberapa sistem pelumasan yang digunakan dalam proses gerinda permukaan, yaitu pelumasan yang merendam benda kerja dan pelumasan dengan metode MQL atau *minimum quantity lubrication*. Sistem pelumasan dengan merendam benda kerja dianggap kurang efektif karena penggunaan *lubricant* yang berlebihan dapat memberikan dampak buruk terhadap kesehatan lingkungan. Selain itu, dengan menggunakan pelumas dengan jumlah yang lebih banyak akan memberikan beban dan biaya berlebih bagi perusahaan untuk memikirkan cara mengolah limbah *lubricant* tersebut. Sedangkan, dengan menggunakan sistem *minimum quantity lubrication* akan lebih efektif karena penggunaan *lubricant* yang lebih sedikit namun dengan hasil seperti sistem pelumasan yang direndam. Namun, yang perlu diperhatikan adalah jenis *lubricant* tersebut tidak mudah menguap sebelum mengenai benda kerja atau *grinding wheel* [15].

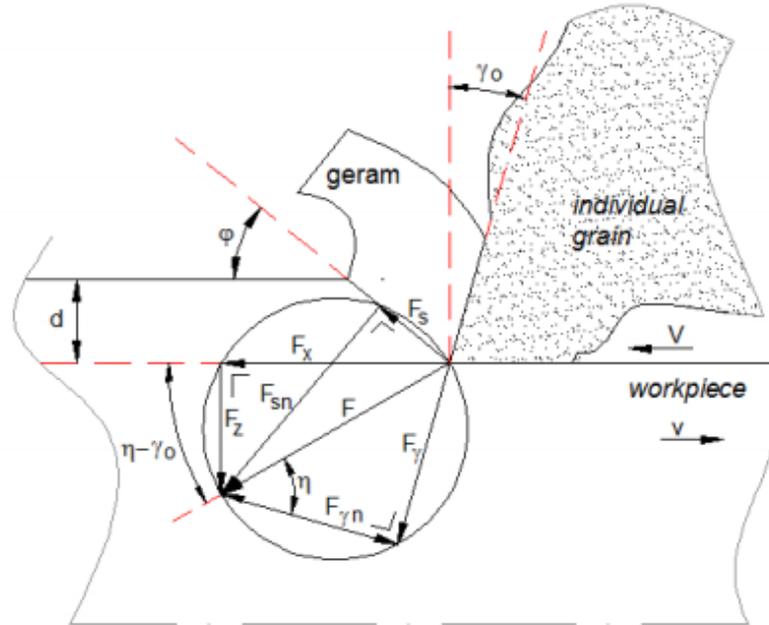
2.5. Gaya Potong pada Proses Gerinda

Dalam proses gerinda, ada gaya yang diperlukan untuk memotong material benda kerja. Dalam perhitungan gaya potong, sebenarnya memiliki kesamaan dengan proses permesinan lainnya. Berdasarkan teori Merchant, gaya pada proses gerinda hanya dilihat pada satu bidang saja. Oleh karena itu, gaya potong total akan didapatkan dari dua komponen gaya yang saling bekerja tegak lurus. Gaya potong diuraikan dalam tiga cara yaitu: [10]

1. Gaya potong total yang ditinjau dari proses deformasi material, diuraikan menjadi dua komponen gaya, yaitu:
 - F_s : yaitu gaya geser yang mendeformasikan material benda kerja pada suatu bidang geser sehingga melewati batas elastis.
 - F_{sn} : yaitu gaya normal pada bidang geser yang menyebabkan pahat tetap menempel pada benda kerja.

2. Gaya potong total yang didapatkan dari dinamometer sehingga diketahui besar dan arah gayanya. Komponen gaya yang diukur yaitu:
 - F_x : yaitu gaya tangensial yang searah sumbu x
 - F_z : yaitu gaya normal yang searah sumbu z
3. Gaya potong total yang ditinjau dari bidang geram, diuraikan menjadi dua komponen, yaitu:
 - F_γ : yaitu gaya gesek pada bidang geram
 - $F_{\gamma n}$: yaitu gaya normal pada bidang geram

Berikut ini adalah skema lingkaran gaya pemotongan pada proses gerinda pada gambar 2.3 dibawah ini:



Gambar 2. 3 Lingkaran Gaya Pemotongan[10]

Berdasarkan gambar 2.3 skema lingkaran gaya pemotongan, maka rumus untuk mendapatkan resultan gaya pemotongan adalah seperti berikut ini:

1. Resultan gaya potong total yang ditinjau dari proses deformasi material, yaitu: [10]

$$F = \sqrt{F_s^2 + F_{sn}^2} \quad (2.10)$$

2. Resultan gaya potong total yang didapatkan dari dinamometer, yaitu: [10]

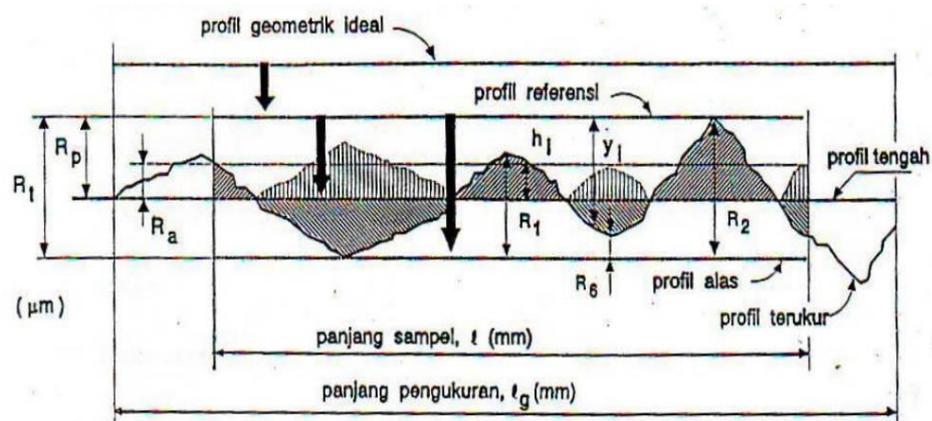
$$F = \sqrt{F_x^2 + F_z^2} \quad (2.11)$$

3. Gaya potong total yang ditinjau dari bidang geram, diuraikan menjadi dua komponen, yaitu: [10]

$$F = \sqrt{F_\gamma^2 + F_{\gamma n}^2} \quad (2.12)$$

2.6. Kekasaran Permukaan Benda Kerja

Benda kerja yang mengalami proses pemesinan, akan mengalami perubahan kekasaran permukaan bergantung dari proses yang telah dilakukan dan kebutuhan kekasaran permukaan yang diinginkan. Hal ini dapat terjadi karena terdapat berbagai penyimpangan ketika melakukan suatu proses pemesinan, sehingga permukaan yang sempurna tidak bisa didapat. Kekasaran permukaan didefinisikan sebagai penyimpangan rata-rata garis aritmetik dari garis rata-rata permukaan benda kerja. Sedangkan kekasaran rata-rata aritmetik (R_a) merupakan harga rata-rata jarak antara profil terukur dengan profil tengah. Dalam mengukur kekasaran permukaan, akan didapatkan nilai R_a , bentuk profil, panjang sampel, dan panjang pengukuran seperti pada gambar 2.4 dibawah ini.



Gambar 2. 4 Parameter Profil Kekasaran Permukaan [16]

Untuk dapat melakukan pengujian kekasaran permukaan benda kerja, maka digunakan *surface roughness tester* yang sesuai dengan standar ISO. Nilai kekasaran rata-rata aritmetik (R_a) yang telah diklasifikasikan oleh ISO dibagi menjadi 12 kelas. Nilai kualitas kekasaran permukaan yang paling kecil hingga paling besar adalah sebesar N_1 yaitu $0,025 \mu\text{m}$ hingga N_{12} yaitu $50 \mu\text{m}$ seperti pada tabel 2.3 berikut: [17]

Tabel 2. 3 Nilai Kekasaran Berdasarkan Standar ISO[16]

R_a (μm)	Angka Kelas Kekasaran	Panjang Sampel (mm)	Keterangan
50	N12	8	Sangat Kasar
25	N11		
12,5	N10	2,5	Kasar
6,3	N9		
3,2	N8	0,8	Normal
1,6	N7		
0,8	N6		
0,4	N5		
0,2	N4	0,25	Halus
0,1	N3		
0,05	N2		
0,025	N1	0,08	Sangat Halus

2.7. Superalloy Inconel 718

Superalloy atau yang sering disebut dengan paduan super merupakan paduan dari nikel (Ni), besi (Fe), kobalt (Co), kromium (Cr), dan sejumlah wolfram (W), molibdenum (Mo), tantalum (Ta), niobium (Nb), titanium (Ti), serta aluminium (Al) yang dikembangkan untuk penggunaan pada kondisi kerja yang ekstrim seperti temperatur yang sangat tinggi.[18] *Superalloy Inconel 718* merupakan paduan super yang berbasis nikel, kromium, dan besi. Komposisi paduan pada *Superalloy Inconel 718* adalah seperti pada tabel 2.4 dibawah ini:[7]

Tabel 2. 4 Komposisi *Superalloy Inconel 718* [7]

Element	Weight (%)	Element	Weight (%)
Ni	53.039	Cu	0.047
Cr	17.13	W	0.208
Fe	19.36	C	0.031
Mo	2.869	Al	0.315
Ti	1.119	Si	0.038
Nb	4.769	Mn	0.082
Co	0.957		

Paduan ini banyak digunakan diberbagai bidang karena memiliki beberapa kelebihan seperti: [18]

- Kekuatan yang baik pada temperatur kerja yang tinggi
- Ketahanan terhadap oksidasi dan korosi yang baik
- Ketahanan terhadap keausan yang baik
- Konduktivitas termal yang rendah
- Ketahanan terhadap temperatur yang tinggi
- Memiliki karakteristik pengelasan yang baik

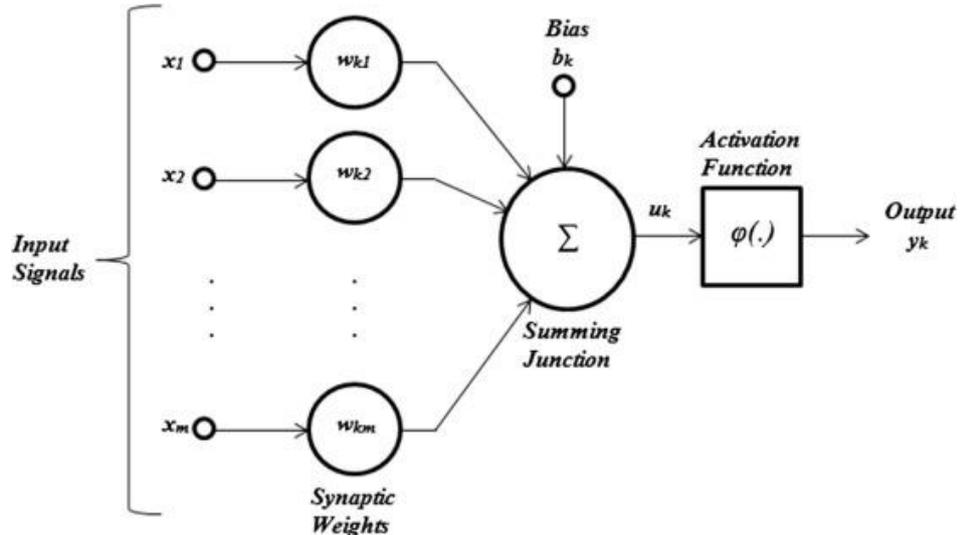
Meskipun memiliki banyak kelebihan yang menjadikan *Superalloy Inconel 718* banyak dipilih dibandingkan paduan lainnya, paduan ini memiliki kelemahan yang cukup serius, yaitu paduan ini memiliki *machinability* yang sangat buruk. *Superalloy Inconel 718* merupakan material yang sangat sulit untuk dipotong, sehingga akan menyebabkan kesulitan dalam memproses paduan ini dalam proses pemesinan dan membutuhkan waktu yang cukup lama. Beberapa contoh penggunaan *Superalloy Inconel 718* adalah sebagai material pembuatan *missile*, pesawat terbang, turbin gas, industri bahan kimia, dan reaktor nuklir [7].

2.8. Jaringan Syaraf Tiruan (*Artificial Neural Network*)

Jaringan Syaraf Tiruan atau disebut juga *Artificial Neural Network* merupakan tiruan dari kecerdasan otak manusia yang direpresentasikan ke dalam program komputer, sehingga program komputer tersebut dapat menyelesaikan proses-proses perhitungan selama proses pembelajaran. Jaringan Syaraf Tiruan memiliki prinsip kerja dengan mensimulasikan kecerdasan otak manusia dalam menyelesaikan proses pembelajaran. Perilaku dan susunan syaraf yang ada pada manusia akan disimulasikan ke program komputer oleh Jaringan Syaraf Tiruan. Jaringan Syaraf Tiruan akan tersusun dari beberapa *neuron* yang akan saling berhubungan satu dengan lainnya, layaknya syaraf pada manusia. Hubungan antar *neuron* pada Jaringan Syaraf Tiruan disebut dengan *weight* atau bobot yang informasinya disimpan pada suatu nilai tertentu [19].

2.8.1. Prinsip Dasar Jaringan Syaraf Tiruan

Prinsip kerja dasar dari Jaringan Syaraf Tiruan terdiri dari satu set unit yaitu *input* dan *output* yang saling terhubung dimana memiliki *weight* di tiap hubungannya. Beberapa Jaringan Syaraf Tiruan juga memiliki *hidden layer* diantara *input* dan *output*. Informasi yang dikirimkan dari *input* akan diteruskan ke *layer-layer* berikutnya, hingga diterima di *output* [20].



Gambar 2. 5 Jaringan Syaraf Tiruan [21]

Berdasarkan gambar 2.5 ada 3 elemen dasar dari Jaringan Syaraf Tiruan, yaitu: [21]

1. *Synapses* atau penghubung, memiliki bobot sehingga nilai *input* dari x_i yang menuju *neuron* k akan dikalikan dengan bobot w_{ki} .
2. *Input* yang sudah dikalikan dengan bobot, maka akan dijumlahkan.
3. Fungsi aktivasi, yaitu fungsi yang akan membatasi rentang nilai amplitudo dari *output* menjadi nilai tertentu.

Selain itu, juga terdapat nilai bias yang akan menambah atau mengurangi *input* dari fungsi aktivasi. Sehingga, *output* dari *neuron* k dapat dinyatakan sebagai berikut: [21]

$$y_k = \varphi(\sum_{i=1}^m x_i \cdot w_{ki} + b_k) \quad (2.13)$$

dimana:

$x_i = x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$ adalah sinyal *input*

$w_{ki} = w_{k1}, w_{k2}, w_{k3}, \dots, w_{km}$ adalah bobot masing-masing *neuron*

b_k adalah nilai bias

φ adalah fungsi aktivasi.

Untuk memperjelas efek yang dihasilkan dari bias terhadap kinerja *neuron*, maka pada persamaan diatas diproses menjadi dua tahap, yang pertama yaitu jumlah *input* dengan beban seperti pada persamaan berikut: [21]

$$S_k = (\sum_{i=1}^m x_i \cdot w_{ki}) \quad (2.14)$$

Sedangkan tahap kedua yaitu *output* yang ditambahkan dengan bias, seperti pada persamaan berikut:[21]

$$v_k = (S_k + b_k) \quad (2.15)$$

Sehingga, *output* dari neuron menjadi seperti pada persamaan berikut:[21]

$$y_k = \varphi(v_k) \quad (2.16)$$

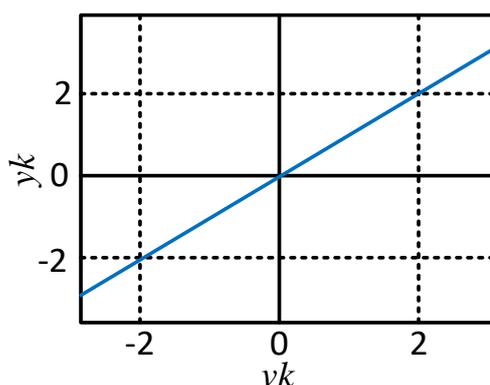
2.8.2. Fungsi Aktivasi

Fungsi aktivasi digunakan untuk mendefinisikan *output* dari suatu *neuron* dalam suatu jaringan syaraf tiruan. Ada beberapa jenis fungsi aktivasi, dimana masing-masing jenis memiliki fungsi dan tujuan tersendiri dalam menghasilkan *output*. Berikut ini adalah beberapa jenis fungsi aktivasi: [21]

1. Fungsi *Linear*

Fungsi *linear* digunakan ketika nilai *output* dari neuron proporsional dengan nilai *input*. Sehingga persamaan *output* menjadi seperti gambar 2.6 atau pada persamaan berikut: [21]

$$y_k = v_k \quad (2.17)$$

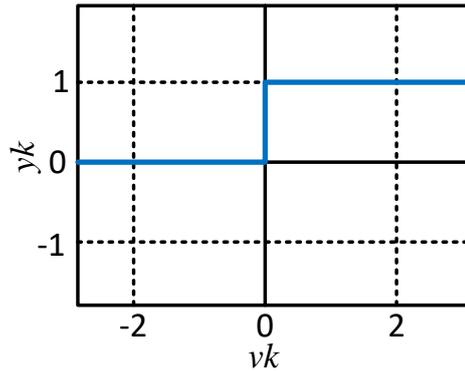


Gambar 2. 6 Fungsi *Linear* [21]

2. Fungsi *Threshold* atau *Limit*

Fungsi *threshold* atau *limit* menghasilkan *output* yang digital, sehingga persamaan *output* menjadi seperti gambar 2.7 atau pada persamaan berikut: [21]

$$y_k = \begin{cases} 1 & \text{if } v_k \geq 0 \\ 0 & \text{if } v_k < 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

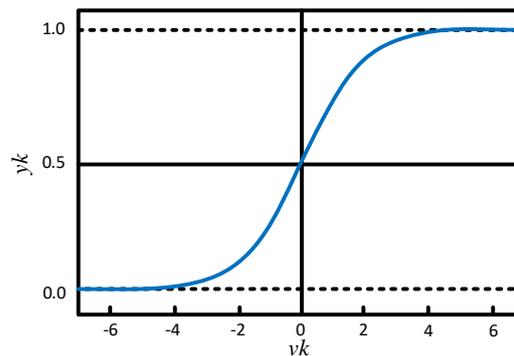


Gambar 2. 7 Fungsi *Threshold* atau *Limit* [21]

3. Fungsi *Sigmoid*

Fungsi *sigmoid* memiliki sifat yang *nonlinear* dan dapat menghasilkan *output* analog. Selain itu, batas *output* yang dihasilkan berada diantara 0 dan 1. Persamaan *output* fungsi sigmoid adalah seperti gambar 2.8 atau pada persamaan berikut: [21]

$$y_k = \frac{1}{1+e^{vk}} \quad (2.19)$$

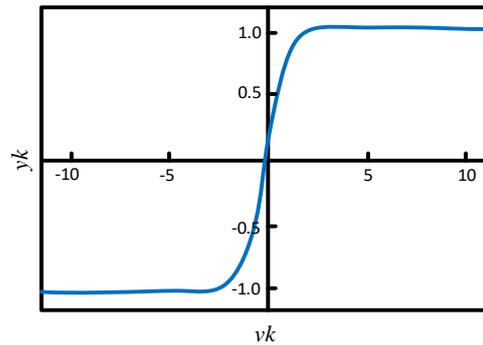


Gambar 2. 8 Fungsi *Sigmoid* [21]

4. Fungsi *Tangent Sigmoid*

Fungsi *tangent sigmoid* memiliki sifat seperti fungsi *sigmoid*, namun memiliki rentang nilai dari $-\infty$ sampai ∞ . Persamaan *output* fungsi *tangent sigmoid* seperti pada gambar 2.9 atau persamaan berikut: [21]

$$y_k = \frac{2}{1+e^{-2vk}} - 1 \quad (2.20)$$



Gambar 2. 9 Fungsi *Tangent Sigmoid* [21]

