

**PENGARUH BESAR ARUS LISTRIK PADA PROSES WIRE EDM
TERHADAP *PROFILE ERROR INVOLUTE* RODA GIGI LURUS**

SKRIPSI

Konsentrasi Teknik Produksi

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Disusun Oleh:

NUGROHO BAGUS P.

NIM. 0710620024-62

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2012

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH BESAR ARUS LISTRIK PADA PROSES *WIRE EDM*
TERHADAP *PROFILE ERROR INVOLUTE* RODA GIGI LURUS**

SKRIPSI

Konsentrasi Teknik Produksi

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

NUGROHO BAGUS P.

NIM. 0710620024-62

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Sugiarto, ST., MT.

NIP. 19690417 199512 1 001

Femiana Gapsari Madhi Fitri, ST., MT.

NIP. 19820704 200812 2 002

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH BESAR ARUS LISTRIK PADA PROSES WIRE EDM
TERHADAP PROFILE ERROR INVOLUTE RODA GIGI LURUS**

SKRIPSI

Konsentrasi Teknik Produksi

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun Oleh:

NUGROHO BAGUS P.

NIM. 0710620024-62

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 30 Januari 2012

MAJELIS PENGUJI

Skripsi I

Skripsi II

Putu Hadi Setyarini, ST., MT.
NIP. 19770806 200312 2 001

Dr. Eng. Lilis Yuliati, ST., MT.
NIP. 19750702 200003 2 001

Komprehensif

Purnami, ST., MT.
NIP. 19770707 200812 1 005

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT.
NIP. 19720903 199702 1 001

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada ALLAH SWT, karena atas rahmat dan hikmat-Nya skripsi ini dapat diselesaikan. Skripsi yang berjudul “Pengaruh Besar Arus Listrik Pada Proses *Wire EDM* Terhadap *Profile Error Involute* Roda Gigi Lurus” ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan ketulusan dan kerendahan hati penulis menyampaikan terima kasih kepada:

- Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
- Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, M.Sc.,CSE. selaku Ketua Konsentrasi Produksi Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
- Bapak Sugiarto, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing I dan Ibu Femiana Gapsari MF, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing II atas segala bimbingan, nasehat, pengarahan, motivasi, saran dan masukan yang telah diberikan.
- Ayahanda Eko Edy Susanto, Ibunda Rr. Ririen Tjahyaningdyah P., adik tercinta Novianingdyah Pramesti, dan seluruh keluarga besar atas segala nasehat, perhatian, kasih sayangnya, dan doa yang diberikan.
- Teman – teman seperjuangan Mesin Angkatan 2007 Brawijaya yang telah banyak membantu dalam penyusunan, penelitian, dan dukungannya.
- Senior, dan alumni serta semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan skripsi ini.

Pada akhirnya, penulis menyadari bahwa skripsi ini jauh dari sempurna. Penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Malang, Januari 2012

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
RINGKASAN	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	2
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Penelitian Sebelumnya	5
2.2. Definisi <i>Electric Discharge Machine</i> (EDM)	5
2.3. Prinsip Kerja <i>Electric Discharge Machine</i> (EDM)	7
2.4. <i>Wire Electric Discharge Machine</i> (WEDM)	9
2.4.1. Komponen Utama <i>Wire</i> EDM	11
2.4.2. Elektrode Kawat	12
2.4.3. Cairan Dielektrik (<i>Dielectric Fluid</i>)	13
2.4.4. <i>Flushing</i>	14
2.4.5. Siklus Percikan (<i>Spark Cycle</i>)	15
2.5. Parameter Pemesinan <i>Wire Electric Discharge Machine</i>	15
2.5.1. Arus Listrik	15
2.5.2. <i>Discharge Time</i>	17
2.5.3. <i>Pulse Time-Off</i>	17
2.5.4. <i>Pulse Time-On</i>	17
2.5.5. Polaritas Pahat dan Benda Kerja.....	17
2.5.6. <i>Wire Tension</i>	18
2.5.7. <i>Wire Feed Rate</i>	18

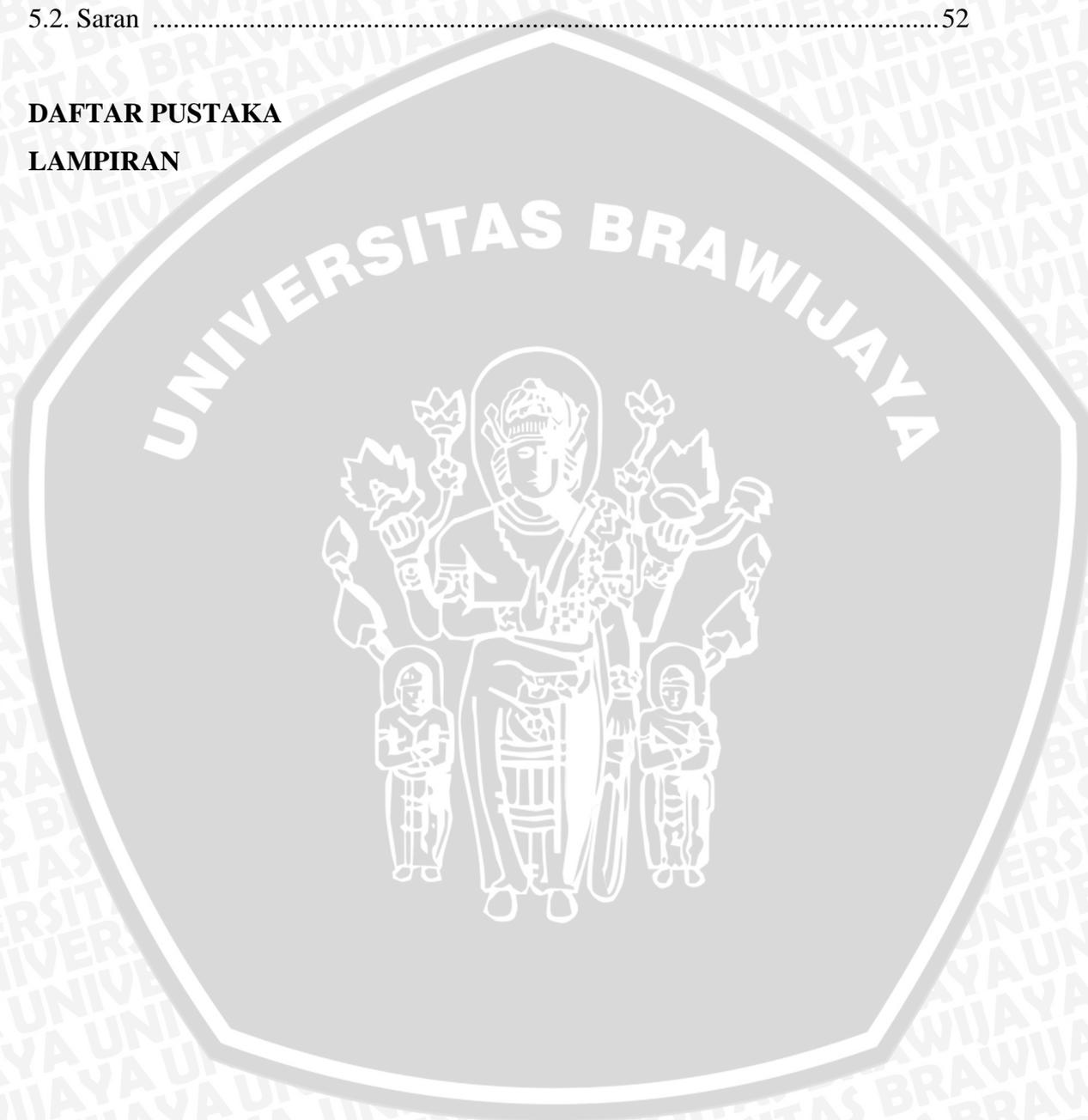
2.6. Karakter Pemesinan <i>Wire Electric Discharge Machine</i>	18
2.6.1. Ketelitian (<i>Accuracy</i>).....	18
2.6.2. Laju Pelepasan Logam (<i>Material Removal rate</i>)	19
2.6.3. Kecepatan Pemotongan (<i>Cutting Speed</i>)	20
2.7. Roda Gigi (<i>Gears</i>)	20
2.7.1. Klasifikasi Roda Gigi	21
2.7.2. Roda Gigi Lurus (<i>Spur Gear</i>).....	25
2.7.3. <i>Involute Profile</i>	28
2.8. Material Roda Gigi	30
2.8.1 Baja ASSAB 618	32
2.9. Jenis Kesalahan Geometri Pada Roda Gigi	33
2.10. Hipotesa	34
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	35
3.1. Metodologi Penelitian	35
3.2. Variabel Penelitian	35
3.2.1. Variabel Bebas	35
3.2.2. Variabel Terikat	35
3.2.3. Variabel Terkontrol	35
3.3. Bahan dan Peralatan Penelitian	35
3.3.1. Bahan	35
3.3.2. Peralatan	36
3.3.3. Benda kerja	37
3.4. Prosedur Penelitian	38
3.4.1. Proses Pengambilan Spesimen	38
3.4.2. Proses Pengambilan Data	38
3.5. Waktu dan Tempat Penelitian	39
3.6. Rancangan Pengolahan dan Analisa Data	39
3.7. Analisa Varian Satu Arah	40
3.8. Diagram Alir Penelitian	42
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1. Data Hasil Pengukuran	43
4.2. Pengolahan Data	43