Sedangkan pada perangkat lunak MATLAB, memiliki beberapa jenis fungsi aktivasi yang serupa, namun memiliki penamaan yang berbeda. Masing-masing fungsi aktivasi pada perangkat lunak MATLAB memiliki nama yang dapat dipanggil ketika sedang melakukan proses penyelesaian pada algoritma di MATLAB. Beberapa contoh fungsi aktivasi yang dapat digunakan pada perangkat lunak MATLAB antara lain seperti pada tabel 2.5 dibawah ini:

Tabel 2. 5 Fungsi Aktivasi di MATLAB

Name	Input/Output Relation	Icon	MATLAB Function
Hard Limit	$a = 0 \quad n < 0$ $a = 1 \quad n \geq 0$		hardlim
Symmetrical Hard Limit	$a = -1 \quad n < 0$ $a = +1 \quad n \geq 0$		hardlims
Linear	$a = n$		purelin
Saturating Linear	$a = 0 \quad n < 0$ $a = n \quad 0 \leq n \leq 1$ $a = 1 \quad n > 1$		satlin
Symmetric Saturating Linear	$a = -1 \quad n < -1$ $a = n \quad -1 \leq n \leq 1$ $a = 1 \quad n > 1$		satlins
Log-Sigmoid	$a = \frac{1}{1 + e^{-n}}$		logsig
Hyperbolic Tangent Sigmoid	$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$		tansig
Positive Linear	$a = 0 \quad n < 0$ $a = n \quad 0 \leq n$		poslin
Competitive	$a = 1$ neuron with max n $a = 0$ all other neurons		compet

2.8.3. Metode Proses Pembelajaran (*Training*)

Untuk dapat menjalankan fungsi, Jaringan Syaraf Tiruan memerlukan proses pembelajaran yang disebut dengan *training*. Proses *training* ini akan mengkalibrasikan nilai bobot atau *weight* dan nilai bias. Ada dua metode *training* dalam Jaringan Syaraf Tiruan, yaitu: [22]

1. *Supervised Learning*

Pada *supervised learning* atau pembelajaran terawasi, Jaringan Syaraf Tiruan yang akan diberikan data *input* dan data *output* untuk dianalisa dan dipelajari dari sinyal *error* yang dihasilkan, sehingga algoritma tersebut dapat menentukan nilai bobot dan nilai bias untuk jaringan tersebut. [22]

2. *Unsupervised Learning*

Pada *unsupervised learning* atau pembelajaran tak terawasi, Jaringan Syaraf Tiruan akan diberikan dua lapisan yaitu lapisan *input* dan lapisan kompetitif. Selanjutnya, algoritma akan memproses data *input* sehingga akan mendapatkan data *output* dari jaringan tersebut. [22]

2.9. *Backpropagation Neural Network*

Backpropagation Neural Network atau BPNN merupakan salah satu jenis Jaringan Syaraf Tiruan dengan metode *supervised learning*. Prinsip proses pembelajaran dari algoritma *backpropagation neural network* adalah dengan cara mengevaluasi dan menyesuaikan kembali nilai bobot atau *weight* dari *neuron-neuron* berdasarkan nilai *error* yang diperoleh dari proses pembelajaran, sehingga algoritma *backpropagation neural network* dikatakan sebagai pembelajaran dengan arah mundur. Untuk mendapatkan nilai *error* dari proses pembelajaran, maka harus dilakukan proses pembelajaran maju terlebih dahulu [23]. Ciri dari algoritma *backpropagation neural network* adalah memiliki tiga lapisan, yaitu: [24]

1. Lapisan masukan atau *input layer*, memiliki peran sebagai sumber data
2. Lapisan tersembunyi atau *hidden layer*, dimana dapat memiliki satu atau lebih lapisan
3. Lapisan luaran atau *output layer*, memiliki peran sebagai hasil dari pembelajaran

Algoritma *backpropagation neural network* tentunya memiliki sejumlah kelebihan dan keterbatasan. Berikut ini adalah kelebihan dari *backpropagation neural network* adalah sebagai berikut: [24]

1. Dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan terkait bidang identifikasi, prediksi, peramalan, dan pengenalan pola.
2. Memiliki kemampuan untuk belajar dan mampu menerima toleransi dari kesalahan, sehingga memiliki sifat yang tahan terhadap kegagalan (*fault*) dan dapat bekerja secara konsisten.
3. Dapat melatih jaringan untuk mendapatkan keseimbangan selama proses pembelajaran sehingga memberikan respon yang sesuai dengan pola *input* yang serupa dengan pola selama proses pembelajaran.

Sedangkan keterbatasan dari algoritma *backpropagation neural network* adalah sebagai berikut: [24]

1. Membutuhkan waktu yang relatif lama untuk proses pembelajaran.
2. Parameter tingkat pembelajaran akan berubah-ubah sesuai dengan kondisi perubahan error setiap iterasinya.
3. Dalam menghitung perubahan bobot dapat menyebabkan masalah lokal minimum sehingga tidak stabil.

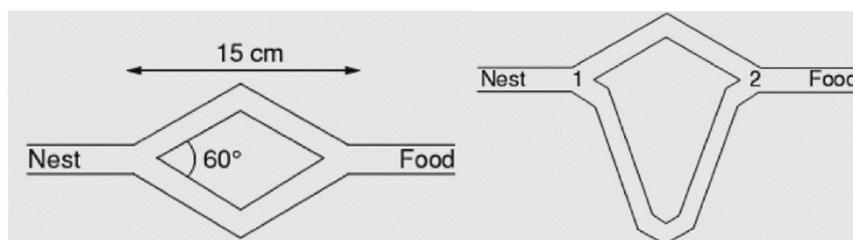
2.10. *Harmony Search*

Harmony search merupakan salah satu jenis algoritma metaheurestik optimasi yang meniru proses improvisasi dari seorang musisi dalam menemukan harmoni musik yang merdu. Proses harmonisasi didefinisikan sebagai hubungan dari beberapa gelombang suara dimana memiliki frekuensi yang berbeda-beda dan menghasilkan kombinasi yang baik. Untuk menghasilkan harmoni yang indah, tentunya musisi melakukan latihan-latihan yang cukup. Dalam memainkan harmoni yang baik, musisi akan memiliki tiga pilihan, yaitu memainkan musik berdasarkan harmoni musik yang terkenal berdasarkan ingatan mereka, memainkan harmoni musik yang terkenal namun dengan improvisasi, atau membuat harmoni musik baru. Semua proses ini sama halnya dengan proses optimasi dengan algoritma *harmony search*. [25] Pada algoritma *harmony search*, solusi yang dihasilkan yang sering disebut dengan harmoni dan variabel-variabel keputusannya semua berdasarkan catatan. Catatan tersebut disebut dengan *harmony memory* dimana nilai dari harmoni disimpan. Berikut ini adalah tahapan dalam melakukan optimasi dengan menggunakan algoritma *harmony search*: [25]

1. *Harmony memory* awal ditentukan
2. Harmoni baru diimprovisasi
3. Harmoni baru dimasukkan kedalam *harmony memory*
4. Tahapan ke 2 dan ke 3 diulang hingga mencapai *stopping criterion*
5. Solusi yang paling optimal ditemukan

2.11. *Ant Colony Optimization*

Ant Colony Optimization merupakan salah satu jenis algoritma metaheurestik optimasi yang meniru dari perilaku kawanan semut dalam mencari makanan dengan jalur terdekat dari sarang mereka. Saat kawanan semut mencari makanan, mereka awalnya akan menjelajahi suatu wilayah tersebut secara acak. Ketika seekor semut berjalan menjelajahi, mereka akan meninggalkan jejak yang disebut dengan feromon. Feromon merupakan zat kimia yang digunakan untuk menandai jejak dari seekor semut, sehingga semut-semut lainnya dapat mencium zat kimia tersebut dan mengikuti jejaknya. Kemudian, setelah seekor semut menemukan makanan, maka akan mengevaluasi kualitas dan kuantitas dari makanan tersebut. Kuantitas dan kualitas makanan ini yang akan menjadi dasar penentuan kuantitas feromon yang dihasilkan oleh semut. Sehingga, semut-semut lainnya dapat mengetahui jalur mana yang tercepat dan bagaimana kuantitas dan kualitas makanannya.[6]



Gambar 2. 10 *Double Bridge Experiment* [6]

Double Bridge Experiment adalah salah satu ilustrasi yang diberikan oleh Deneubourg et al. terkait proses semut dalam mencari makan dengan jalur terdekat dari sarangnya seperti pada gambar 2.10 diatas. Pada eksperimen tersebut, terdapat dua jalur yang dapat dilalui oleh semut untuk menuju ke sumber makanan. Dari hasil eksperimen, jika kedua jalur tersebut memiliki jarak yang sama panjang maka kawanan semut akan cenderung menggunakan salah satu jalur. Hal ini dikarenakan semut-semut lainnya lebih memilih jalur yang memiliki lebih banyak feromon yang terdapat di jalurnya. Pada eksperimen kedua, dimana salah satu jalur

memiliki rute yang lebih panjang daripada jalur lainnya, awalnya semut akan memilih secara acak, namun karena pada jalur terpendek semut akan lebih cepat kembali ke sarangnya, maka akan lebih banyak feromon yang dihasilkan di jalur tersebut. Maka, semakin lama semut-semut lainnya akan semakin memilih rute yang terpendek karena memiliki feromon terbanyak.[6]

Ant Colony Optimization sangat cocok untuk digunakan untuk mencari nilai optimum pada permasalahan yang dinamik seperti pada proses gerinda permukaan. Metode optimasi ini dapat menemukan solusi dengan cepat karena dapat bekerja secara paralel. Berikut ini adalah kelebihan dari metode optimasi *Ant Colony Optimization*: [6]

- Pencarian secara paralel
- Waktu pencarian solusi sangat cepat
- Dapat beradaptasi terhadap variasi
- Memiliki jaminan konvergensi

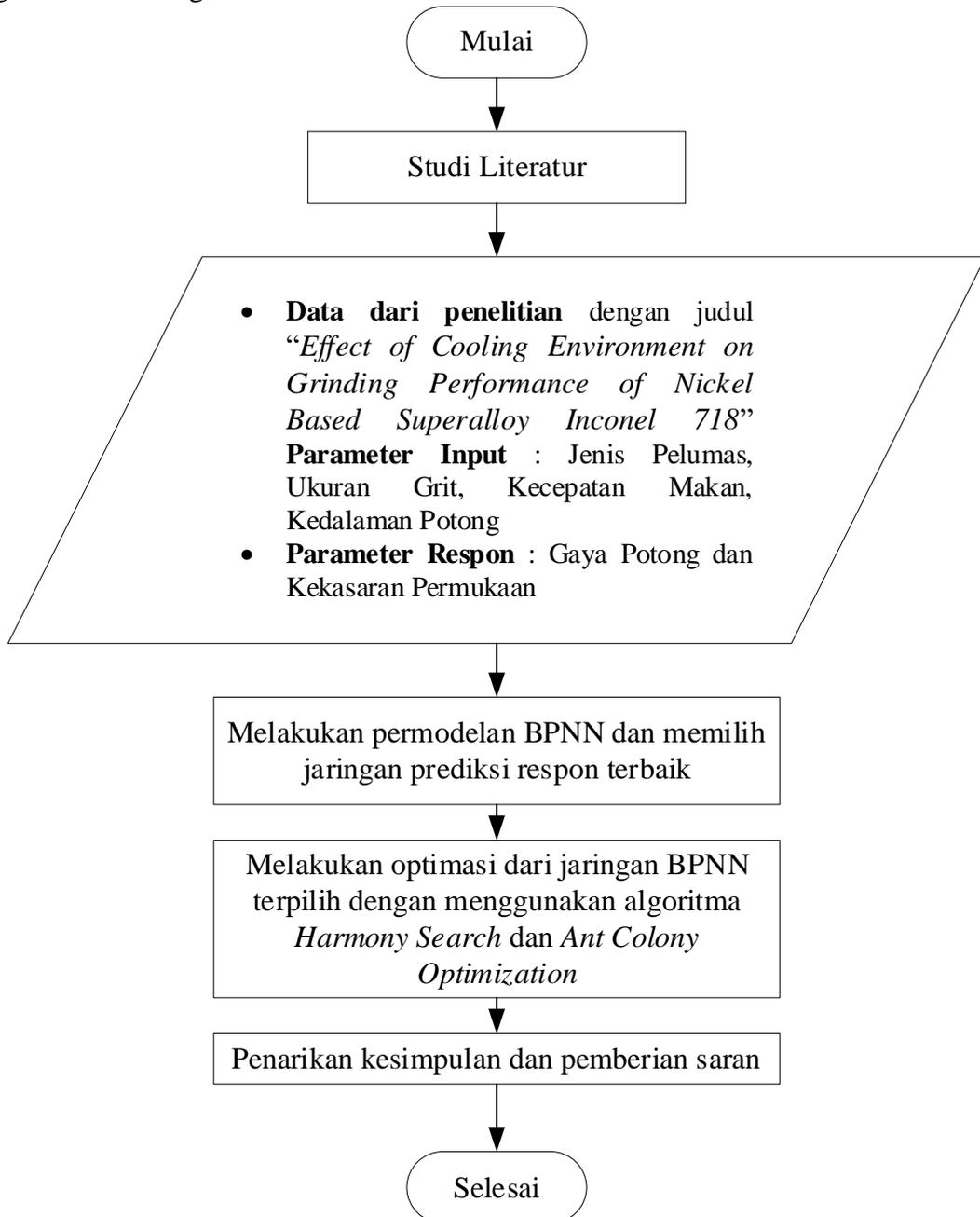
Namun, metode optimasi ini juga memiliki beberapa kelemahan, antara lain:

- Distribusi probabilitas berubah setiap iterasi
- Memiliki analisis teoritis yang sulit
- Memiliki urutan tergantung dari keputusan acak
- Memiliki lebih banyak penelitian eksperimen daripada teoritis
- Waktu konvergensi tidak tentu

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Aktivitas yang dilakukan dalam penelitian ini digambarkan pada diagram alir penelitian pada gambar 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.1.1. Studi Literatur

Dalam melakukan penelitian ini, tahap awal yang dilakukan adalah melakukan studi literatur. Studi literatur merupakan tahapan untuk mempelajari dan memperdalam landasan teori yang digunakan dalam penelitian ini. Studi literatur yang dilakukan pada

penelitian ini yaitu mencari jurnal-jurnal maupun penelitian yang pernah dilakukan yang terkait dengan penelitian ini, yaitu optimasi pada proses gerinda permukaan, *Artificial Neural Network* (ANN), algoritma *Harmony Search* (HS) dan algoritma *Ant Colony Optimization* (ACO).

3.1.2. Data

Pada penelitian ini, digunakan data yang berasal dari jurnal yang berjudul “*Effect of Cooling Environment on Grinding Performance of Nickel Based Superalloy Inconel 718*” oleh Sandeep Huddedar, Pankaj Chitalkar, Arvind Chavan dan Raju S. Pawede pada tahun 2012. Berikut ini adalah parameter *input* yang digunakan pada penelitian ini, pada tabel 3.1 dibawah ini:

Tabel 3. 1 *Design of Experiment* Penelitian

Parameter Input	Level 1	Level 2	Level 3
Jenis <i>Lubricant</i>	<i>Coconut Oil</i>	SAE+ <i>Graphite</i>	<i>Liquid Nitrogen</i>
Ukuran Grit (Grit Size)	60	120	220
Kecepatan Makan (m/min)	8	10	12
Kedalaman Potong (mm)	0,05	0,10	0,15

Dari parameter *input* pada tabel 3.1 diatas, terdapat data yang bersifat diskrit dan kontinu. Data jenis *lubricant* memiliki sifat diskrit karena hanya mencari nilai dengan menggunakan jenis *coconut oil*, SAE+*graphite*, dan *liquid nitrogen* saja. Selanjutnya, pada ukuran grit (grit size) merupakan data yang bersifat kontinu karena memiliki besaran nilai mulai dari 60 hingga 220, namun apabila nilai yang didapatkan tidak terdapat dalam standar ukuran grit, maka dibulatkan ke ukuran grit terdekat. Kemudian, untuk data kecepatan makan merupakan data yang bersifat kontinu, karena dapat diperoleh data yang berada diantara level 1 hingga level 3 atau diantara 8 m/min hingga 12 m/min. Selain itu, parameter kedalaman potong juga merupakan data yang bersifat kontinu, karena dapat diperoleh data yang berada diantara level 1 hingga level 3 atau diantara 0,05 mm hingga 0,15 mm.

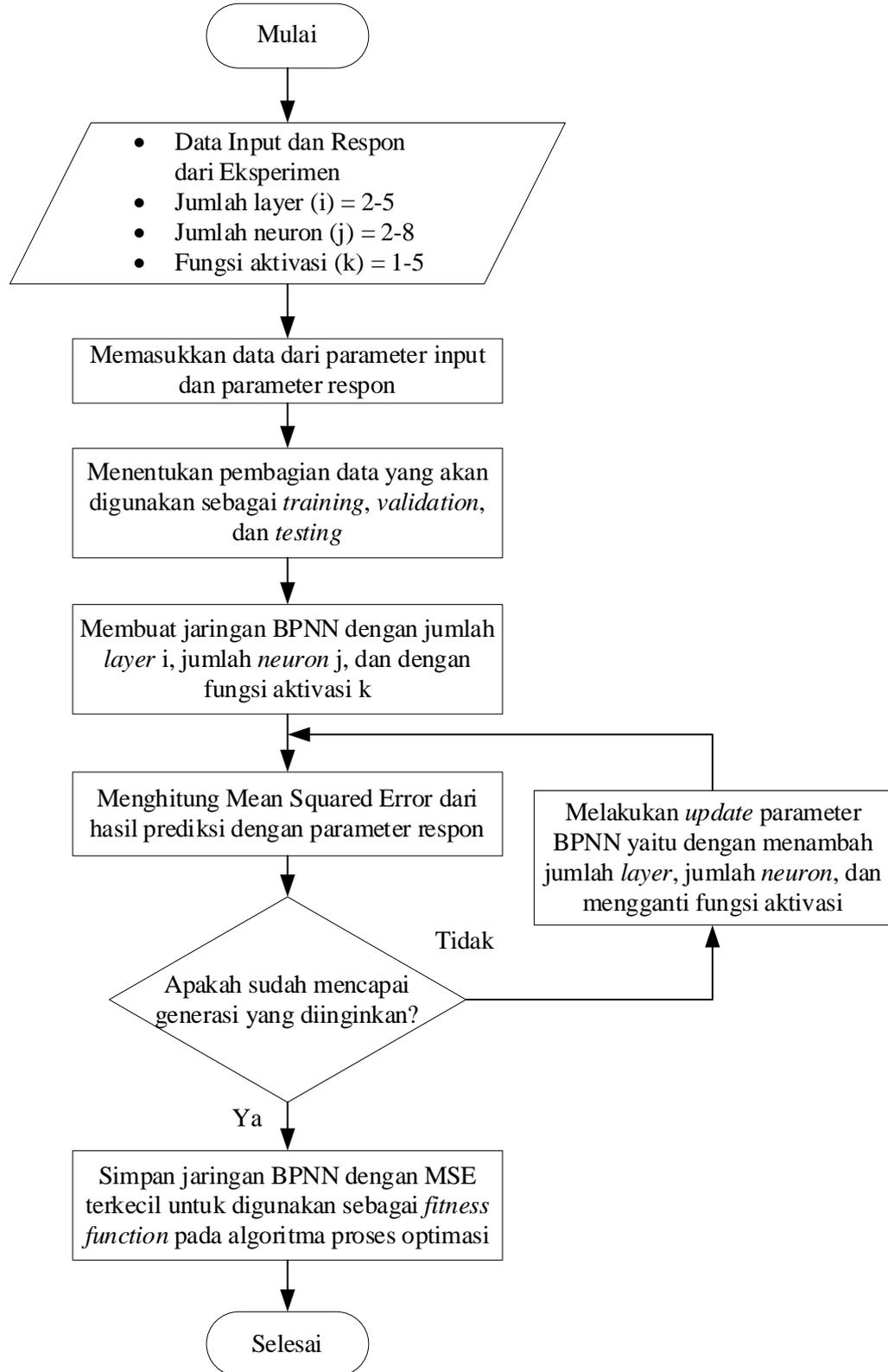
Kemudian, data respon untuk setiap variabel proses dari hasil eksperimen proses gerinda permukaan yang dilakukan oleh Sandeep Huddedar, Pankaj Chitalkar, Arvind Chavan dan Raju S. Pawede pada tahun 2012 tersebut terdapat dalam tabel 3.2. Pada tabel 3.2 merupakan data eksperimental berupa gaya potong normal, gaya potong tangensial, dan kekasaran permukaan dari proses gerinda permukaan. Dari keempat parameter proses gerinda permukaan, dilakukan desain faktorial berupa L_{27} *orthogonal matrix* sehingga terdapat 27 kombinasi data percobaan. Seluruh data tersebut terdapat dalam tabel dibawah ini:

Tabel 3. 2 Data Hasil Eksperimen Proses Gerinda Permukaan pada *Superalloy Inconel 718*

Variabel Proses				Respon		
Jenis Lubricant	Ukuran Grit	Kecepatan Makan (m/min)	Kedalaman Potong (mm)	Gaya Tangensial (N)	Gaya Normal (N)	Kekasaran Permukaan (μm)
<i>Coconut Oil</i>	60	8	0,05	67,8	118,0	0,96
	60	10	0,10	71,9	121,6	0,88
	60	12	0,15	70,5	120,0	1,09
	120	8	0,10	66,9	115,8	0,50
	120	10	0,15	66,6	214,0	0,53
	120	12	0,05	67,9	126,0	0,59
	220	8	0,15	66,8	113,9	0,42
	220	10	0,05	66,3	154,0	0,16
<i>SAE + Graphite</i>	220	12	0,10	67,5	113,8	0,18
	60	8	0,10	70,0	119,5	1,20
	60	10	0,15	70,1	120,3	1,30
	60	12	0,05	69,9	120,0	1,17
	120	8	0,15	68,0	112,0	0,47
	120	10	0,05	67,0	155,0	0,39
	120	12	0,10	65,0	137,0	0,45
	220	8	0,05	64,7	113,0	0,19
<i>Liquid Nitrogen</i>	220	10	0,10	66,0	115,7	0,24
	220	12	0,15	68,0	119,0	0,33
	60	8	0,15	68,5	115,0	1,50
	60	10	0,05	67,0	154,0	1,25
	60	12	0,10	67,3	109,0	1,07
	120	8	0,05	68,0	152,0	0,51
	120	10	0,10	67,0	112,9	0,50
	120	12	0,15	66,0	117,0	0,54
	220	8	0,10	66,3	166,0	0,20
220	10	0,15	67,6	124,0	0,37	
220	12	0,05	66,0	111,3	0,26	

3.1.3. Melakukan Permodelan BPNN

Dalam permodelan BPNN, untuk mendapatkan jaringan yang sesuai dalam memprediksi respon yang digunakan untuk proses optimasi, maka dilakukan seperti pada diagram alir berikut ini:

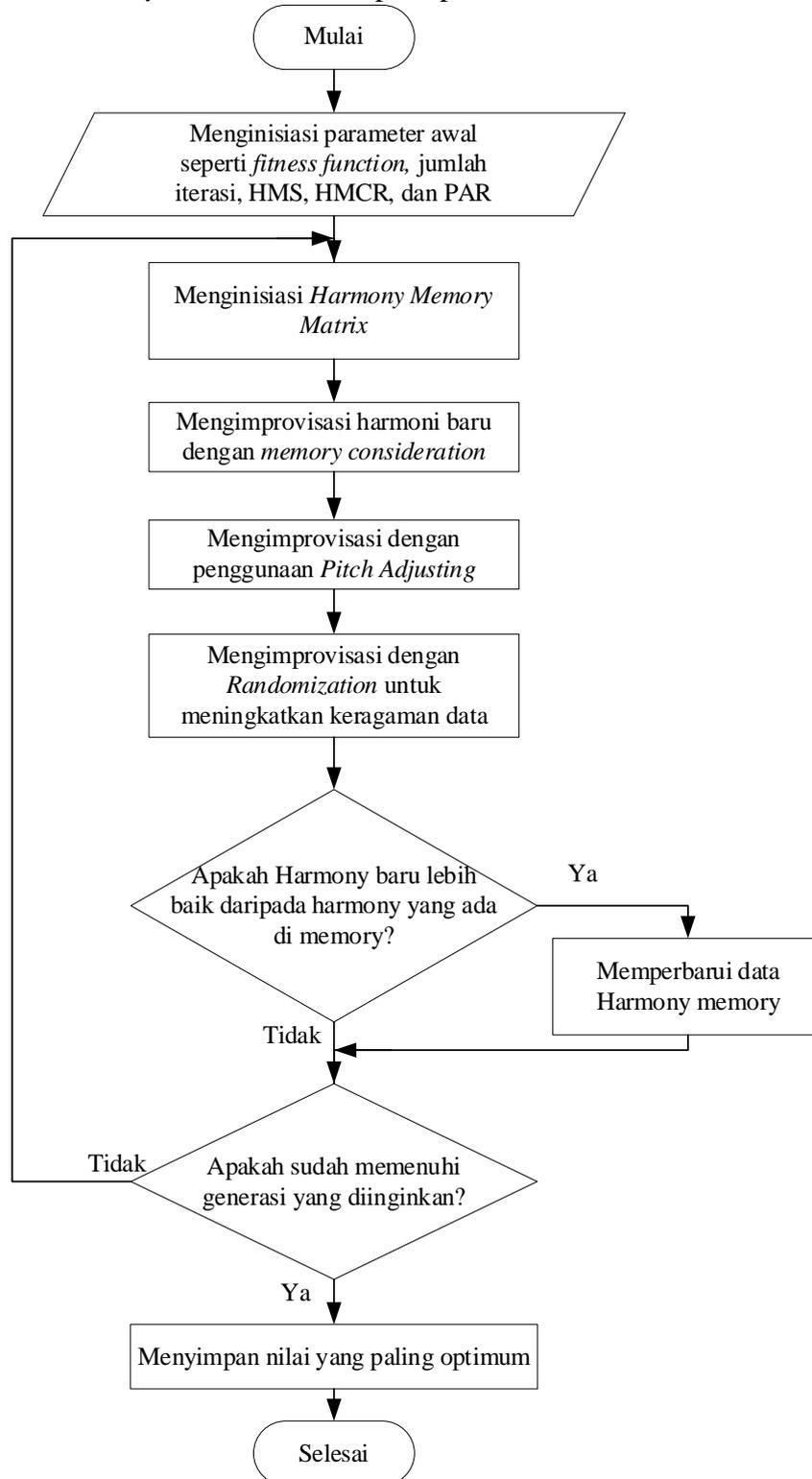


Gambar 3. 2 Diagram Alir Permodelan BPNN

Dari diagram alir diatas, digunakan nilai i yang merupakan jumlah *hidden layer* yaitu antara 2 hingga 5 Kemudian, digunakan nilai j yang merupakan jumlah *neuron* dari setiap *layer* yaitu sebesar 2 hingga 8 Dan yang terakhir digunakan nilai k yang merupakan nilai permisalan dari fungsi aktivasi, dimana nilai 1 adalah fungsi logsig, 2 adalah fungsi tansig, 3 adalah fungsi purelin, 4 adalah fungsi satlin, dan 5 adalah fungsi satlins. Setelah mendapatkan seluruh hasil, maka dilakukan plot untuk mendapatkan nilai MSE (*Mean Square Error*) yang paling rendah. Dimana jaringan dari kombinasi parameter dengan nilai MSE terendah tersebut selanjutnya digunakan untuk proses optimasi dengan menggunakan algoritma *Harmony Search* dan *Ant Colony Optimization*.

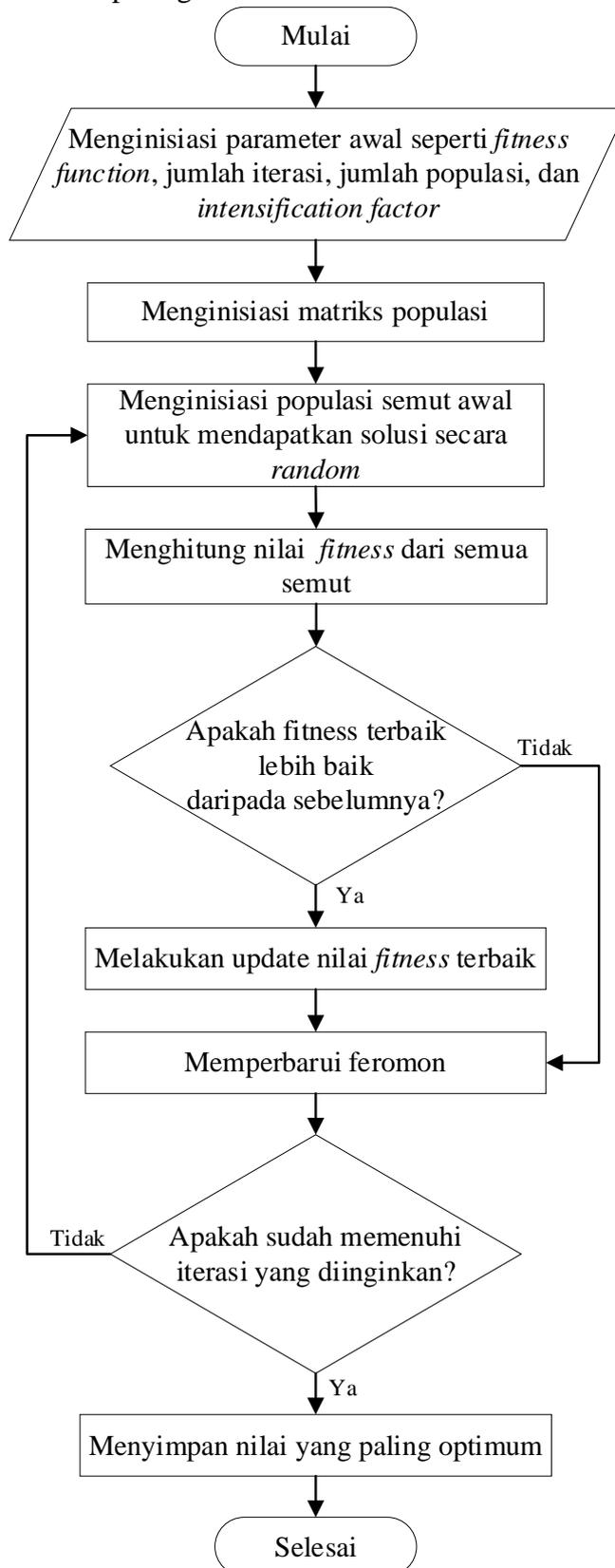
3.1.4. Optimasi dengan Metode Algoritma *Harmony Search* dan *Ant Colony Optimization*

Dalam mencari nilai yang paling optimal, digunakan dua metode yaitu algoritma *Harmony Search* dan *Ant Colony Optimization*. Alur dalam mencari nilai optimum dengan metode *Harmony Search* adalah seperti pada Gambar 3.3 dibawah ini:



Gambar 3. 3 Diagram Alir Algoritma *Harmony Search*

Sedangkan untuk alur dalam mencari nilai optimum dengan algoritma *Ant Colony Optimization* dapat dilihat pada gambar 3.4 dibawah ini:



Gambar 3. 4 Diagram Alir Algoritma *Ant Colony Optimization*

3.1.5. Komparasi Hasil

Hasil yang diperoleh dari proses optimasi yang menggunakan metode algoritma *Harmony Search* selanjutnya dibandingkan dengan hasil yang diperoleh dari proses optimasi yang menggunakan algoritma *Ant Colony Optimization* sebagai validator.

3.1.6. Penarikan Kesimpulan dan Pemberian Saran

Tahap ini menjelaskan tentang hasil yang diperoleh dari penelitian ini dan memberikan saran untuk membantu penelitian lebih lanjut kedepannya.

BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengaruh Setiap Parameter Terhadap Fungsi Tujuan

Data parameter *input* dan parameter *output* (respon) dipilih berdasarkan data eksperimen yang telah dilakukan pada jurnal yang berjudul “*Effect of Cooling Environment on Grinding Performance of Nickel Based Superalloy Inconel 718*” oleh Sandeep Huddedar, Pankaj Chitalkar, Arvind Chavan dan Raju S. Pawede pada tahun 2012. Data parameter *input* dari eksperimen tersebut meliputi jenis *lubricant*, ukuran grit, kecepatan makan, dan kedalaman potong. Sedangkan parameter *output* atau respon dari eksperimen tersebut adalah gaya potong tangensial, gaya potong normal, dan kekasaran permukaan.

4.2. Permodelan *Backpropagation Neural Network*

Tahap awal dari penelitian ini adalah dengan melakukan *training* dari data eksperimen dengan proses *Artificial Neural Network* yaitu *Backpropagation Neural Network*. Sebelum melakukan proses *training* pada *Backpropagation Neural Network*, seluruh data *input* maupun data *output* (respon) harus dilakukan normalisasi data. Normalisasi data merupakan tahapan *pre processing* yang bertujuan untuk penskalaan data yang memiliki rentang berbeda dan satuan yang berbeda akan diabaikan [26]. Normalisasi data dilakukan karena dari empat parameter *input* maupun tiga parameter *output* (respon) tersebut memiliki rentang nilai yang berbeda, dimana terdapat nilai-nilai yang besar seperti ukuran grit (60 hingga 220) dan nilai-nilai yang kecil seperti kedalaman potong (0,05 hingga 0,15). Dengan dilakukan normalisasi data, maka data yang memiliki nilai sangat kecil, seperti kedalaman potong, tidak akan diabaikan pengaruhnya dalam proses prediksi. Hasil dari normalisasi data, seluruh parameter *input* maupun *output* (respon) memiliki rentang nilai yang seragam yaitu -1 hingga 1. Untuk melakukan normalisasi data, digunakan perintah fungsi *mapminmax* yang terdapat didalam didalam perangkat lunak MATLAB. Fungsi tersebut melakukan normalisasi data secara otomatis dari semua parameter dengan mengubah nilai terkecil menjadi -1 dan nilai terbesar menjadi 1, seperti pada persamaan dibawah ini:

$$x_j = \frac{x_i - \min_a}{\max_a - \min_a} \times (\text{newmax}_a - \text{newmin}_a) + \text{newmin}_a \quad (4.1)$$

dimana:

- x_j : nilai x hasil normalisasi
- x_i : nilai x awal
- \min_a : nilai minimum dari keseluruhan data
- \max_a : nilai maksimum dari keseluruhan data
- newmin_a : nilai minimum dari rentang normalisasi yang diinginkan
- newmax_a : nilai maksimum dari rentang normalisasi yang diinginkan

Contoh perhitungan untuk normalisasi data untuk nilai x_i sebesar 120, dimana keseluruhan data memiliki rentang dari 60 hingga 220, dan rentang nilai normalisasi yang diinginkan yaitu -1 hingga 1, adalah seperti pada perhitungan dibawah ini:

$$\begin{aligned} x_j &= \frac{120 - 60}{220 - 60} \times (1 - (-1)) + (-1) \\ x_j &= \frac{60}{160} \times 2 - 1 \\ x_j &= -0,25 \end{aligned}$$

Sehingga, setelah dilakukan normalisasi data maka nilai 120 menjadi -0,25.

Pada penelitian ini, dilakukan normalisasi data untuk semua parameter *input* dan *output* (respon). Parameter *input* yaitu jenis *lubricant* dinormalisasi menjadi nilai -1 untuk *coconut oil*, nilai 0 untuk *SAE+graphite*, dan nilai 1 untuk *liquid nitrogen*. Selanjutnya untuk ukuran grit dinormalisasi dari 60 hingga 120 menjadi -1 hingga 1, kecepatan makan dinormalisasi dari 8 hingga 12 menjadi -1 hingga 1, dan kedalaman potong dinormalisasi dari 0,05 hingga 0,15 menjadi -1 hingga 1. Setelah dilakukan normalisasi untuk parameter *input*, juga dilakukan normalisasi untuk parameter *output* (respon). Dimana untuk gaya potong tangensial dinormalisasi dari 64,7 hingga 71,9 menjadi -1 hingga 1, untuk gaya potong normal dinormalisasi dari 109 hingga 214 menjadi -1 hingga 1, dan untuk kekasaran permukaan dinormalisasi dari 0,16 hingga 1,5 menjadi -1 hingga 1.

Proses *training* data dilakukan secara *full factorial* meliputi 1 hingga 3 *hidden layer*, dimana pada masing masing *hidden layer* diberikan 2 hingga 8 *neuron*, dan menggunakan 5 fungsi aktivasi yaitu *logsig*, *tansig*, *purelin*, *satlin*, *satlins*. Jumlah dan pembagian data yang digunakan sebagai *training* adalah 70%, data yang digunakan sebagai *validation* adalah 15%, dan data yang digunakan sebagai *testing* adalah 15%. Dari masing-masing kombinasi jumlah *hidden layer*, jumlah *neuron*, dan fungsi aktivasi dilakukan replikasi sebanyak 10 kali. Pada proses *training* dengan *Backpropagation Neural Network* ini dipilih jaringan (*net*) yang memiliki MSE atau *error* yang paling kecil. Pada penelitian ini, dilakukan proses *training* data dengan menggunakan *Backpropagation Neural Network* untuk masing-masing parameter respon, sehingga didapatkan 3 jaringan yaitu jaringan untuk gaya potong tangensial, jaringan untuk gaya potong normal, dan jaringan untuk kekasaran permukaan.

Setelah proses *training*, maka dilakukan proses *testing* untuk melihat performa dari jaringan yang telah dilakukan proses *training* melalui nilai *error* antara hasil prediksi (*testing*) dengan nilai *output* dari hasil eksperimen aktual. Apabila hasil prediksi (*testing*) dari jaringan tersebut mendekati nilai *output* dari hasil eksperimen aktual diperoleh nilai *error* (MSE) yang lebih kecil, sehingga jaringan dengan MSE terkecil dipilih. Berikut ini adalah hasil jaringan *Backpropagation Neural Network* untuk gaya potong tangensial, gaya potong normal, dan kekasaran permukaan:

4.2.1. Jaringan BPNN untuk Gaya Potong Tangensial

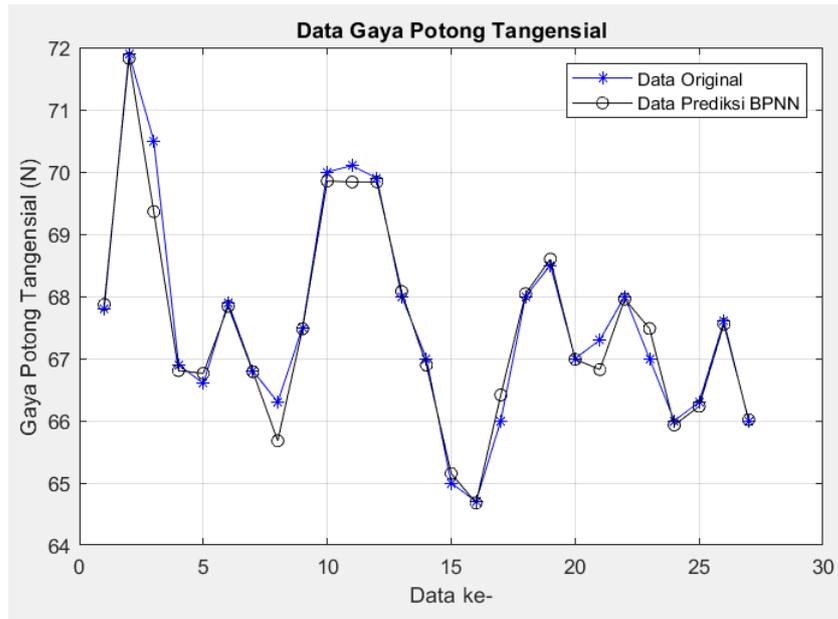
Hasil dari permodelan *Backpropagation Neural Network* untuk gaya potong tangensial yaitu didapatkan jaringan dengan MSE paling kecil sebesar 0,0072 dengan menggunakan 3 *hidden layer*, dimana *hidden layer* 1 dengan *neuron* sebanyak 7 dan fungsi aktivasi yaitu *satlins*, *hidden layer* 2 dengan *neuron* sebanyak 6 dan fungsi aktivasi yaitu *satlins*, *hidden layer* 3 dengan *neuron* sebanyak 8 dan fungsi aktivasi yaitu *tansig*. Performa dari jaringan ini dapat dilihat pada tabel 4.1 dan gambar 4.1. Pada gambar 4.1, nilai *output* dari hasil eksperimen aktual ditampilkan dalam bentuk garis grafik berwarna biru dan data hasil prediksi *Backpropagation Neural Network* ditampilkan dalam bentuk garis grafik berwarna hitam. Terdapat beberapa data prediksi yang tidak berada tepat pada data *output* atau target sehingga terdapat *error* atau selisih nilai antara target dengan hasil prediksi. *Error* terbesar yaitu sebesar 1,62% yang terjadi pada data ke-3.

Grafik pada gambar 4.2 tersebut merupakan grafik regresi yang menunjukkan nilai hubungan antara data prediksi dengan data target dalam bentuk nilai R (konstanta statistik). Apabila nilai R mendekati 1, maka data-data tersebut berada tepat atau dekat dengan garis gradien 1, sehingga dapat dikatakan bahwa data tersebut *perfect fit*. Dari permodelan *Backpropagation Neural Network* untuk gaya potong tangensial, hasil prediksi memiliki kesesuaian data yang baik (*perfect fit*) dengan data target, hal ini dapat dilihat pada gambar 4.2 dimana seluruh nilai R tersebut mendekati nilai 1. Didapatkan

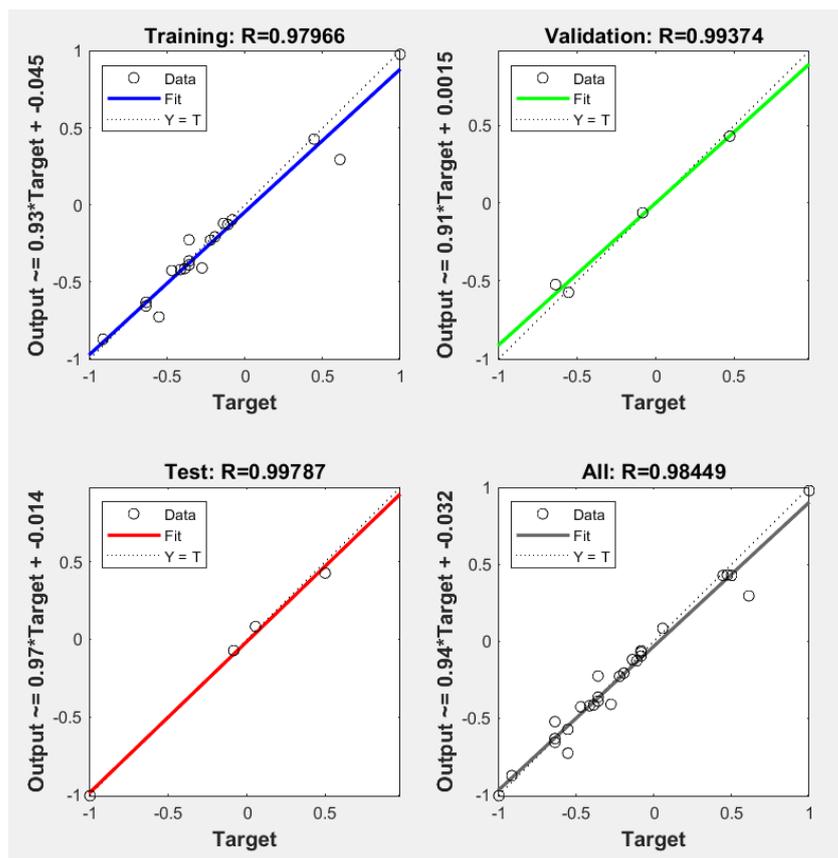
nilai R untuk *training* sebesar 0,97966, untuk *validation* sebesar 0,99374, untuk *testing* sebesar 0,99787, dan untuk keseluruhan memiliki nilai R sebesar 0,98449.

Tabel 4. 1 Perbandingan Hasil Target dengan Prediksi Gaya Tangensial

Input				Output	Prediksi BPNN	
Jenis Lubricant	Ukuran Grit	Kecepatan Makan (m/min)	Keedalaman Potong (mm)	Gaya Tangensial (N)	Prediksi Gaya Tangensial (N)	Error
Coconut Oil	60	8	0,05	67,80	67,869	0,10%
	60	10	0,10	71,90	71,823	0,11%
	60	12	0,15	70,50	69,361	1,62%
	120	8	0,10	66,90	66,806	0,14%
	120	10	0,15	66,60	66,761	0,24%
	120	12	0,05	67,90	67,839	0,09%
	220	8	0,15	66,80	66,785	0,02%
	220	10	0,05	66,30	65,677	0,94%
SAE + Graphite	220	12	0,10	67,50	67,476	0,04%
	60	8	0,10	70,00	69,852	0,21%
	60	10	0,15	70,10	69,837	0,37%
	60	12	0,05	69,90	69,838	0,09%
	120	8	0,15	68,00	68,078	0,11%
	120	10	0,05	67,00	66,894	0,16%
	120	12	0,10	65,00	65,152	0,23%
	220	8	0,05	64,70	64,679	0,03%
Liquid Nitrogen	220	10	0,10	66,00	66,414	0,63%
	220	12	0,15	68,00	68,042	0,06%
	60	8	0,15	68,50	68,598	0,14%
	60	10	0,05	67,00	66,987	0,02%
	60	12	0,10	67,30	66,822	0,71%
	120	8	0,05	68,00	67,954	0,07%
	120	10	0,10	67,00	67,481	0,72%
	120	12	0,15	66,00	65,930	0,11%
	220	8	0,10	66,30	66,232	0,10%
220	10	0,15	67,60	67,551	0,07%	
220	12	0,05	66,00	66,017	0,03%	



Gambar 4. 1 Grafik Perbandingan Data Target dan Prediksi Gaya Tangensial



Gambar 4. 2 Grafik *Correlation Coefficient* untuk Prediksi BPNN Gaya Tangensial

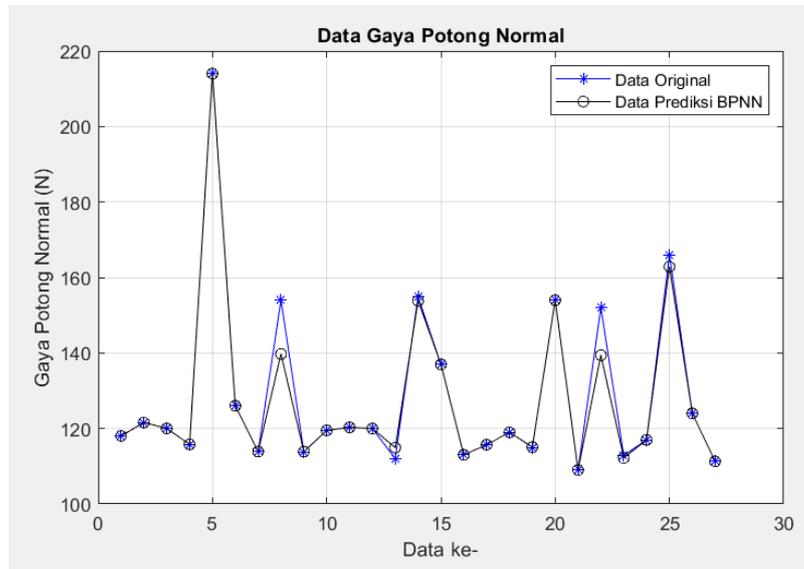
4.2.2. Jaringan BPNN untuk Gaya Potong Normal

Hasil jaringan *Backpropagation Neural Network* untuk gaya potong normal didapatkan jaringan dengan MSE paling kecil sebesar 0,0016 dengan menggunakan 3 hidden layer, dimana *hidden layer* 1 dengan *neuron* sebanyak 8 dan fungsi aktivasi yaitu

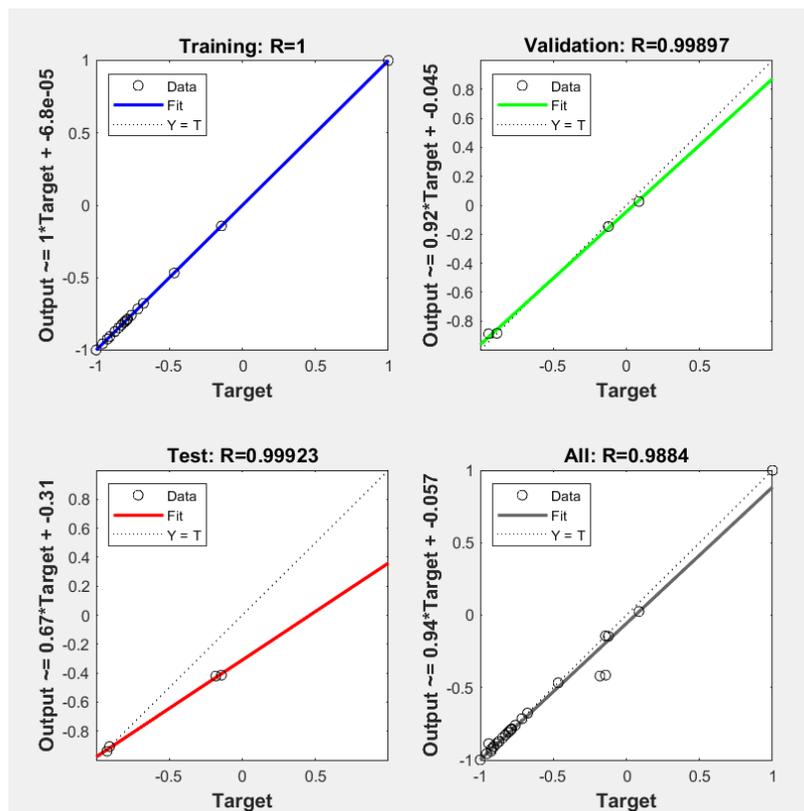
logsig, *hidden layer 2* dengan *neuron* sebanyak 4 dan fungsi aktivasi yaitu *logsig*, *hidden layer 3* dengan *neuron* sebanyak 2 dan fungsi aktivasi yaitu *tansig*. Performa dari jaringan ini dapat dilihat pada tabel 4.2 dan gambar 4.3. Pada gambar 4.3, data *output* atau target ditampilkan dalam bentuk garis grafik berwarna biru dan data hasil prediksi *Backpropagation Neural Network* ditampilkan dalam bentuk garis grafik berwarna hitam. Terdapat beberapa data prediksi yang tidak berada tepat pada data *output* atau target sehingga terdapat *error* atau selisih nilai antara target dengan hasil prediksi. *Error* yang cukup besar yang terjadi yaitu sebesar 9,26% pada data ke-8 dan 8,28% pada data ke-22. Dari permodelan *Backpropagation Neural Network* untuk gaya potong normal, hasil prediksi memiliki kesesuaian data yang baik (*perfect fit*) dengan data target, hal ini dapat dilihat pada gambar 4.4 dimana seluruh nilai R tersebut mendekati nilai 1. Didapatkan nilai R untuk *training* sebesar 1, untuk *validation* sebesar 0,99897, untuk *testing* sebesar 0,99923, dan untuk keseluruhan memiliki nilai R sebesar 0,9884.

Tabel 4. 2 Perbandingan Hasil Target dengan Prediksi Gaya Normal

Input				Output	Prediksi BPNN	
Jenis Lubricant	Ukuran Grit	Kecepatan Makan (m/min)	Keedalaman Potong (mm)	Gaya Normal (N)	Prediksi Gaya Normal (N)	Error
Coconut Oil	60	8	0,05	118,0	118,036	0,03%
	60	10	0,1	121,6	121,606	0,00%
	60	12	0,15	120,0	120,002	0,00%
	120	8	0,1	115,8	115,798	0,00%
	120	10	0,15	214,0	213,999	0,00%
	120	12	0,05	126,0	126,004	0,00%
	220	8	0,15	113,9	113,900	0,00%
	220	10	0,05	154,0	139,744	9,26%
SAE + Graphite	60	8	0,1	119,5	119,504	0,00%
	60	10	0,15	120,3	120,300	0,00%
	60	12	0,05	120,0	119,997	0,00%
	120	8	0,15	112,0	114,922	2,61%
	120	10	0,05	155,0	153,816	0,76%
	120	12	0,1	137,0	136,990	0,01%
	220	8	0,05	113,0	113,006	0,00%
	220	10	0,1	115,7	115,705	0,00%
Liquid Nitrogen	60	8	0,15	115,0	115,079	0,07%
	60	10	0,05	154,0	153,975	0,02%
	60	12	0,1	109,0	109,008	0,01%
	120	8	0,05	152,0	139,411	8,28%
	120	10	0,1	112,9	112,208	0,61%
	120	12	0,15	117,0	117,000	0,00%
	220	8	0,1	166,0	162,867	1,89%
	220	10	0,15	124,0	123,997	0,00%
220	12	0,05	111,3	111,304	0,00%	



Gambar 4. 3 Grafik Perbandingan Data Target dan Prediksi Gaya Normal



Gambar 4. 4 Grafik Correlation Coefficient untuk Prediksi BPNN Gaya Normal

4.2.3. Jaringan BPNN untuk Kekasaran Permukaan

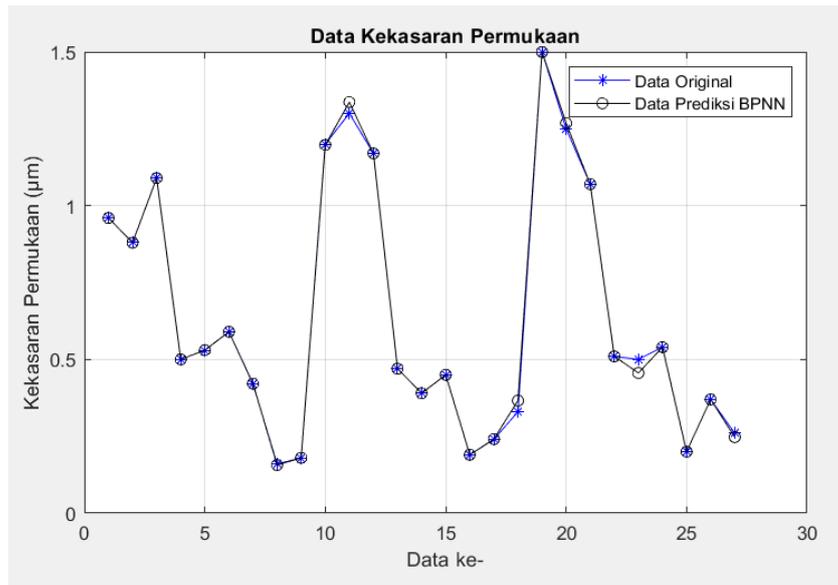
Hasil jaringan *Backpropagation Neural Network* untuk kekasaran permukaan didapatkan jaringan dengan MSE paling kecil sebesar 0,0004 dengan menggunakan 3 hidden layer, dimana *hidden layer* 1 dengan *neuron* sebanyak 8 dan fungsi aktivasi yaitu *logsig*, *hidden layer* 2 dengan *neuron* sebanyak 7 dan fungsi aktivasi yaitu *satlins*, *hidden layer* 3 dengan *neuron* sebanyak 3 dan fungsi aktivasi yaitu *tansig*. Peforma dari

jaringan ini dapat dilihat pada tabel 4.3 dan gambar 4.5. Pada gambar 4.5, data *output* atau target ditampilkan dalam bentuk garis grafik berwarna biru dan data hasil prediksi *Backpropagation Neural Network* ditampilkan dalam bentuk garis grafik berwarna hitam. Terdapat beberapa data prediksi yang tidak berada tepat pada data *output* atau target sehingga terdapat *error* atau selisih nilai antara target dengan hasil prediksi. *Error* yang cukup besar yang terjadi yaitu sebesar 10,95% pada data ke-18 dan 8,82% pada data ke-23.

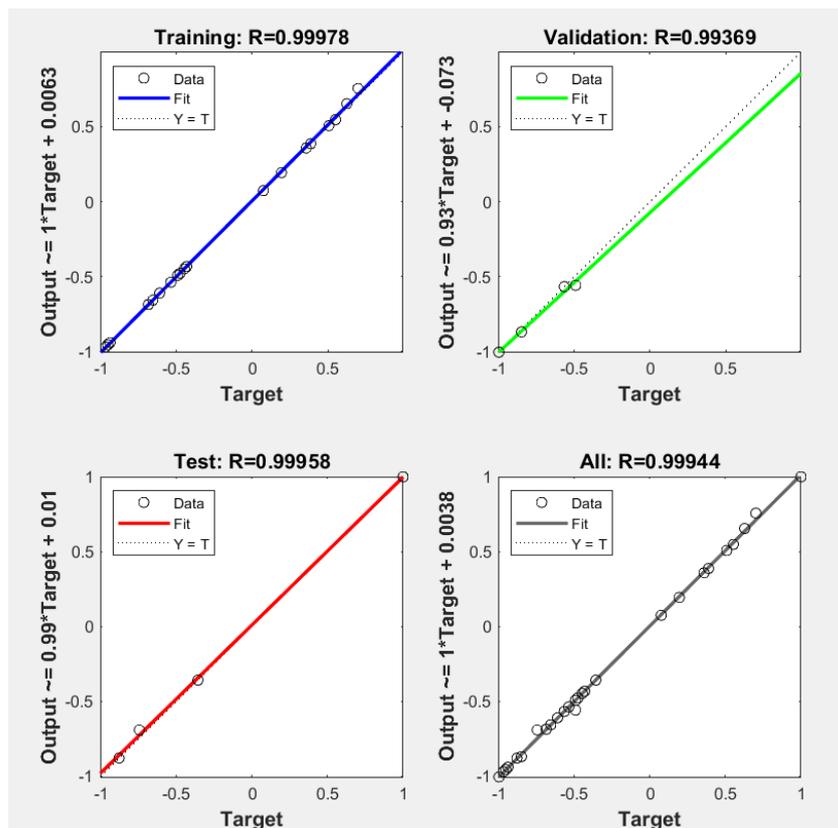
Dari permodelan *Backpropagation Neural Network* untuk gaya potong normal, hasil prediksi memiliki kesesuaian data yang baik (*perfect fit*) dengan data target, hal ini dapat dilihat pada gambar 4.6 dimana seluruh nilai R tersebut mendekati nilai 1. Didapatkan nilai R untuk *training* sebesar 0,99978, untuk *validation* sebesar 0,99369, untuk *testing* sebesar 0,99958, dan untuk keseluruhan memiliki nilai R sebesar 0,99944.

Tabel 4. 3 Perbandingan Hasil Target dengan Prediksi Kekasaran Permukaan

Input				Output	Prediksi BPNN	
Jenis Lubricant	Ukuran Grit	Kecepatan Makan (m/min)	Keedalaman Potong (mm)	Kekasaran Permukaan (μm)	Prediksi Kekasaran Permukaan (μm)	Error
Coconut Oil	60	8	0,05	0,96	0,960	0,02%
	60	10	0,1	0,88	0,880	0,03%
	60	12	0,15	1,09	1,089	0,06%
	120	8	0,1	0,50	0,500	0,01%
	120	10	0,15	0,53	0,530	0,02%
	120	12	0,05	0,59	0,590	0,04%
	220	8	0,15	0,42	0,421	0,35%
	220	10	0,05	0,16	0,157	2,06%
	220	12	0,1	0,18	0,180	0,01%
SAE + Graphite	60	8	0,1	1,20	1,197	0,24%
	60	10	0,15	1,30	1,337	2,82%
	60	12	0,05	1,17	1,170	0,01%
	120	8	0,15	0,47	0,470	0,01%
	120	10	0,05	0,39	0,390	0,00%
	120	12	0,1	0,45	0,450	0,01%
	220	8	0,05	0,19	0,190	0,01%
	220	10	0,1	0,24	0,241	0,35%
	220	12	0,15	0,33	0,366	10,95%
Liquid Nitrogen	60	8	0,15	1,50	1,500	0,03%
	60	10	0,05	1,25	1,268	1,46%
	60	12	0,1	1,07	1,070	0,00%
	120	8	0,05	0,51	0,510	0,00%
	120	10	0,1	0,50	0,456	8,82%
	120	12	0,15	0,54	0,540	0,01%
	220	8	0,1	0,20	0,200	0,02%
	220	10	0,15	0,37	0,370	0,01%
	220	12	0,05	0,26	0,247	4,82%



Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan Data Target dan Prediksi Kekasaran Permukaan



Gambar 4. 6 Grafik *Correlation Coefficient* untuk Prediksi BPNN Kekasaran Permukaan

Dari hasil prediksi untuk semua jaringan *Backpropagation Neural Network*, didapatkan nilai MSE yang cukup kecil yang menyebabkan perbedaan antara nilai target dengan nilai hasil prediksi dari *Backpropagation Neural Network* menjadi cukup kecil juga, sehingga seluruh jaringan *Backpropagation Neural Network* dapat digunakan

untuk proses pencarian nilai optimum. Namun, terdapat beberapa data yang memiliki perbedaan antara nilai target dengan nilai prediksi. Perbedaan nilai tersebut dapat terjadi karena beberapa faktor seperti jumlah data untuk proses *training* kurang atau karena terjadi kesalahan saat pengambilan data secara eksperimen.