4.2.1. Analisa Statistik	43
4.3. Pembahasan	47
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	52
5.1. Kesimpulan	52
5.2. Saran	52

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Mesin EDM..... 6

Gambar 2.2. Kategori Pemesinan EDM 7

Gambar 2.3. Skema Dasar EDM 7

Gambar 2.4. Proses *Sparking* Pada EDM 9

Gambar 2.5. Skema Dasar *Wire EDM* 10

Gambar 2.6. Mekanisme *Wire EDM* 10

Gambar 2.7. *Coated Wire Electrode* 13

Gambar 2.8. Siklus *On/Off Pulse* Pada *Wire EDM* 15

Gambar 2.9. Besar Arus Listrik Terhadap *Spark Energi* 16

Gambar 2.10. *Kerf* 17

Gambar 2.11. *Bicycle Effect* 19

Gambar 2.12. Roda Gigi Lurus Luar (*External Gearing*) 21

Gambar 2.13. Roda Gigi Dalam (*Internal Gearing*) 21

Gambar 2.14. Roda Gigi Rack dan Pinion..... 22

Gambar 2.15. Roda Gigi Permukaan 22

Gambar 2.16. *Parallel Helical Gears* 23

Gambar 2.17. *Crossed Helical Gears* 23

Gambar 2.18. *Herringbone Gears* 23

Gambar 2.19. *Straight Bevel Gears* 24

Gambar 2.20. *Spiral Bevel Gears* 24

Gambar 2.21. *Hypoid Gears* 25

Gambar 2.22. Roda Gigi Cacing 25

Gambar 2.23. Roda Gigi Lurus 25

Gambar 2.24. Parameter Roda Gigi 26

Gambar 2.25. *Backslash* 28

Gambar 2.26. Profil Gigi *Involute* 29

Gambar 2.27. Jenis-jenis Profile Gigi *Involute* 30

Gambar 2.28. Profil *Involute* Gigi (*Involute Tooth Profile*) 30

Gambar 2.29. *Profile Error Variation* 33

Gambar 2.30. *Tooth Profile Error* 33

Gambar 3.1. Mesin *Wire EDM* Mitsubishi BA-8 37

Gambar 3.2. Jangka Sorong 37



Gambar 3.3. Gambar Benda Kerja..... 38

Gambar 3.4. Diagram Alir Penelitian 42

Gambar 4.1. Grafik Linier Hubungan Besar Arus Listrik Terhadap *Profile Error*
Involute Roda Gigi Lurus 47