4.3. Hasil Optimasi dengan Metode *Harmony Search*

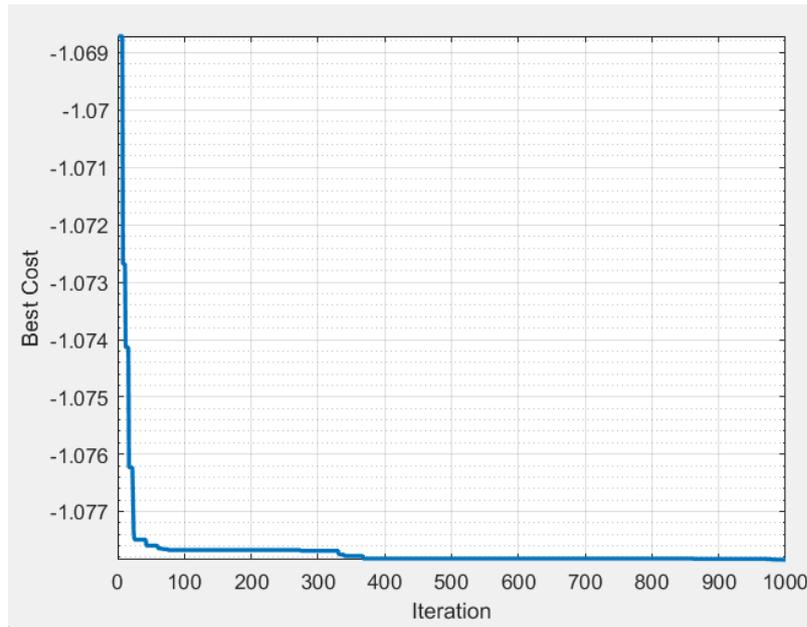
Setelah mendapatkan jaringan *Backpropagation Neural Network* yang memiliki nilai MSE paling kecil untuk gaya potong tangensial, gaya potong normal, dan kekasaran permukaan, selanjutnya dilakukan proses optimasi dengan menggunakan algoritma *Harmony Search* untuk mendapatkan gaya potong tangensial dan gaya potong normal terkecil dengan kekasaran permukaan yang paling kecil juga. Pada proses optimasi dengan menggunakan algoritma *Harmony Search* diberikan *input* nilai secara *random* berupa parameter *input* yang dinormalisasi, yaitu rentang nilai antara -1 hingga 1 untuk semua parameter *input*. Besar nilai *input* untuk jenis *lubricant* dibatasi hanya pada nilai -1, 0, atau 1 dengan menggunakan fungsi *randi* untuk menjaga agar nilai *input* jenis *lubricant* tetap pada definisinya yaitu -1 untuk *coconut oil*, 0 untuk *SAE+graphite*, dan -1 untuk *liquid nitrogen*. Fungsi *randi* merupakan salah satu fungsi yang ada pada perangkat lunak MATLAB yang berfungsi untuk memilih angka secara acak dari *range* data yang diberikan, namun dengan catatan hanya memilih angka yang merupakan bilangan *integer* atau bilangan bulat tanpa desimal. Sedangkan, untuk ukuran grit, kecepatan makan, dan kedalaman potong menggunakan fungsi *unifrnd* untuk melakukan *random* nilai dengan rentang dari -1 hingga 1 dan bersifat *continous*. Fungsi *unifrnd* dapat memberikan nilai acak dengan desimal yang ada didalam rentang diberikan. Nilai *input* yang diberikan di algoritma *Harmony Search* selanjutnya dimasukkan kedalam persamaan yaitu tiga jaringan *Backpropagation Neural Network* untuk dilakukan perhitungan nilai *best cost*. Masing-masing jaringan *Backpropagation Neural Network* diberikan bobot yang sama yaitu sebesar sepertiga. Sehingga nilai *best cost* yang dihasilkan merupakan nilai dari persamaan berikut ini:

$$Best\ Cost = \left(\frac{1}{3} Ft\right) + \left(\frac{1}{3} Fn\right) + \left(\frac{1}{3} Ra\right) \quad (4.2)$$

dimana:

Best cost : nilai *output* / target dari gabungan parameter respon
Ft : gaya potong tangensial (N)
Fn : gaya potong normal (N)
Ra : kekasaran permukaan (μm)

Pada proses optimasi dengan algoritma *Harmony Search* secara *default* mencari nilai yang paling optimal dengan cara mencari nilai *best cost* yang paling rendah. Parameter *input* yang memiliki *best cost* paling rendah setelah 1000 kali iterasi terpilih sebagai parameter *input* yang paling optimal. Pada penelitian ini, didapatkan nilai *best cost* paling rendah yaitu sebesar -1,0778 dimana telah konvergen sejak iterasi ke - 368. Didapatkan parameter *input* dari nilai *best cost* tersebut yaitu untuk jenis *lubricant* adalah -0,1321, ukuran grit adalah 0,8438, kecepatan makan adalah 0,7361, dan kedalaman potong adalah -0,8309. Nilai *best cost* dari setiap iterasi algoritma *Harmony Search* pada penelitian ini, seperti pada gambar 4.7 dibawah ini:



Gambar 4. 7 Grafik *Best Cost* setiap Iterasi pada Algoritma *Harmony Search*

Nilai parameter *input* dan *best cost* yang didapatkan tersebut masih merupakan nilai yang dinormalisasi, sehingga untuk mendapatkan parameter *input* yang sebenarnya perlu dilakukan proses denormalisasi dengan menggunakan fungsi *reverse mapminmax*. Fungsi *reverse mapminmax* memiliki tujuan untuk mengembalikan nilai yang telah dinormalisasi sebelumnya menjadi nilai awal dengan rentang yang sesuai dengan rentang awal. Fungsi tersebut menggunakan prinsip seperti pada persamaan berikut:

$$x_i = \frac{x_j - \text{newmin}_a}{\text{newmax}_a - \text{newmin}_a} \times (\text{max}_a - \text{min}_a) + \text{min}_a \quad (4.3)$$

dimana:

- x_j : nilai x hasil normalisasi
- x_i : nilai x aktual
- min_a : nilai minimum dari keseluruhan data aktual
- max_a : nilai maksimum dari keseluruhan data aktual
- newmin_a : nilai minimum dari rentang normalisasi
- newmax_a : nilai maksimum dari rentang normalisasi

Berikut ini adalah langkah perhitungan untuk mendapatkan nilai parameter *input* aktual dan *output* aktual yang optimal:

- **Parameter Input**

Proses optimasi dengan algoritma *Harmony Search* memberikan parameter *input* yang optimal. Parameter *input* tersebut yaitu:

1. **Jenis Lubricant**

Hasil dari proses optimasi dengan algoritma *Harmony Search* didapatkan nilai jenis *lubricant* yaitu sebesar -0,1321. Pada parameter jenis *lubricant*, nilai minimum dari normalisasi yaitu -1 dengan nilai aktual -1 dan nilai maksimum dari normalisasi yaitu 1 dengan nilai aktual 1. Nilai-nilai tersebut disubstitusikan pada persamaan 4.3 sehingga diperoleh parameter input yang optimal untuk jenis *lubricant* yaitu:

$$x_i = \frac{-0,1321 - (-1)}{1 - (-1)} \times (1 - (-1)) + (-1)$$

$$x_i = \frac{0,8679}{2} \times 2 + (-1)$$

$$x_i = -0,1321$$

2. Ukuran Grit

Hasil dari proses optimasi dengan algoritma *Harmony Search* didapatkan ukuran grit yaitu sebesar 0,8438. Pada parameter ukuran grit, nilai minimum dari normalisasi yaitu -1 dengan nilai aktual 60 dan nilai maksimum dari normalisasi yaitu 1 dengan nilai aktual 220. Nilai-nilai tersebut disubstitusikan pada persamaan 4.3 sehingga diperoleh parameter input yang optimal untuk ukuran grit yaitu:

$$x_i = \frac{0,8438 - (-1)}{1 - (-1)} \times (220 - 60) + (60)$$

$$x_i = \frac{1,8438}{2} \times 160 + 60$$

$$x_i = 207,504$$

3. Kecepatan Makan

Hasil dari proses optimasi dengan algoritma *Harmony Search* didapatkan kecepatan makan yaitu sebesar 0,736 . Pada parameter kecepatan makan, nilai minimum dari normalisasi yaitu -1 dengan nilai aktual 8 dan nilai maksimum dari normalisasi yaitu 1 dengan nilai aktual 12. Nilai-nilai tersebut disubstitusikan pada persamaan 4.3 sehingga diperoleh parameter input yang optimal untuk kecepatan makan yaitu:

$$x_i = \frac{0,736 - (-1)}{1 - (-1)} \times (12 - 8) + (8)$$

$$x_i = \frac{1,736}{2} \times 4 + 8$$

$$x_i = 11,472$$

4. Kedalaman Potong

Hasil dari proses optimasi dengan algoritma *Harmony Search* didapatkan kedalaman potong yaitu sebesar -0,8309. Pada parameter kedalaman potong, nilai minimum dari normalisasi yaitu -1 dengan nilai aktual 0,05 dan nilai maksimum dari normalisasi yaitu 1 dengan nilai aktual 0,15. Nilai-nilai tersebut disubstitusikan pada persamaan 4.3 sehingga diperoleh parameter input yang optimal untuk kedalaman potong yaitu:

$$x_i = \frac{(-0,8309) - (-1)}{1 - (-1)} \times (0,15 - 0,05) + (0,05)$$

$$x_i = \frac{0,1691}{2} \times 0,10 + 0,05$$

$$x_i = 0,0585$$

- **Parameter Output / Target**

Setelah mendapatkan parameter *input* dari proses optimasi dengan algoritma *Harmony Search*, maka parameter tersebut dimasukkan kembali kepada jaringan *Backpropagation Neural Network* sesuai dengan jenis parameter *output*-nya untuk

mendapatkan nilai dari masing-masing parameter *output*. Nilai yang didapatkan tersebut masih merupakan nilai yang dinormalisasi, sehingga nilai aktual dari parameter *input* yang optimal berdasarkan algoritma *Harmony Search* yaitu:

1. Gaya Potong Tangensial

Hasil dari parameter *input* optimal dengan algoritma *Harmony Search* didapatkan gaya potong tangensial yaitu sebesar -1,3605. Pada parameter gaya potong tangensial, nilai minimum dari normalisasi yaitu -1 dengan nilai aktual 64,7 dan nilai maksimum dari normalisasi yaitu 1 dengan nilai aktual 71,9. Nilai-nilai tersebut disubstitusikan pada persamaan 4.3 sehingga diperoleh hasil gaya potong tangensial yaitu sebesar:

$$x_i = \frac{(-1,3605) - (-1)}{1 - (-1)} \times (71,9 - 64,7) + (64,7)$$

$$x_i = \frac{-0,3605}{2} \times 7,2 + 64,7$$

$$x_i = 63,4023$$

2. Gaya Potong Normal

Hasil dari parameter *input* optimal dengan algoritma *Harmony Search* didapatkan gaya potong normal yaitu sebesar -0,8984. Pada parameter gaya potong normal, nilai minimum dari normalisasi yaitu -1 dengan nilai aktual 109 dan nilai maksimum dari normalisasi yaitu 1 dengan nilai aktual 214. Nilai-nilai tersebut disubstitusikan pada persamaan 4.3 sehingga diperoleh hasil gaya potong normal yaitu sebesar:

$$x_i = \frac{(-0,8984) - (-1)}{1 - (-1)} \times (214 - 109) + (109)$$

$$x_i = \frac{0,1016}{2} \times 105 + 109$$

$$x_i = 114,3317$$

3. Kekasaran Permukaan

Hasil dari parameter *input* optimal dengan algoritma *Harmony Search* didapatkan kekasaran permukaan yaitu sebesar -0,9746. Pada parameter gaya potong normal, nilai minimum dari normalisasi yaitu -1 dengan nilai aktual 0,16 dan nilai maksimum dari normalisasi yaitu 1 dengan nilai aktual 1,5. Nilai-nilai tersebut disubstitusikan pada persamaan 4.3 sehingga diperoleh hasil kekasaran permukaan yaitu sebesar:

$$x_i = \frac{(-0,9746) - (-1)}{1 - (-1)} \times (1,5 - 0,16) + (0,16)$$

$$x_i = \frac{0,0256}{2} \times 1,34 + 0,16$$

$$x_i = 0,177$$

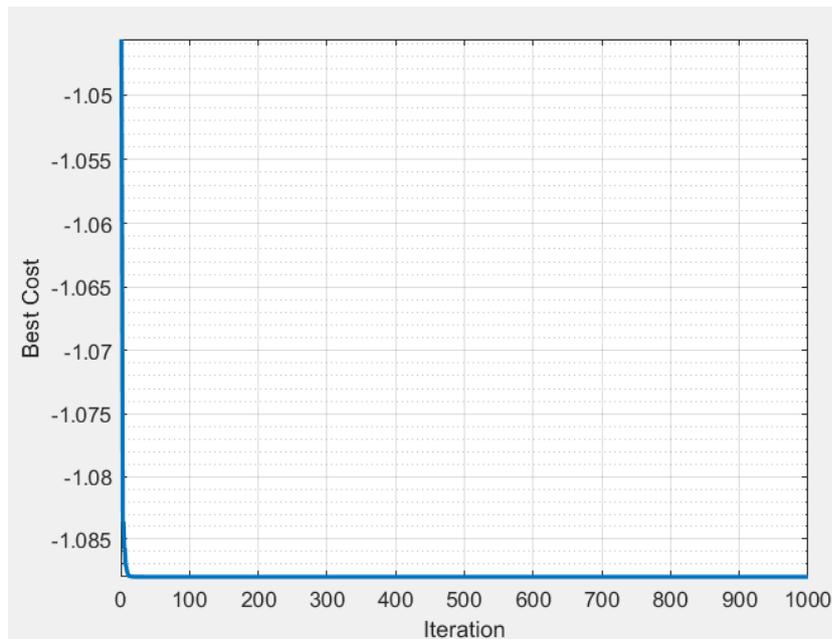
Sehingga, dari proses optimasi dengan menggunakan algoritma *Harmony Search*, menghasilkan parameter input yang paling optimal untuk mendapatkan gaya potong tangensial dan normal terkecil dengan kekasaran permukaan terkecil yaitu jenis *lubricant* sebesar -0,1321, dengan ukuran grit sebesar 207,504, serta kecepatan makan sebesar 11,472 m/min, dan kedalaman potong sebesar 0,0585 mm. Parameter input tersebut memberikan respon gaya

potong tangensial sebesar 63,4023 N, gaya potong normal sebesar 114,3317 N, dan kekasaran permukaan sebesar 0,177 μm .

4.4. Hasil Optimasi dengan Metode *Ant Colony Optimization*

Proses optimasi dengan menggunakan algoritma *Ant Colony Optimization* pada dasarnya memiliki langkah-langkah dasar yang serupa dengan algoritma *Harmony Search*. Nilai *input* yang diberikan untuk algoritma *Ant Colony Optimization* menggunakan rentang nilai yang dinormalisasi yaitu -1 hingga 1 baik untuk jenis *lubricant*, ukuran grit, kecepatan makan, maupun kedalaman potong. Untuk jenis *lubricant*, nilai yang digunakan untuk mewakili jenis *lubricant* yaitu nilai -1 untuk *coconut oil*, nilai 0 untuk *SAE+graphite*, dan nilai 1 untuk *liquid nitrogen*. Proses inisiasi awal untuk menghasilkan populasi dilakukan secara *random* dengan fungsi randi untuk jenis *lubricant* dan *unifrnd* untuk ukuran grit, kecepatan makan, dan kedalaman potong. Jaringan dari *Backpropagation Neural Network* yang sudah didapatkan sebelumnya, sama seperti pada algoritma *Harmony Search*, digunakan sebagai persamaan untuk menghasilkan nilai output atau respon. Persamaan pada algoritma *Ant Colony Optimization* ini terdiri menjadi tiga jaringan *Backpropagation Neural Network* yaitu jaringan gaya potong tangensial, jaringan untuk gaya potong normal, dan jaringan untuk kekasaran permukaan. Masing-masing jaringan tersebut diberikan bobot yang sama besar, seperti pada persamaan 4.2 diatas.

Pada proses optimasi dengan algoritma *Ant Colony Optimization* secara *default* mencari nilai yang paling optimal dengan cara mencari nilai *best cost* yang paling rendah. Parameter *input* yang memiliki *best cost* paling rendah setelah 1000 kali iterasi terpilih sebagai parameter *input* yang paling optimal. Pada penelitian ini, didapatkan nilai *best cost* paling rendah yaitu sebesar -1,0881 dimana telah konvergen sejak iterasi ke - 56. Didapatkan parameter *input* dari nilai *best cost* tersebut yaitu untuk jenis *lubricant* adalah 0,482, ukuran grit adalah 1, kecepatan makan adalah -0,796, dan kedalaman potong adalah -1. Nilai *best cost* dari setiap iterasi algoritma *Ant Colony Optimization* pada penelitian ini, seperti pada gambar 4.8 dibawah ini:



Gambar 4. 8 Grafik *Best Cost* setiap Iterasi pada Algoritma *Ant Colony Optimization*

Nilai parameter *input* dan *best cost* yang didapatkan tersebut masih merupakan nilai yang dinormalisasi, sehingga untuk mendapatkan parameter *input* yang sebenarnya perlu dilakukan proses denormalisasi dengan menggunakan fungsi *reverse mapminmax*. Fungsi *reverse mapminmax* memiliki tujuan untuk mengembalikan nilai yang telah dinormalisasi sebelumnya menjadi nilai awal dengan rentang yang sesuai dengan rentang awal. Fungsi tersebut menggunakan prinsip seperti pada persamaan 4.3. Berikut ini adalah langkah perhitungan untuk mendapatkan nilai parameter *input* aktual dan *output* aktual yang optimal:

- **Parameter Input**

Proses optimasi dengan algoritma *Ant Colony Optimization* memberikan parameter *input* yang optimal. Parameter *input* tersebut yaitu:

1. **Jenis Lubricant**

Hasil dari proses optimasi dengan algoritma *Ant Colony Optimization* didapatkan nilai jenis *lubricant* yaitu sebesar 0,482. Pada parameter jenis *lubricant*, nilai minimum dari normalisasi yaitu -1 dengan nilai aktual -1 dan nilai maksimum dari normalisasi yaitu 1 dengan nilai aktual 1. Nilai-nilai tersebut disubstitusikan pada persamaan 4.3 sehingga diperoleh parameter input yang optimal untuk jenis *lubricant* yaitu:

$$x_i = \frac{0,482 - (-1)}{1 - (-1)} \times (1 - (-1)) + (-1)$$

$$x_i = \frac{1,482}{2} \times 2 + (-1)$$

$$x_i = 0,482$$

2. **Ukuran Grit**

Hasil dari proses optimasi dengan algoritma *Ant Colony Optimization* didapatkan ukuran grit yaitu sebesar 1. Pada parameter ukuran grit, nilai minimum dari normalisasi yaitu -1 dengan nilai aktual 60 dan nilai maksimum dari normalisasi yaitu 1 dengan nilai aktual 220. Nilai-nilai tersebut disubstitusikan pada persamaan 4.3 sehingga diperoleh parameter input yang optimal untuk ukuran grit yaitu:

$$x_i = \frac{1 - (-1)}{1 - (-1)} \times (220 - 60) + (60)$$

$$x_i = \frac{2}{2} \times 160 + 60$$

$$x_i = 220$$

3. **Kecepatan Makan**

Hasil dari proses optimasi dengan algoritma *Ant Colony Optimization* didapatkan kecepatan makan yaitu sebesar -0,796. Pada parameter kecepatan makan, nilai minimum dari normalisasi yaitu -1 dengan nilai aktual 8 dan nilai maksimum dari normalisasi yaitu 1 dengan nilai aktual 12. Nilai-nilai tersebut disubstitusikan pada persamaan 4.3 sehingga diperoleh parameter input yang optimal untuk kecepatan makan yaitu:

$$x_i = \frac{-0,796 - (-1)}{1 - (-1)} \times (12 - 8) + (8)$$

$$x_i = \frac{0,204}{2} \times 4 + 8$$

$$x_i = 8,408$$

4. Kedalaman Potong

Hasil dari proses optimasi dengan algoritma *Ant Colony Optimization* didapatkan kedalaman potong yaitu sebesar -1. Pada parameter kedalaman potong, nilai minimum dari normalisasi yaitu -1 dengan nilai aktual 0,05 dan nilai maksimum dari normalisasi yaitu 1 dengan nilai aktual 0,15. Nilai-nilai tersebut disubstitusikan pada persamaan 4.3 sehingga diperoleh parameter input yang optimal untuk kedalaman potong yaitu:

$$x_i = \frac{(-1) - (-1)}{1 - (-1)} \times (0,15 - 0,05) + (0,05)$$
$$x_i = \frac{2}{2} \times 0,10 + 0,05$$
$$x_i = 0,05$$