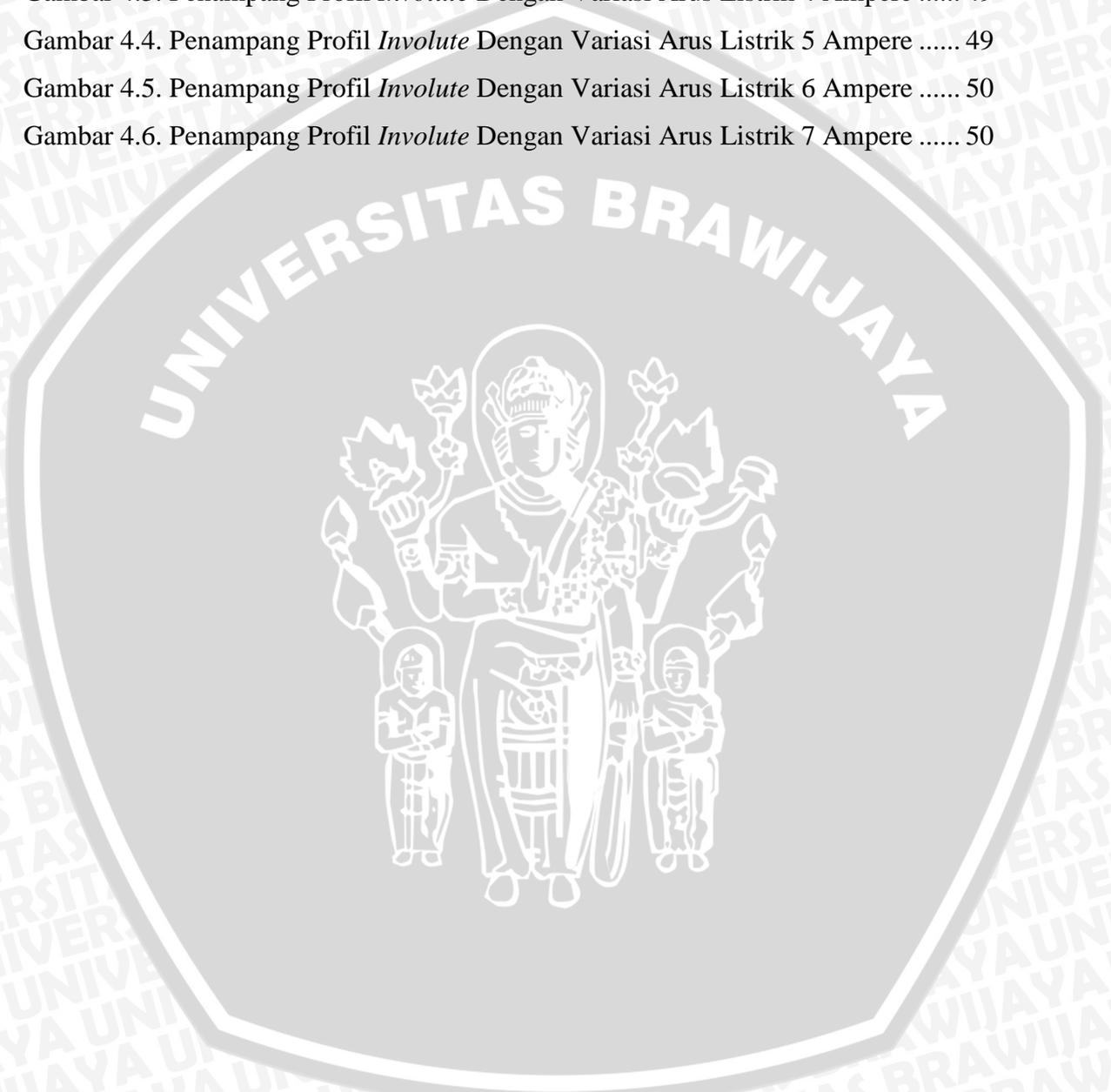
Gambar 4.2. Penampang Profil *Involute* Dengan Variasi Arus Listrik 3 Ampere 49