- **Parameter Output / Target**

Setelah mendapatkan parameter *input* dari proses optimasi dengan algoritma *Ant Colony Optimization*, maka parameter tersebut dimasukkan kembali kepada jaringan *Backpropagation Neural Network* sesuai dengan jenis parameter *output*-nya untuk mendapatkan nilai dari masing-masing parameter *output*. Nilai yang didapatkan tersebut masih merupakan nilai yang dinormalisasi, sehingga nilai aktual dari parameter *input* yang optimal berdasarkan algoritma *Ant Colony Optimization* yaitu:

1. Gaya Potong Tangensial

Hasil dari parameter *input* optimal dengan algoritma *Ant Colony Optimization* didapatkan gaya potong tangensial yaitu sebesar -1,4091. Pada parameter gaya potong tangensial, nilai minimum dari normalisasi yaitu -1 dengan nilai aktual 64,7 dan nilai maksimum dari normalisasi yaitu 1 dengan nilai aktual 71,9. Nilai-nilai tersebut disubstitusikan pada persamaan 4.3 sehingga diperoleh hasil gaya potong tangensial yaitu sebesar:

$$x_i = \frac{(-1,4091) - (-1)}{1 - (-1)} \times (71,9 - 64,7) + (64,7)$$
$$x_i = \frac{-0,4091}{2} \times 7,2 + 64,7$$
$$x_i = 63,2274$$

2. Gaya Potong Normal

Hasil dari parameter *input* optimal dengan algoritma *Ant Colony Optimization* didapatkan gaya potong normal yaitu sebesar -0,9364. Pada parameter gaya potong normal, nilai minimum dari normalisasi yaitu -1 dengan nilai aktual 109 dan nilai maksimum dari normalisasi yaitu 1 dengan nilai aktual 214. Nilai-nilai tersebut disubstitusikan pada persamaan 4.3 sehingga diperoleh hasil gaya potong normal yaitu sebesar:

$$x_i = \frac{(-0,9364) - (-1)}{1 - (-1)} \times (214 - 109) + (109)$$
$$x_i = \frac{0,0636}{2} \times 105 + 109$$
$$x_i = 112,3383$$

3. Kekasaran Permukaan

Hasil dari parameter *input* optimal dengan algoritma *Ant Colony Optimization* didapatkan kekasaran permukaan yaitu sebesar -0,9185 . Pada parameter gaya potong normal, nilai minimum dari normalisasi yaitu -1 dengan nilai aktual 0,16 dan nilai maksimum dari normalisasi yaitu 1 dengan nilai aktual 1,5. Nilai-nilai tersebut disubstitusikan pada persamaan 4.3 sehingga diperoleh hasil kekasaran permukaan yaitu sebesar:

$$x_i = \frac{(-0,9185) - (-1)}{1 - (-1)} \times (1,5 - 0,16) + (0,16)$$
$$x_i = \frac{0,0815}{2} \times 1,34 + 0,16$$
$$x_i = 0,2146$$

Proses optimasi dengan algoritma *Ant Colony Optimization*, menghasilkan parameter input yang paling optimal untuk mendapatkan gaya potong tangensial dan normal terkecil dengan kekasaran permukaan terkecil yaitu jenis *lubricant* sebesar 0,482, dengan ukuran grit sebesar 220, serta kecepatan makan sebesar 8,408 m/min, dan kedalaman potong sebesar 0,05 mm. Parameter input tersebut memberikan respon gaya potong tangensial sebesar 63,2274 N, gaya potong normal sebesar 112,3383 N, dan kekasaran permukaan sebesar 0,2146 μm .

4.5. Penentuan Parameter *Input Real*

Pada penelitian ini terdapat 3 jenis *lubricant* yang digunakan, yaitu *coconut oil*, *SAE+Graphite*, dan *liquid nitrogen*. Parameter jenis *lubricant* ini diasumsikan dengan nilai -1, 0, dan 1 untuk dapat dilakukan proses optimasi dengan algoritma *Harmony Search* maupun *Ant Colony Optimization*. Karena nilai yang dihasilkan dari proses optimasi dapat berupa bilangan desimal, maka perlu dilakukan pembulatan supaya dapat diperoleh jenis *lubricant* yang sesuai. Ketika dilakukan pembulatan pada jenis *lubricant*, maka perlu dilakukan proses optimasi ulang, untuk menyesuaikan nilai dari parameter-parameter lainnya.

Selain jenis *lubricant*, ukuran grit juga merupakan salah satu parameter yang perlu dilakukan pembulatan. Ada beberapa ukuran dari grit *grinding wheel*, namun ukuran grit tidak bisa bersifat kontinyu karena tidak semua nilai ada pada standar ISO 525-1999. Oleh karena itu, berdasarkan hasil optimasi dari parameter *input* proses gerinda permukaan untuk *Superalloy Inconel 718*, baik dari algoritma *Harmony Search* maupun *Ant Colony Optimization*, dilakukan penyesuaian terhadap standar ISO 515-1999 untuk ukuran grit tersebut. Ukuran grit yang didapatkan dari proses optimasi digunakan sebagai acuan untuk mendapatkan ukuran grit terdekat yang ada pada standar ISO 515-1999. Setelah didapatkan ukuran grit terdekat dengan hasil optimasi, maka dilakukan proses optimasi kembali, baik dengan menggunakan metode algoritma *Harmony Search* maupun algoritma *Ant Colony Optimization*, namun pada parameter *input* dari jenis *lubricant* dan ukuran grit ditetapkan sebesar hasil pembulatan dari jenis *lubricant* dan ukuran grit terdekat yang sesuai dengan standar ISO 515-1999.

Untuk kecepatan makan dan kedalaman potong, pada penelitian ini diasumsikan menggunakan mesin CNC untuk melakukan proses gerinda permukaan. Dengan mengacu pada spesifikasi mesin CNC dengan merek HAAS Model VF-3, maka dapat dipilih kecepatan makan hingga ketelitian mencapai 0,01 m/min dan kedalaman potong hingga ketelitian mencapai 0,01 mm. Sehingga, nilai parameter *input real* yang diperoleh dari proses optimasi adalah sebagai berikut:

- **Algoritma *Harmony Search***

Hasil optimasi parameter *input* jenis *lubricant* dari algoritma *Harmony Search* adalah sebesar -0,1321, sehingga apabila dibulatkan ke bilangan bulat terdekat adalah menjadi 0. Selanjutnya, untuk parameter *input* ukuran grit dari algoritma *Harmony Search* adalah 207,504, sehingga apabila mengacu pada standar ISO 515-1999, maka ukuran grit terdekat yang ada pada standar tersebut adalah sebesar 220. Dengan menggunakan jenis *lubricant* adalah 0 dan ukuran grit 220 pada algoritma *Harmony Search*, maka didapatkan parameter *input* yang paling optimal yaitu dengan menggunakan jenis *lubricant* SAE+Graphite, dengan ukuran grit sebesar 220, serta kecepatan makan sebesar 11,50 m/min, dan kedalaman potong sebesar 0,05 mm. Parameter *input* tersebut menghasilkan gaya potong tangensial sebesar 63,6724 N, gaya potong normal sebesar 112,5939 N, dan kekasaran permukaan sebesar 0,1723 μm .

- **Algoritma *Ant Colony Optimization***

Hasil optimasi parameter *input* jenis *lubricant* dari algoritma *Ant Colony Optimization* adalah sebesar 0,482, sehingga apabila dibulatkan ke bilangan bulat terdekat adalah menjadi 0. Selanjutnya, untuk parameter *input* ukuran grit dari algoritma *Ant Colony Optimization* adalah 220, sehingga apabila mengacu pada standar ISO 515-1999, maka ukuran grit sudah sesuai dengan standar ISO 515-1999. Sehingga, dengan menggunakan jenis *lubricant* yaitu 0 dan ukuran grit 220 pada algoritma *Ant Colony Optimization*, maka didapatkan parameter *input* yang paling optimal yaitu dengan menggunakan jenis *lubricant* SAE+Graphite, dengan ukuran grit sebesar 220, serta kecepatan makan sebesar 11,50 m/min, dan kedalaman potong sebesar 0,05 mm. Parameter *input* tersebut menghasilkan gaya potong tangensial sebesar 63,6724 N, gaya potong normal sebesar 112,5939 N, dan kekasaran permukaan sebesar 0,1723 μm .

4.6. Perbandingan Hasil Optimasi dengan Metode *Harmony Search* dan *Ant Colony Optimization*

Berdasarkan hasil optimasi untuk parameter *input* dari proses gerinda permukaan pada *Superalloy Inconel 718* untuk mendapatkan gaya potong tangensial dan gaya potong normal terkecil dengan kekasaran permukaan terhalus dengan menggunakan metode *Harmony Search* dan *Ant Colony Optimization* didapatkan parameter *input* yang sama untuk kedua metode algoritma proses optimasi tersebut. Parameter *output* yaitu gaya potong tangensial, gaya potong normal, dan kekasaran permukaan yang dihasilkan dari parameter *input* yang telah didapatkan dari metode algoritma *Harmony Search* dan *Ant Colony Optimization* juga memiliki nilai yang sama untuk ketiga parameter *output* tersebut. Perbandingan hasil optimasi dengan metode *Harmony Search* (HS) dan *Ant Colony Optimization* (ACO) seperti pada tabel 4.4 dibawah:

Tabel 4. 4 Hasil Optimasi dengan Metode *Harmony Search* dan *Ant Colony Optimization*

Metode	Jenis <i>Lubricant</i>	Ukuran Grit	Kecepatan Makan (m/min)	Kedalaman Potong (mm)	Gaya Tangensial (N)	Gaya Normal (N)	Kekasaran Permukaan (μm)
HS	SAE + Graphite	220	11,50	0,05	63,6724	112,5939	0,1723
ACO	SAE + Graphite	220	11,50	0,05	63,6724	112,5939	0,1723

Perbedaan yang terjadi diantara kedua metode yaitu *Harmony Search* dan *Ant Colony Optimization* terletak pada waktu komputasi dan jumlah iterasi ketika konvergen. Proses optimasi dengan menggunakan algoritma *Harmony Search* memiliki waktu komputasi yang

lebih cepat dibandingkan algoritma *Ant Colony Optimization* nilai yang dihasilkan sama. Namun, untuk mencapai konvergen dibutuhkan jumlah iterasi yang lebih banyak untuk algoritma *Harmony Search* yaitu pada iterasi ke – 368, sedangkan untuk algoritma *Ant Colony Optimization* mulai konvergen pada iterasi ke -12. Berdasarkan hasil perbandingan pada penelitian ini, algoritma *Harmony Search* akan lebih baik jika digunakan untuk melakukan pencarian nilai optimal dengan variabel dan jumlah data yang banyak karena waktu komputasi yang dibutuhkan akan lebih cepat jika dibandingkan algoritma *Ant Colony Optimization*. Namun, jika variabel dan jumlah data yang akan diolah memiliki jumlah yang sedikit, maka algoritma *Ant Colony Optimization* akan lebih baik digunakan, karena tidak membutuhkan iterasi yang terlalu banyak untuk mencapai konvergen. Hasil perbandingan antara waktu komputasi dengan banyaknya iterasi untuk mencapai konvergen pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 4.5 dibawah ini:

Tabel 4. 5 Perbedaan Performa Metode *Harmony Search* dan *Ant Colony Optimization*

Metode	<i>Best Cost</i>	Konvergen Iterasi Ke-	Waktu (s)
HS	-1,0778	368	460
ACO	-1,0881	56	953

4.7. Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Pada penelitian yang berjudul “*Effect of Cooling Environment on Grinding Performance of Nickel Based Superalloy Inconel 718*” oleh Sandeep Huddedar, Pankaj Chitalkar, Arvind Chavan dan Raju S. Pawede. pada tahun 2012, telah dilakukan proses pencarian nilai optimum dengan menggunakan metode *taguchi*. Namun, pencarian nilai optimum dilakukan untuk masing-masing parameter output secara individu, sehingga pada penelitian tersebut diperoleh parameter *input* yang optimal untuk mendapatkan gaya potong tangensial, parameter *input* yang optimal untuk mendapatkan gaya potong normal, dan parameter *input* yang optimal untuk mendapatkan kekasaran permukaan. Untuk dapat membandingkan metode optimasi yang digunakan pada penelitian saat ini, yaitu *Harmony Search* dan *Ant Colony Optimization* dengan metode optimasi pada penelitian terdahulu, yaitu *Taguchi*, maka dilakukan proses optimasi secara individu untuk masing-masing parameter *output*, seperti yang telah dilakukan pada penelitian terdahulu. Berikut ini adalah hasil optimasi secara individu untuk gaya potong tangensial, gaya potong normal, dan kekasaran permukaan:

4.7.1. Metode *Harmony Search*

Berikut ini adalah hasil proses optimasi secara individu untuk gaya potong tangensial, gaya potong normal, dan keasaran permukaan dengan menggunakan metode optimasi *Harmony Search* dengan penelitian terdahulu:

- **Gaya Potong Tangensial**

Untuk mendapatkan parameter *input* yang menghasilkan gaya potong tangensial yang optimal, maka digunakan jaringan *Backpropagation Neural Network* dari gaya potong tangensial dengan MSE 0,0072. Dari metode ini didapatkan parameter *input* yaitu untuk jenis *lubricant* adalah 0,941, ukuran grit adalah 0,697, kecepatan makan adalah -0,675, dan kedalaman potong adalah -1. Selanjutnya, parameter *input* tersebut masih perlu dilakukan denormalisasi seperti pada persamaan 4.3, sehingga dihasilkan parameter *input* yaitu untuk jenis *lubricant* dibulatkan menjadi 1 yaitu *liquid nitrogen*, ukuran grit adalah 195,76, kecepatan makan adalah

8,65 m/min, dan kedalaman potong adalah 0,05 mm. Karena ukuran grit 195,76 berdasarkan standar ISO 515-1999 tidak ada, maka dilakukan proses optimasi kembali dengan menggunakan ukuran grit sebesar 180. Sehingga diperoleh parameter *input* yang optimal untuk gaya potong tangensial dengan menggunakan metode *Harmony Search* adalah jenis *lubricant* adalah *liquid nitrogen*, ukuran grit adalah 180, kecepatan makan adalah 9,87 m/min, dan kedalaman potong adalah 0,06 mm. Dengan parameter *input* tersebut, maka diperoleh gaya potong tangensial sebesar 63,6523 N.

- **Gaya Potong Normal**

Untuk mendapatkan parameter *input* yang menghasilkan gaya potong normal yang optimal, maka digunakan jaringan *Backpropagation Neural Network* dari gaya potong normal dengan MSE 0,0016. Dari metode ini didapatkan parameter *input* yaitu untuk jenis *lubricant* adalah 1, ukuran grit adalah 0,342, kecepatan makan adalah -0,583, dan kedalaman potong adalah 1. Selanjutnya, parameter *input* tersebut masih perlu dilakukan denormalisasi seperti pada persamaan 4.3, sehingga dihasilkan parameter *input* yaitu untuk jenis *lubricant* adalah *liquid nitrogen*, ukuran grit adalah 167,36, kecepatan makan adalah 8,834 m/min, dan kedalaman potong adalah 0,15 mm. Karena ukuran grit 167,36 berdasarkan standar ISO 515-1999 tidak ada, maka dilakukan proses optimasi kembali dengan menggunakan ukuran grit sebesar 180. Sehingga diperoleh parameter *input* yang optimal untuk gaya potong normal dengan menggunakan metode *Harmony Search* adalah jenis *lubricant* adalah *liquid nitrogen*, ukuran grit adalah 180, kecepatan makan adalah 9,37 m/min, dan kedalaman potong adalah 0,15 mm. Dengan parameter *input* tersebut, maka diperoleh gaya potong normal sebesar 108,546 N.

- **Kekasaran Permukaan**

Untuk mendapatkan parameter *input* yang menghasilkan kekasaran permukaan yang optimal, maka digunakan jaringan *Backpropagation Neural Network* dari kekasaran permukaan dengan MSE 0,0004. Dari metode ini didapatkan parameter *input* yaitu untuk jenis *lubricant* adalah -1, ukuran grit adalah 1, kecepatan makan adalah 0,55, dan kedalaman potong adalah -0,927. Selanjutnya, parameter *input* tersebut masih perlu dilakukan denormalisasi seperti pada persamaan 4.3, sehingga dihasilkan parameter *input* yaitu untuk jenis *lubricant* adalah *coconut oil*, ukuran grit adalah 220, kecepatan makan adalah 11,10 m/min, dan kedalaman potong adalah 0,05 mm. Dengan parameter *input* tersebut, maka diperoleh kekasaran permukaan sebesar 0,155 μm .

4.7.2. Metode *Ant Colony Optimization*

Berikut ini adalah hasil proses optimasi secara individu untuk gaya potong tangensial, gaya potong normal, dan kekasaran permukaan dengan menggunakan metode optimasi *Ant Colony Optimization* dengan penelitian terdahulu:

- **Gaya Potong Tangensial**

Untuk mendapatkan parameter *input* yang menghasilkan gaya potong tangensial yang optimal, maka digunakan jaringan *Backpropagation*

Neural Network dari gaya potong tangensial dengan MSE 0,0072. Dari metode ini didapatkan parameter *input* yaitu untuk jenis *lubricant* adalah 0,924, ukuran grit adalah 0,695, kecepatan makan adalah -0,663, dan kedalaman potong adalah -1. Selanjutnya, parameter *input* tersebut masih perlu dilakukan denormalisasi seperti pada persamaan 4.3, sehingga dihasilkan parameter *input* yaitu untuk jenis *lubricant* dibulatkan menjadi 1 yaitu *liquid nitrogen*, ukuran grit adalah 195,6, kecepatan makan adalah 8,674 m/min, dan kedalaman potong adalah 0.05 mm. Karena ukuran grit 195,6 berdasarkan standar ISO 515-1999 tidak ada, maka dilakukan proses optimasi kembali dengan menggunakan ukuran grit sebesar 180. Sehingga diperoleh parameter *input* yang optimal untuk gaya potong tangensial dengan menggunakan metode *Ant Colony Optimization* adalah jenis *lubricant* adalah *liquid nitrogen*, ukuran grit adalah 180, kecepatan makan adalah 9,88 m/min, dan kedalaman potong adalah 0,06 mm. Dengan parameter *input* tersebut, maka diperoleh gaya potong tangensial sebesar 63,6523 N.