Gambar 4.3. Penampang Profil *Involute* Dengan Variasi Arus Listrik 4 Ampere 49

Gambar 4.4. Penampang Profil *Involute* Dengan Variasi Arus Listrik 5 Ampere 49

Gambar 4.5. Penampang Profil *Involute* Dengan Variasi Arus Listrik 6 Ampere 50

Gambar 4.6. Penampang Profil *Involute* Dengan Variasi Arus Listrik 7 Ampere 50



DAFTAR TABEL

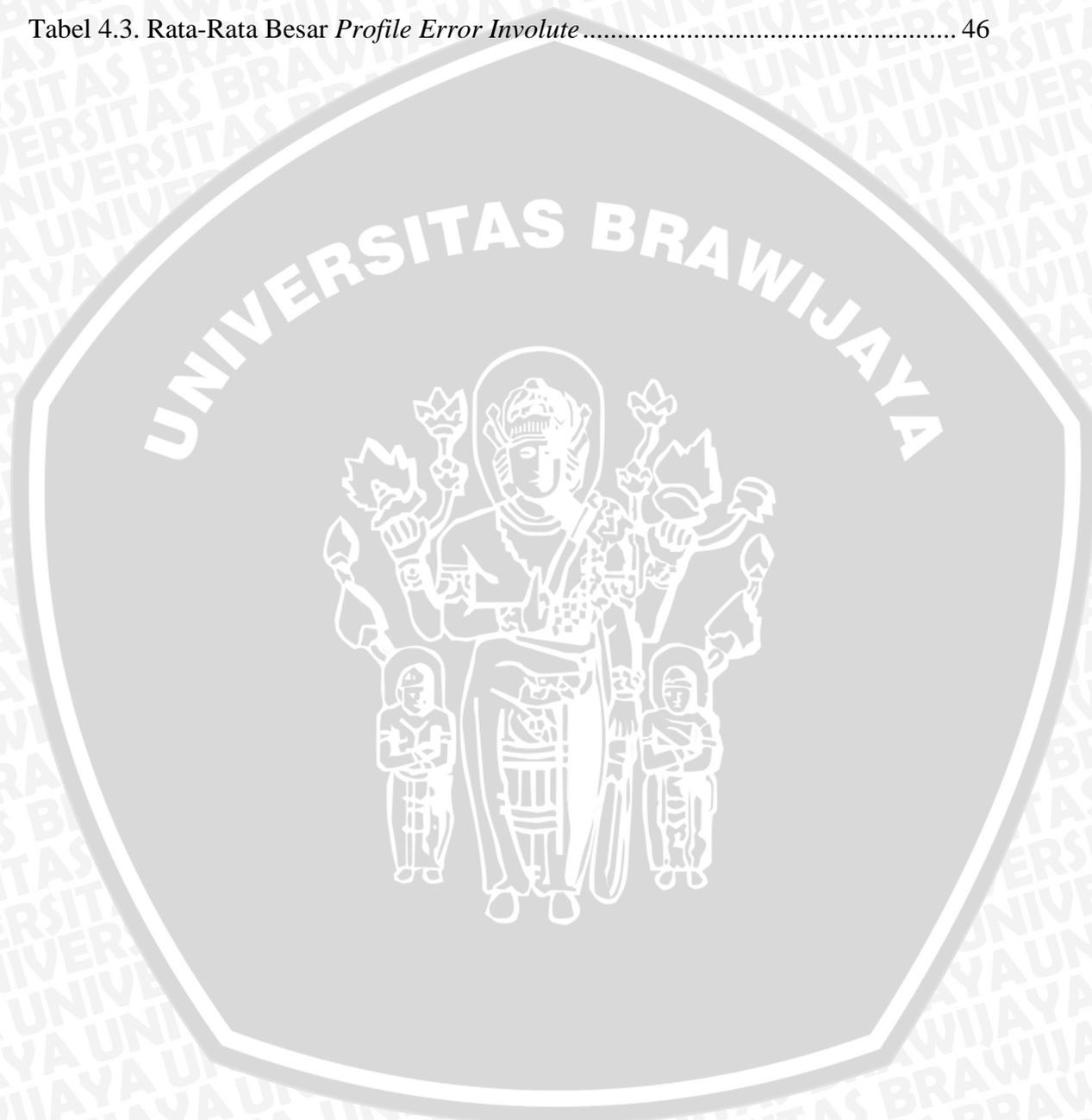
Tabel 3.1. Rancangan Penelitian 39

Tabel 3.2. Analisa Varian Satu Arah 40

Tabel 4.1. Data Penyimpangan *Profile Involute* 43

Tabel 4.2. Data Hasil Analisis Varian Satu Arah 46

Tabel 4.3. Rata-Rata Besar *Profile Error Involute* 46



DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1

Foto Spesimen

LAMPIRAN 2

Surat Keterangan Penelitian



RINGKASAN

Nugroho Bagus Primantoko, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang, Januari 2012. “Pengaruh Besar Arus Listrik Pada Proses *Wire EDM* Terhadap *Profile Error Involute* Roda Gigi Lurus.” Dosen Pembimbing: Sugiarto, ST., MT., dan Femiana Gapsari, ST.,MT

Wire EDM merupakan salah satu mesin pemotong logam non konvensional, mesin ini digunakan untuk membentuk komponen-komponen mesin yang memiliki bentuk kompleks dan membutuhkan kepresisian tinggi. Salah satu parameter pemesinan yang mempengaruhi kepresisian pemotongan pada *Wire EDM* adalah besar arus listrik. Bentuk profil *involute* gigi pada roda gigi merupakan bentuk yang memerlukan kepresisian tinggi dalam proses pemotongannya..

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui sejauh mana pengaruh parameter besar arus listrik pada *Wire EDM* terhadap *profile error involute* roda gigi lurus. Penelitian ini menggunakan metode penelitian ekperimental, variabel bebas yang digunakan adalah Arus Listrik dengan variasi 3 ampere, 4 ampere, 5 ampere, 6 ampere, dan 7 ampere. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah *profile error involute* roda gigi lurus yang nantinya akan menjelaskan sejauh mana besar penyimpangan pemotongannya.