- **Gaya Potong Normal**

Untuk mendapatkan parameter *input* yang menghasilkan gaya potong normal yang optimal, maka digunakan jaringan *Backpropagation Neural Network* dari gaya potong normal dengan MSE 0,0016. Dari metode ini didapatkan parameter *input* yaitu untuk jenis *lubricant* adalah 1, ukuran grit adalah 0,341, kecepatan makan adalah -0,584, dan kedalaman potong adalah 1. Selanjutnya, parameter *input* tersebut masih perlu dilakukan denormalisasi seperti pada persamaan 4.3, sehingga dihasilkan parameter *input* yaitu untuk jenis *lubricant* adalah *liquid nitrogen*, ukuran grit adalah 167,28, kecepatan makan adalah 8,832 m/min, dan kedalaman potong adalah 0,15 mm. Karena ukuran grit 167,28 berdasarkan standar ISO 515-1999 tidak ada, maka dilakukan proses optimasi kembali dengan menggunakan ukuran grit sebesar 180. Sehingga diperoleh parameter *input* yang optimal untuk gaya potong normal dengan menggunakan metode *Ant Colony Optimization* adalah jenis *lubricant* adalah *liquid nitrogen*, ukuran grit adalah 180, kecepatan makan adalah 9,41 m/min, dan kedalaman potong adalah 0,15 mm. Dengan parameter *input* tersebut, maka diperoleh gaya potong normal sebesar 108,5445 N.

- **Kekasaran Permukaan**

Untuk mendapatkan parameter *input* yang menghasilkan kekasaran permukaan yang optimal, maka digunakan jaringan *Backpropagation Neural Network* dari kekasaran permukaan dengan MSE 0,0004. Dari metode ini didapatkan parameter *input* yaitu untuk jenis *lubricant* adalah -0,935, ukuran grit adalah 1, kecepatan makan adalah 0,443, dan kedalaman potong adalah -0,982. Selanjutnya, parameter *input* tersebut masih perlu dilakukan denormalisasi seperti pada persamaan 4.3, sehingga dihasilkan parameter *input* yaitu untuk jenis *lubricant* dibulatkan menjadi -1 yaitu adalah *coconut oil*, ukuran grit adalah 220, kecepatan makan adalah 10,83 m/min, dan kedalaman potong adalah 0,05 mm. Dengan parameter *input* tersebut, maka diperoleh kekasaran permukaan sebesar 0,155 N.

4.7.3. Perbandingan *Harmony Search*, *Ant Colony Optimization*, dan *Taguchi*

Hasil perbandingan proses optimasi dengan menggunakan metode *Harmony Search*, *Ant Colony Optimization*, dan *Taguchi* dapat dilihat pada tabel 4.6 dibawah ini:

Tabel 4. 6 Perbandingan Hasil Optimasi Algoritma *Harmony Search*, *Ant Colony Optimization*, dan *Taguchi*

Parameter Output	Metode	Jenis Lubricant	Ukuran Grit	Kecepatan Makan (m/min)	Kedalaman Potong (mm)	Hasil Prediksi
Gaya Potong Tangensial	HS	<i>Liquid Nitrogen</i>	180	9,87	0,06	63,6523
	ACO	<i>Liquid Nitrogen</i>	180	9,88	0,06	63,6523
	Taguchi	<i>Coconut Oil</i>	220	12	0,10	67,5
Gaya Potong Normal	HS	<i>Liquid Nitrogen</i>	180	9,37	0,15	108,546
	ACO	<i>Liquid Nitrogen</i>	180	9,41	0,15	108,5445
	Taguchi	<i>Coconut Oil</i>	60	12	0,15	120
Kekasaran Permukaan	HS	<i>Coconut Oil</i>	220	11,10	0,05	0,155
	ACO	<i>Coconut Oil</i>	220	10,83	0,05	0,155
	Taguchi	<i>Coconut Oil</i>	220	10	0,05	0,16

Pada penelitian terdahulu dengan menggunakan *taguchi*, untuk menghasilkan masing-masing gaya potong tangensial terkecil, gaya normal terkecil, dan kekasaran permukaan terkecil didapatkan parameter *input* masing-masing seperti pada tabel 4.6 dibawah. Dari perbandingan hasil optimasi dengan menggunakan algoritma *Harmony Search*, *Ant Colony Optimization*, dan *Taguchi*, didapatkan nilai gaya potong tangensial, gaya potong normal, dan kekasaran permukaan dari metode optimasi dengan algoritma *Harmony Search* dan *Ant Colony Optimization* lebih kecil dibandingkan metode optimasi *taguchi*. Hal ini disebabkan karena metode optimasi *taguchi* hanya akan mendapatkan nilai optimum dari nilai-nilai yang telah ditentukan sebagai *input* diawal. Jika nilai optimum terletak diantara nilai-nilai yang telah ditentukan sebagai *input* diawal, maka metode *taguchi* akan memiliki ketelitian yang buruk. Sedangkan metode optimasi *Harmony Search* dan *Ant Colony Optimization* merupakan metode optimasi yang bisa mencari nilai optimum diantara nilai-nilai yang telah ditentukan sebagai *input* diawal, sehingga apabila nilai optimum terletak diantara nilai-nilai yang telah ditentukan diawal maka metode ini memiliki ketelitian yang lebih baik dibandingkan metode *taguchi*.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang telah diperoleh dari penelitian yang berjudul “Optimasi *Multi-Objective* dengan Menggunakan *Backpropagation Neural Network*, *Harmony Search*, dan *Ant Colony Optimization* untuk Proses Gerinda Permukaan pada *Superalloy Inconel 718*”, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Parameter *Backpropagation Neural Network* yang menghasilkan respon prediksi gaya potong tangensial dengan MSE yang sekecil mungkin yaitu dengan menggunakan 3 *hidden layer*, dimana pada *hidden layer 1* dengan *neuron* sebanyak 7 dan fungsi aktivasi yaitu *satlins*, *hidden layer 2* dengan *neuron* sebanyak 6 dan fungsi aktivasi yaitu *satlins*, *hidden layer 3* dengan *neuron* sebanyak 8 dan fungsi aktivasi yaitu *tansig*.
2. Parameter *Backpropagation Neural Network* yang menghasilkan respon prediksi gaya potong normal dengan MSE yang sekecil mungkin yaitu dengan menggunakan 3 *hidden layer*, dimana pada *hidden layer 1* dengan *neuron* sebanyak 8 dan fungsi aktivasi yaitu *logsig*, *hidden layer 2* dengan *neuron* sebanyak 4 dan fungsi aktivasi yaitu *logsig*, *hidden layer 3* dengan *neuron* sebanyak 2 dan fungsi aktivasi yaitu *tansig*.
3. Parameter *Backpropagation Neural Network* yang menghasilkan respon prediksi kekasaran permukaan dengan MSE yang sekecil mungkin yaitu dengan menggunakan 3 *hidden layer*, dimana pada *hidden layer 1* dengan *neuron* sebanyak 8 dan fungsi aktivasi yaitu *logsig*, *hidden layer 2* dengan *neuron* sebanyak 7 dan fungsi aktivasi yaitu *satlins*, *hidden layer 3* dengan *neuron* sebanyak 3 dan fungsi aktivasi yaitu *tansig*.
4. Parameter proses gerinda permukaan untuk *Superalloy Inconel 718* yang menghasilkan gaya potong tangensial dan gaya potong normal terkecil dengan kekasaran permukaan yang terkecil menggunakan algoritma *Harmony Search* yaitu menggunakan jenis *lubricant SAE+Graphite*, dengan ukuran grit sebesar 220, serta kecepatan makan sebesar 11,50 m/min, dan kedalaman potong sebesar 0,05 mm. Parameter tersebut menghasilkan gaya potong tangensial sebesar 63,6724 N, gaya potong normal sebesar 112,5939 N, dan kekasaran permukaan sebesar 0,1723 μm .
5. Parameter proses gerinda permukaan untuk *Superalloy Inconel 718* untuk menghasilkan gaya potong tangensial dan gaya potong normal terkecil dengan kekasaran permukaan yang terkecil menggunakan algoritma *Ant Colony Optimization* yaitu menggunakan jenis *lubricant SAE+Graphite*, dengan ukuran grit sebesar 220, serta kecepatan makan sebesar 11,50 m/min, dan kedalaman potong sebesar 0,05 mm. Parameter tersebut menghasilkan gaya potong tangensial sebesar 63,6724 N, gaya potong normal sebesar 112,5939 N, dan kekasaran permukaan sebesar 0,1723 μm .
6. Proses optimasi pada penelitian ini dengan menggunakan algoritma *Harmony Search* dan *Ant Colony Optimization* memiliki hasil parameter *input* yang menghasilkan gaya potong tangensial lebih kecil, gaya potong normal lebih kecil, dan kekasaran permukaan yang lebih halus daripada penelitian terdahulu yang menggunakan metode *Taguchi*.

5.2. Saran

Setelah melakukan penelitian ini, maka terdapat beberapa saran yang dapat diberikan yaitu sebagai berikut:

1. Untuk penelitian selanjutnya, sebaiknya menggunakan jumlah data yang lebih banyak untuk proses *training* dalam *Backpropagation Neural Network*, sehingga dapat menghasilkan jaringan dengan prediksi yang lebih baik.
2. Untuk penelitian selanjutnya, dapat digunakan beberapa metode algoritma selain *Harmony Search* dan *Ant Colony Optimization* proses optimasi untuk mendapatkan perbandingan kualitas hasil optimasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. Satrevics, "Industrial Development for Manufacturing Companies," *Riga Tech. Univ.*, pp. 2029–7378, Jan. 2013.
- [2] F. Klocke, S. Barth, and P. Mattfeld, "High Performance Grinding," *Procedia CIRP*, vol. 46, pp. 266–271, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.067>.
- [3] P. Kumar, A. Kumar, and B. Singh, "Optimization of Process Parameters in Surface Grinding Using Response Surface Methodology," *Panipat Inst. Eng. Technol. Samalkha, Panipat, Haryana, India*, 2013.
- [4] N. Rajhans, S. Nagori, and O. Yadav, "Optimizations and prediction of grinding wheel wear in cylindrical grinding," *Int. J. Mech. Civil, Automob. Prod. Eng. Vol. V Issue VI June 2015 / 1 e-ISSN 2249-8303, p-ISSN 2319-2208*, Jun. 2015.
- [5] X. Z. Gao, V. Govindasamy, H. Xu, X. Wang, and K. Zenger, "Harmony Search Method: Theory and Applications," *Comput. Intell. Neurosci.*, vol. 2015, pp. 1–10, Apr. 2015, doi: 10.1155/2015/258491.
- [6] T. Liao, T. Stützle, M. A. Montes de Oca, and M. Dorigo, "A unified ant colony optimization algorithm for continuous optimization," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 234, no. 3, pp. 597–609, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.10.024>.
- [7] S. Huddedar, P. Chitalkar, A. Chavan, and R. S. Pawade, "Effect of cooling environment on grinding performance of nickel based superalloy Inconel 718," *Journal of Applied Sciences*, vol. 12, no. 10, pp. 947–954, 2012. doi: 10.3923/jas.2012.947.954.
- [8] M. R. Razfar, R. Farshbaf Zinati, and M. Haghshenas, "Optimum surface roughness prediction in face milling by using neural network and harmony search algorithm," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 52, no. 5, pp. 487–495, 2011, doi: 10.1007/s00170-010-2757-5.
- [9] O. Zarei, M. Fesanghary, B. Farshi, R. J. Saffar, and M. R. Razfar, "Optimization of multi-pass face-milling via harmony search algorithm," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 5, pp. 2386–2392, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.05.029>.
- [10] T. Rochim, *Proses Permesinan*. Bandung: Institut Teknologi Bandung, 1993.
- [11] D. Kumar, "Surface Grinding Machine: Types, Parts & Working Procedure," *Engineering Learn*, 2021. <https://engineeringlearn.com/surface-grinding-machine-types-parts-working-procedure/>
- [12] S. Malkin and C. Guo, *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives Second Edition*. New York: Industrial Press Inc., 2008.
- [13] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [14] F. Bisono, "Pengaruh Tipe Abrasif dan Parameter Proses Gerinda Terhadap Gaya Potong, Integritas Permukaan Benda Kerja (IPBK) dan Mode Pembentukan Geram (MPG) pada Proses Gerinda Permukaan Baja Perkakas SKD11," *Institusi Teknologi Sepuluh Nopember*, 2014.
- [15] M. Alberts, K. Kalaitzidou, and S. Melkote, "An investigation of graphite nanoplatelets as lubricant in grinding," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 49, no. 12, pp. 966–970, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2009.06.005>.
- [16] T. Rochim, *Proses Pemesinan*. Bandung: Institut Teknologi Bandung, 2001.
- [17] M. C. Azhar, "Analisa Kekasaran Permukaan Benda Kerja dengan Variasi Jenis Material dan Pahat Potong," *Fak. Tek. Univ. Bengkulu*, 2014.
- [18] V. Bushlya, J. Zhou, and J. E. Ståhl, "Effect of Cutting Conditions on Machinability of Superalloy Inconel 718 During High Speed Turning with Coated and Uncoated PCBN

- Tools,” *Procedia CIRP*, vol. 3, pp. 370–375, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.064>.
- [19] Amrin, “Analisa Komparasi Neural Network Backpropagation dan Multiple Linear Regression untuk Peramalan Tingkat Inflasi,” *J. Tek. Komput. AMIK BSI Jakarta*, 2016.
- [20] S. Kusumadewi, *Membangun Jaringan Syaraf Tiruan Menggunakan MATLAB & EXCELLINK*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2004.
- [21] A. Zayegh and N. Al Bassam, “Neural Network Principles and Applications,” *Middle East Coll.*, 2018.
- [22] S. Haykin, *Neural Networks and Learning Machines Third Edition*. New Jersey: Pearson Education, Inc., 2009.
- [23] R. Hidayat, “Prediksi Harga Saham Menggunakan Neural Network,” *J. Gema Aktual.*, vol. 5 No.1, 2016.
- [24] A. P. Windarto *et al.*, *Jaringan Syaraf Tiruan Algoritma Prediksi dan Implementasi*. Medan: Yayasan Kita Menulis, 2020.
- [25] A. Askarzadeh and E. Rashedi, “Harmony Search Algorithm,” in *Recent Developments in Intelligent Nature-Inspired Computing*, 2017. doi: 10.4018/978-1-5225-2322-2.ch001.
- [26] J. Han, M. Kamber, and J. Pei, “3 - Data Preprocessing,” in *The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems*, J. Han, M. Kamber, and J. B. T.-D. M. (Third E. Pei, Eds. Boston: Morgan Kaufmann, 2012, pp. 83–124. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381479-1.00003-4>.

LAMPIRAN

Lampiran 1 – Hasil Optimasi *Harmony Search* dan *Ant Colony Optimization*

Iterasi	HS	ACO	Iterasi	HS	ACO	Iterasi	HS	ACO
1	-1,0421	-1,0161	43	-1,0744	-1,0880	85	-1,0759	-1,0881
2	-1,0714	-1,0485	44	-1,0744	-1,0880	86	-1,0762	-1,0881
3	-1,0714	-1,0641	45	-1,0744	-1,0880	87	-1,0762	-1,0881
4	-1,0714	-1,0641	46	-1,0744	-1,0880	88	-1,0762	-1,0881
5	-1,0714	-1,0705	47	-1,0744	-1,0880	89	-1,0762	-1,0881
6	-1,0723	-1,0795	48	-1,0744	-1,0880	90	-1,0762	-1,0881
7	-1,0723	-1,0795	49	-1,0746	-1,0880	91	-1,0762	-1,0881
8	-1,0723	-1,0795	50	-1,0746	-1,0880	92	-1,0762	-1,0881
9	-1,0732	-1,0795	51	-1,0746	-1,0880	93	-1,0762	-1,0881
10	-1,0732	-1,0830	52	-1,0746	-1,0880	94	-1,0762	-1,0881
11	-1,0732	-1,0830	53	-1,0756	-1,0880	95	-1,0762	-1,0881
12	-1,0732	-1,0830	54	-1,0756	-1,0880	96	-1,0762	-1,0881
13	-1,0732	-1,0830	55	-1,0756	-1,0880	97	-1,0762	-1,0881
14	-1,0732	-1,0830	56	-1,0756	-1,0881	98	-1,0762	-1,0881
15	-1,0732	-1,0870	57	-1,0756	-1,0881	99	-1,0762	-1,0881
16	-1,0732	-1,0870	58	-1,0756	-1,0881	100	-1,0762	-1,0881
17	-1,0732	-1,0877	59	-1,0756	-1,0881	101	-1,0762	-1,0881
18	-1,0732	-1,0877	60	-1,0756	-1,0881	102	-1,0762	-1,0881
19	-1,0732	-1,0878	61	-1,0756	-1,0881	103	-1,0762	-1,0881
20	-1,0732	-1,0878	62	-1,0756	-1,0881	104	-1,0762	-1,0881
21	-1,0732	-1,0878	63	-1,0756	-1,0881	105	-1,0762	-1,0881
22	-1,0736	-1,0879	64	-1,0759	-1,0881	106	-1,0762	-1,0881
23	-1,0737	-1,0879	65	-1,0759	-1,0881	107	-1,0762	-1,0881
24	-1,0737	-1,0880	66	-1,0759	-1,0881	108	-1,0762	-1,0881
25	-1,0737	-1,0880	67	-1,0759	-1,0881	109	-1,0762	-1,0881
26	-1,0737	-1,0880	68	-1,0759	-1,0881	110	-1,0762	-1,0881
27	-1,0739	-1,0880	69	-1,0759	-1,0881	111	-1,0762	-1,0881
28	-1,0744	-1,0880	70	-1,0759	-1,0881	112	-1,0762	-1,0881
29	-1,0744	-1,0880	71	-1,0759	-1,0881	113	-1,0762	-1,0881
30	-1,0744	-1,0880	72	-1,0759	-1,0881	114	-1,0762	-1,0881
31	-1,0744	-1,0880	73	-1,0759	-1,0881	115	-1,0762	-1,0881
32	-1,0744	-1,0880	74	-1,0759	-1,0881	116	-1,0762	-1,0881
33	-1,0744	-1,0880	75	-1,0759	-1,0881	117	-1,0763	-1,0881
34	-1,0744	-1,0880	76	-1,0759	-1,0881	118	-1,0763	-1,0881
35	-1,0744	-1,0880	77	-1,0759	-1,0881	119	-1,0763	-1,0881
36	-1,0744	-1,0880	78	-1,0759	-1,0881	120	-1,0763	-1,0881
37	-1,0744	-1,0880	79	-1,0759	-1,0881	121	-1,0763	-1,0881
38	-1,0744	-1,0880	80	-1,0759	-1,0881	122	-1,0763	-1,0881
39	-1,0744	-1,0880	81	-1,0759	-1,0881	123	-1,0763	-1,0881
40	-1,0744	-1,0880	82	-1,0759	-1,0881	124	-1,0763	-1,0881
41	-1,0744	-1,0880	83	-1,0759	-1,0881	125	-1,0763	-1,0881
42	-1,0744	-1,0880	84	-1,0759	-1,0881	126	-1,0763	-1,0881

Iterasi	HS	ACO
127	-1,0765	-1,0881
128	-1,0765	-1,0881
129	-1,0765	-1,0881
130	-1,0765	-1,0881
131	-1,0765	-1,0881
132	-1,0769	-1,0881
133	-1,0769	-1,0881
134	-1,0769	-1,0881
135	-1,0769	-1,0881
136	-1,0769	-1,0881
137	-1,0769	-1,0881
138	-1,0769	-1,0881
139	-1,0769	-1,0881
140	-1,0769	-1,0881
141	-1,0769	-1,0881
142	-1,0769	-1,0881
143	-1,0770	-1,0881
144	-1,0770	-1,0881
145	-1,0770	-1,0881
146	-1,0770	-1,0881
147	-1,0770	-1,0881
148	-1,0770	-1,0881
149	-1,0772	-1,0881
150	-1,0772	-1,0881
151	-1,0772	-1,0881
152	-1,0772	-1,0881
153	-1,0772	-1,0881
154	-1,0772	-1,0881
155	-1,0772	-1,0881
156	-1,0772	-1,0881
157	-1,0772	-1,0881
158	-1,0772	-1,0881
159	-1,0772	-1,0881
160	-1,0772	-1,0881
161	-1,0772	-1,0881
162	-1,0772	-1,0881
163	-1,0772	-1,0881
164	-1,0772	-1,0881
165	-1,0772	-1,0881
166	-1,0772	-1,0881
167	-1,0772	-1,0881
168	-1,0772	-1,0881
169	-1,0772	-1,0881
170	-1,0772	-1,0881
171	-1,0772	-1,0881
172	-1,0772	-1,0881