Hasil dari penelitian menunjukkan semakin besar arus listrik yang digunakan menghasilkan nilai *profile error involute* roda gigi lurus yang semakin besar, berarti tingkat kepresisiannya semakin rendah. Nilai penyimpangan *profile error involute* terendah terjadi pada variasi besar arus listrik 3 ampere sebesar 0,0907 mm, sedangkan *profile error involute* terbesar terjadi pada variasi besar arus listrik 7 ampere sebesar 0,1256 mm.

Kata kunci : *wire edm, besar arus listrik, profile error involute, roda gigi lurus*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Meningkatnya permintaan akan produk dengan kualitas yang baik dan dalam jumlah yang besar merupakan salah satu efek dari perkembangan industri manufaktur yang semakin pesat di era globalisasi perdagangan saat ini. Keadaan ini menuntut perusahaan yang bergerak dibidang manufaktur untuk menghasilkan produk-produk yang memiliki kualitas dan kuantitas yang baik, tingkat akurasi tinggi, serta biaya seekonomis mungkin. Kualitas dan kuantitas produk yang harus senantiasa dijaga untuk memenuhi kebutuhan pasar dan agar menjadi *market leader*. Hal tersebut telah mendorong dikembangkannya teknologi pemotongan non konvensional yang memiliki keunggulan dibanding teknologi pemotongan konvensional.

Mesin – mesin perkakas yang digunakan dalam industri manufaktur saat ini telah berkembang pesat, hal itu bertujuan untuk mendapatkan kepresisian ukuran dan kualitas hasil produk yang tinggi. Dalam proses manufaktur sangat penting untuk menghasilkan produk yang memiliki kepresisian dan akurasi yang baik, hal ini tidak lepas dari *control quality* suatu produk agar produk yang dihasilkan mendapat apresiasi dari konsumen ataupun *stake holder*. Untuk mendapatkan kepresisian yang tinggi diperlukan suatu teknologi pemotongan canggih. Salah satunya teknologi pemotongan tersebut adalah *Electrical Discharge Machine (EDM)*.