Iterasi	HS	ACO
173	-1,0773	-1,0881
174	-1,0773	-1,0881
175	-1,0773	-1,0881
176	-1,0773	-1,0881
177	-1,0773	-1,0881
178	-1,0773	-1,0881
179	-1,0773	-1,0881
180	-1,0773	-1,0881
181	-1,0773	-1,0881
182	-1,0773	-1,0881
183	-1,0773	-1,0881
184	-1,0773	-1,0881
185	-1,0773	-1,0881
186	-1,0773	-1,0881
187	-1,0773	-1,0881
188	-1,0773	-1,0881
189	-1,0773	-1,0881
190	-1,0773	-1,0881
191	-1,0773	-1,0881
192	-1,0773	-1,0881
193	-1,0773	-1,0881
194	-1,0773	-1,0881
195	-1,0773	-1,0881
196	-1,0773	-1,0881
197	-1,0773	-1,0881
198	-1,0773	-1,0881
199	-1,0775	-1,0881
200	-1,0775	-1,0881
201	-1,0775	-1,0881
202	-1,0775	-1,0881
203	-1,0775	-1,0881
204	-1,0775	-1,0881
205	-1,0775	-1,0881
206	-1,0775	-1,0881
207	-1,0775	-1,0881
208	-1,0775	-1,0881
209	-1,0775	-1,0881
210	-1,0775	-1,0881
211	-1,0776	-1,0881
212	-1,0776	-1,0881
213	-1,0776	-1,0881
214	-1,0776	-1,0881
215	-1,0776	-1,0881
216	-1,0776	-1,0881
217	-1,0776	-1,0881
218	-1,0776	-1,0881

Iterasi	HS	ACO
219	-1,0776	-1,0881
220	-1,0776	-1,0881
221	-1,0777	-1,0881
222	-1,0777	-1,0881
223	-1,0777	-1,0881
224	-1,0777	-1,0881
225	-1,0777	-1,0881
226	-1,0777	-1,0881
227	-1,0777	-1,0881
228	-1,0777	-1,0881
229	-1,0777	-1,0881
230	-1,0777	-1,0881
231	-1,0777	-1,0881
232	-1,0777	-1,0881
233	-1,0777	-1,0881
234	-1,0777	-1,0881
235	-1,0777	-1,0881
236	-1,0777	-1,0881
237	-1,0777	-1,0881
238	-1,0777	-1,0881
239	-1,0777	-1,0881
240	-1,0777	-1,0881
241	-1,0777	-1,0881
242	-1,0777	-1,0881
243	-1,0777	-1,0881
244	-1,0777	-1,0881
245	-1,0777	-1,0881
246	-1,0777	-1,0881
247	-1,0777	-1,0881
248	-1,0777	-1,0881
249	-1,0777	-1,0881
250	-1,0777	-1,0881
251	-1,0777	-1,0881
252	-1,0777	-1,0881
253	-1,0777	-1,0881
254	-1,0777	-1,0881
255	-1,0777	-1,0881
256	-1,0777	-1,0881
257	-1,0777	-1,0881
258	-1,0777	-1,0881
259	-1,0777	-1,0881
260	-1,0777	-1,0881
261	-1,0777	-1,0881
262	-1,0777	-1,0881
263	-1,0777	-1,0881
264	-1,0777	-1,0881

Iterasi	HS	ACO
403	-1,0778	-1,0881
404	-1,0778	-1,0881
405	-1,0778	-1,0881
406	-1,0778	-1,0881
407	-1,0778	-1,0881
408	-1,0778	-1,0881
409	-1,0778	-1,0881
410	-1,0778	-1,0881
411	-1,0778	-1,0881
412	-1,0778	-1,0881
413	-1,0778	-1,0881
414	-1,0778	-1,0881
415	-1,0778	-1,0881
416	-1,0778	-1,0881
417	-1,0778	-1,0881
418	-1,0778	-1,0881
419	-1,0778	-1,0881
420	-1,0778	-1,0881
421	-1,0778	-1,0881
422	-1,0778	-1,0881
423	-1,0778	-1,0881
424	-1,0778	-1,0881
425	-1,0778	-1,0881
426	-1,0778	-1,0881
427	-1,0778	-1,0881
428	-1,0778	-1,0881
429	-1,0778	-1,0881
430	-1,0778	-1,0881
431	-1,0778	-1,0881
432	-1,0778	-1,0881
433	-1,0778	-1,0881
434	-1,0778	-1,0881
435	-1,0778	-1,0881
436	-1,0778	-1,0881
437	-1,0778	-1,0881
438	-1,0778	-1,0881
439	-1,0778	-1,0881
440	-1,0778	-1,0881
441	-1,0778	-1,0881
442	-1,0778	-1,0881
443	-1,0778	-1,0881
444	-1,0778	-1,0881
445	-1,0778	-1,0881
446	-1,0778	-1,0881
447	-1,0778	-1,0881
448	-1,0778	-1,0881

Iterasi	HS	ACO
449	-1,0778	-1,0881
450	-1,0778	-1,0881
451	-1,0778	-1,0881
452	-1,0778	-1,0881
453	-1,0778	-1,0881
454	-1,0778	-1,0881
455	-1,0778	-1,0881
456	-1,0778	-1,0881
457	-1,0778	-1,0881
458	-1,0778	-1,0881
459	-1,0778	-1,0881
460	-1,0778	-1,0881
461	-1,0778	-1,0881
462	-1,0778	-1,0881
463	-1,0778	-1,0881
464	-1,0778	-1,0881
465	-1,0778	-1,0881
466	-1,0778	-1,0881
467	-1,0778	-1,0881
468	-1,0778	-1,0881
469	-1,0778	-1,0881
470	-1,0778	-1,0881
471	-1,0778	-1,0881
472	-1,0778	-1,0881
473	-1,0778	-1,0881
474	-1,0778	-1,0881
475	-1,0778	-1,0881
476	-1,0778	-1,0881
477	-1,0778	-1,0881
478	-1,0778	-1,0881
479	-1,0778	-1,0881
480	-1,0778	-1,0881
481	-1,0778	-1,0881
482	-1,0778	-1,0881
483	-1,0778	-1,0881
484	-1,0778	-1,0881
485	-1,0778	-1,0881
486	-1,0778	-1,0881
487	-1,0778	-1,0881
488	-1,0778	-1,0881
489	-1,0778	-1,0881
490	-1,0778	-1,0881
491	-1,0778	-1,0881
492	-1,0778	-1,0881
493	-1,0778	-1,0881
494	-1,0778	-1,0881

Iterasi	HS	ACO
495	-1,0778	-1,0881
496	-1,0778	-1,0881
497	-1,0778	-1,0881
498	-1,0778	-1,0881
499	-1,0778	-1,0881
500	-1,0778	-1,0881
501	-1,0778	-1,0881
502	-1,0778	-1,0881
503	-1,0778	-1,0881
504	-1,0778	-1,0881
505	-1,0778	-1,0881
506	-1,0778	-1,0881
507	-1,0778	-1,0881
508	-1,0778	-1,0881
509	-1,0778	-1,0881
510	-1,0778	-1,0881
511	-1,0778	-1,0881
512	-1,0778	-1,0881
513	-1,0778	-1,0881
514	-1,0778	-1,0881
515	-1,0778	-1,0881
516	-1,0778	-1,0881
517	-1,0778	-1,0881
518	-1,0778	-1,0881
519	-1,0778	-1,0881
520	-1,0778	-1,0881
521	-1,0778	-1,0881
522	-1,0778	-1,0881
523	-1,0778	-1,0881
524	-1,0778	-1,0881
525	-1,0778	-1,0881
526	-1,0778	-1,0881
527	-1,0778	-1,0881
528	-1,0778	-1,0881
529	-1,0778	-1,0881
530	-1,0778	-1,0881
531	-1,0778	-1,0881
532	-1,0778	-1,0881
533	-1,0778	-1,0881
534	-1,0778	-1,0881
535	-1,0778	-1,0881
536	-1,0778	-1,0881
537	-1,0778	-1,0881
538	-1,0778	-1,0881
539	-1,0778	-1,0881
540	-1,0778	-1,0881

Iterasi	HS	ACO
679	-1,0778	-1,0881
680	-1,0778	-1,0881
681	-1,0778	-1,0881
682	-1,0778	-1,0881
683	-1,0778	-1,0881
684	-1,0778	-1,0881
685	-1,0778	-1,0881
686	-1,0778	-1,0881
687	-1,0778	-1,0881
688	-1,0778	-1,0881
689	-1,0778	-1,0881
690	-1,0778	-1,0881
691	-1,0778	-1,0881
692	-1,0778	-1,0881
693	-1,0778	-1,0881
694	-1,0778	-1,0881
695	-1,0778	-1,0881
696	-1,0778	-1,0881
697	-1,0778	-1,0881
698	-1,0778	-1,0881
699	-1,0778	-1,0881
700	-1,0778	-1,0881
701	-1,0778	-1,0881
702	-1,0778	-1,0881
703	-1,0778	-1,0881
704	-1,0778	-1,0881
705	-1,0778	-1,0881
706	-1,0778	-1,0881
707	-1,0778	-1,0881
708	-1,0778	-1,0881
709	-1,0778	-1,0881
710	-1,0778	-1,0881
711	-1,0778	-1,0881
712	-1,0778	-1,0881
713	-1,0778	-1,0881
714	-1,0778	-1,0881
715	-1,0778	-1,0881
716	-1,0778	-1,0881
717	-1,0778	-1,0881
718	-1,0778	-1,0881
719	-1,0778	-1,0881
720	-1,0778	-1,0881
721	-1,0778	-1,0881
722	-1,0778	-1,0881
723	-1,0778	-1,0881
724	-1,0778	-1,0881

Iterasi	HS	ACO
725	-1,0778	-1,0881
726	-1,0778	-1,0881
727	-1,0778	-1,0881
728	-1,0778	-1,0881
729	-1,0778	-1,0881
730	-1,0778	-1,0881
731	-1,0778	-1,0881
732	-1,0778	-1,0881
733	-1,0778	-1,0881
734	-1,0778	-1,0881
735	-1,0778	-1,0881
736	-1,0778	-1,0881
737	-1,0778	-1,0881
738	-1,0778	-1,0881
739	-1,0778	-1,0881
740	-1,0778	-1,0881
741	-1,0778	-1,0881
742	-1,0778	-1,0881
743	-1,0778	-1,0881
744	-1,0778	-1,0881
745	-1,0778	-1,0881
746	-1,0778	-1,0881
747	-1,0778	-1,0881
748	-1,0778	-1,0881
749	-1,0778	-1,0881
750	-1,0778	-1,0881
751	-1,0778	-1,0881
752	-1,0778	-1,0881
753	-1,0778	-1,0881
754	-1,0778	-1,0881
755	-1,0778	-1,0881
756	-1,0778	-1,0881
757	-1,0778	-1,0881
758	-1,0778	-1,0881
759	-1,0778	-1,0881
760	-1,0778	-1,0881
761	-1,0778	-1,0881
762	-1,0778	-1,0881
763	-1,0778	-1,0881
764	-1,0778	-1,0881
765	-1,0778	-1,0881
766	-1,0778	-1,0881
767	-1,0778	-1,0881
768	-1,0778	-1,0881
769	-1,0778	-1,0881
770	-1,0778	-1,0881

Iterasi	HS	ACO
771	-1,0778	-1,0881
772	-1,0778	-1,0881
773	-1,0778	-1,0881
774	-1,0778	-1,0881
775	-1,0778	-1,0881
776	-1,0778	-1,0881
777	-1,0778	-1,0881
778	-1,0778	-1,0881
779	-1,0778	-1,0881
780	-1,0778	-1,0881
781	-1,0778	-1,0881
782	-1,0778	-1,0881
783	-1,0778	-1,0881
784	-1,0778	-1,0881
785	-1,0778	-1,0881
786	-1,0778	-1,0881
787	-1,0778	-1,0881
788	-1,0778	-1,0881
789	-1,0778	-1,0881
790	-1,0778	-1,0881
791	-1,0778	-1,0881
792	-1,0778	-1,0881
793	-1,0778	-1,0881
794	-1,0778	-1,0881
795	-1,0778	-1,0881
796	-1,0778	-1,0881
797	-1,0778	-1,0881
798	-1,0778	-1,0881
799	-1,0778	-1,0881
800	-1,0778	-1,0881
801	-1,0778	-1,0881
802	-1,0778	-1,0881
803	-1,0778	-1,0881
804	-1,0778	-1,0881
805	-1,0778	-1,0881
806	-1,0778	-1,0881
807	-1,0778	-1,0881
808	-1,0778	-1,0881
809	-1,0778	-1,0881
810	-1,0778	-1,0881
811	-1,0778	-1,0881
812	-1,0778	-1,0881
813	-1,0778	-1,0881
814	-1,0778	-1,0881
815	-1,0778	-1,0881
816	-1,0778	-1,0881

Iterasi	HS	ACO
817	-1,0778	-1,0881
818	-1,0778	-1,0881
819	-1,0778	-1,0881
820	-1,0778	-1,0881
821	-1,0778	-1,0881
822	-1,0778	-1,0881
823	-1,0778	-1,0881
824	-1,0778	-1,0881
825	-1,0778	-1,0881
826	-1,0778	-1,0881
827	-1,0778	-1,0881
828	-1,0778	-1,0881
829	-1,0778	-1,0881
830	-1,0778	-1,0881
831	-1,0778	-1,0881
832	-1,0778	-1,0881
833	-1,0778	-1,0881
834	-1,0778	-1,0881
835	-1,0778	-1,0881
836	-1,0778	-1,0881
837	-1,0778	-1,0881
838	-1,0778	-1,0881
839	-1,0778	-1,0881
840	-1,0778	-1,0881
841	-1,0778	-1,0881
842	-1,0778	-1,0881
843	-1,0778	-1,0881
844	-1,0778	-1,0881
845	-1,0778	-1,0881
846	-1,0778	-1,0881
847	-1,0778	-1,0881
848	-1,0778	-1,0881
849	-1,0778	-1,0881
850	-1,0778	-1,0881
851	-1,0778	-1,0881
852	-1,0778	-1,0881
853	-1,0778	-1,0881
854	-1,0778	-1,0881
855	-1,0778	-1,0881
856	-1,0778	-1,0881
857	-1,0778	-1,0881
858	-1,0778	-1,0881
859	-1,0778	-1,0881
860	-1,0778	-1,0881
861	-1,0778	-1,0881
862	-1,0778	-1,0881

Iterasi	HS	ACO
863	-1,0778	-1,0881
864	-1,0778	-1,0881
865	-1,0778	-1,0881
866	-1,0778	-1,0881
867	-1,0778	-1,0881
868	-1,0778	-1,0881
869	-1,0778	-1,0881
870	-1,0778	-1,0881
871	-1,0778	-1,0881
872	-1,0778	-1,0881
873	-1,0778	-1,0881
874	-1,0778	-1,0881
875	-1,0778	-1,0881
876	-1,0778	-1,0881
877	-1,0778	-1,0881
878	-1,0778	-1,0881
879	-1,0778	-1,0881
880	-1,0778	-1,0881
881	-1,0778	-1,0881
882	-1,0778	-1,0881
883	-1,0778	-1,0881
884	-1,0778	-1,0881
885	-1,0778	-1,0881
886	-1,0778	-1,0881
887	-1,0778	-1,0881
888	-1,0778	-1,0881
889	-1,0778	-1,0881
890	-1,0778	-1,0881
891	-1,0778	-1,0881
892	-1,0778	-1,0881
893	-1,0778	-1,0881
894	-1,0778	-1,0881
895	-1,0778	-1,0881
896	-1,0778	-1,0881
897	-1,0778	-1,0881
898	-1,0778	-1,0881
899	-1,0778	-1,0881
900	-1,0778	-1,0881
901	-1,0778	-1,0881
902	-1,0778	-1,0881
903	-1,0778	-1,0881
904	-1,0778	-1,0881
905	-1,0778	-1,0881
906	-1,0778	-1,0881
907	-1,0778	-1,0881
908	-1,0778	-1,0881

Iterasi	HS	ACO
909	-1,0778	-1,0881
910	-1,0778	-1,0881
911	-1,0778	-1,0881
912	-1,0778	-1,0881
913	-1,0778	-1,0881
914	-1,0778	-1,0881
915	-1,0778	-1,0881
916	-1,0778	-1,0881
917	-1,0778	-1,0881
918	-1,0778	-1,0881
919	-1,0778	-1,0881
920	-1,0778	-1,0881
921	-1,0778	-1,0881
922	-1,0778	-1,0881
923	-1,0778	-1,0881
924	-1,0778	-1,0881
925	-1,0778	-1,0881
926	-1,0778	-1,0881
927	-1,0778	-1,0881
928	-1,0778	-1,0881
929	-1,0778	-1,0881
930	-1,0778	-1,0881
931	-1,0778	-1,0881
932	-1,0778	-1,0881
933	-1,0778	-1,0881
934	-1,0778	-1,0881
935	-1,0778	-1,0881
936	-1,0778	-1,0881
937	-1,0778	-1,0881
938	-1,0778	-1,0881
939	-1,0778	-1,0881
940	-1,0778	-1,0881
941	-1,0778	-1,0881
942	-1,0778	-1,0881
943	-1,0778	-1,0881
944	-1,0778	-1,0881
945	-1,0778	-1,0881
946	-1,0778	-1,0881
947	-1,0778	-1,0881
948	-1,0778	-1,0881
949	-1,0778	-1,0881
950	-1,0778	-1,0881
951	-1,0778	-1,0881
952	-1,0778	-1,0881
953	-1,0778	-1,0881
954	-1,0778	-1,0881

Iterasi	HS	ACO
955	-1,0778	-1,0881
956	-1,0778	-1,0881
957	-1,0778	-1,0881
958	-1,0778	-1,0881
959	-1,0778	-1,0881
960	-1,0778	-1,0881
961	-1,0778	-1,0881
962	-1,0778	-1,0881
963	-1,0778	-1,0881
964	-1,0778	-1,0881
965	-1,0778	-1,0881
966	-1,0778	-1,0881
967	-1,0778	-1,0881
968	-1,0778	-1,0881
969	-1,0778	-1,0881
970	-1,0778	-1,0881
971	-1,0778	-1,0881
972	-1,0778	-1,0881
973	-1,0778	-1,0881
974	-1,0778	-1,0881
975	-1,0778	-1,0881
976	-1,0778	-1,0881
977	-1,0778	-1,0881
978	-1,0778	-1,0881
979	-1,0778	-1,0881
980	-1,0778	-1,0881
981	-1,0778	-1,0881
982	-1,0778	-1,0881
983	-1,0778	-1,0881
984	-1,0778	-1,0881
985	-1,0778	-1,0881
986	-1,0778	-1,0881
987	-1,0778	-1,0881
988	-1,0778	-1,0881
989	-1,0778	-1,0881
990	-1,0778	-1,0881
991	-1,0778	-1,0881
992	-1,0778	-1,0881
993	-1,0778	-1,0881
994	-1,0778	-1,0881
995	-1,0778	-1,0881
996	-1,0778	-1,0881
997	-1,0778	-1,0881
998	-1,0778	-1,0881
999	-1,0778	-1,0881
1000	-1,0778	-1,0881

BIODATA PENULIS



David Verrel Juliano, anak pertama dari tiga bersaudara, lahir di Tulungagung, 23 Juni 2000. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Katolik Santa Maria Tulungagung, SD Katolik Santa Maria Tulungagung, SMP Negeri 1 Tulungagung, dan SMA Negeri 1 Kedungwaru, Tulungagung. Setelah lulus dari jenjang SMA pada tahun 2018, penulis mengikuti proses seleksi SNMPTN dan diterima di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis diterima di ITS pada tahun 2018 dan terdaftar dengan NRP 02111840000012.

Semasa kuliah, penulis mengambil bidang studi Rekayasa Produksi. Penulis sempat mengikuti beberapa kegiatan baik berskala departemen maupun institut. Penulis pernah mengikuti program *study excursion* yang diselenggarakan oleh ITS *International Office* pada tahun 2019 di Singapura. Selain itu, penulis juga pernah mengikuti kegiatan pengabdian masyarakat dari dosen Teknik Mesin ITS terkait proses *3D Modelling*, *3D Scanning*, dan *3D Printing*. Penulis juga pernah menjadi staf dan koordinator dalam INILHO ITS Forda Tulungagung 2020. Apabila terdapat pesan atau informasi yang ingin disampaikan kepada penulis, dapat melalui email: davidverrel@gmail.com.