Proses pemesinan dengan *EDM* adalah proses pemesinan benda kerja dengan menggunakan loncatan bunga api (*sparking*) yang terjadi antara elektroda pahat dan benda kerja melalui media isolator (*fluida dielektrik*). *EDM* biasanya digunakan untuk menghasilkan komponen-komponen mesin yang memiliki bentuk kompleks dan membutuhkan kepresisian tinggi. Proses ini mampu mengerjakan logam keras bahkan *ultra-hard* material dan permukaan material yang berbentuk rumit.

Pada proses EDM, masalah yang sering dihadapi oleh operator untuk mendapat kepresisian produk yang tinggi adalah penyetingan parameter pemesinan yang tidak tepat, serta penentuan nilai kompensasi pemotongan yang kurang teliti. Sebagai contoh, ketelitian ukuran pemotongan akan menurun dengan meningkatnya harga *on time capacitor*, *servo voltage* dan *wire tension*. Tetapi, ketelitian ukuran pemotongan akan meningkat seiring dengan meningkatnya harga *off time capacitor*. (Fredy: 2000)

Salah satu komponen mesin yang memiliki bentuk yang membutuhkan kepresisian tinggi adalah roda gigi. Bagian terpenting dan memiliki bentuk yang rumit serta membutuhkan kepresisian tinggi pada roda gigi adalah gigi-giginya (*teeth*), salah satunya pada *involute* roda gigi. Penyimpangan yang terjadi pada *involute* roda gigi adalah *profile error involute*, kesalahan ini diindikasikan dengan kesalahan bentuk profil aktual dari profil idealnya. Pembentukan roda gigi yang membutuhkan kepresisian yang tinggi tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan mesin *Wire EDM*.

Parameter pemesinan *EDM*, dalam hal ini *Wire EDM* memiliki beberapa parameter dasar dan masing-masing parameter menentukan kualitas produk yang akan dibuat. Salah satu parameter yang dapat diatur dalam *Wire EDM* adalah arus listrik (*ampere*), besar arus listrik dapat mempengaruhi kualitas hasil produk yang dihasilkan. Hal ini disebabkan penggunaan arus listrik yang semakin besar pada tegangan listrik akan menyebabkan percikan bunga api (*sparking*) semakin besar pula, hal ini menyebabkan pergerakan aliran elektron untuk menumbuk bagian permukaan benda kerja semakin cepat, sehingga terjadi peningkatan temperatur yang mengakibatkan pengerosian permukaan benda kerja, hal ini akan merubah hasil pemotongan yang berdampak kepada kepresisian ukuran pemotongan *Wire EDM*.

Untuk mendapatkan tingkat kepresisian yang tinggi diperlukanlah sebuah penelitian tentang hubungan antara variasi kuat arus listrik dengan kepresisian bentuk geometri hasil produk, dalam hal ini yang diteliti adalah *profile error involute* pada roda gigi lurus. Maka, penelitian ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui sejauh mana pengaruh besar arus listrik pada proses *Wire EDM* terhadap *profile error involute* roda gigi lurus.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun pokok permasalahan yang akan menjadi kajian dalam penelitian ini adalah:

Bagaimana pengaruh parameter besar arus listrik pada proses *Wire EDM* terhadap *profile error involute* roda gigi lurus?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Penelitian yang dilakukan menggunakan mesin Mitsubishi *Wire Cutting EDM* tipe BA-8.
2. Material benda kerja yang digunakan adalah baja paduan ASSAB 618.
3. Kawat yang digunakan adalah jenis kawat kuningan dengan diameter 0,2 mm.
4. Fluida dielektrik yang digunakan adalah air suling (destilasi).
5. Parameter pemesinan yang divariasi adalah arus listrik (*Ampere*).
6. Parameter – parameter pemesinan, seperti *Pulse Time-Off*, dan *Wire Tension* dikondisikan konstan.
7. Permasalahan yang dibahas hanya besar penyimpangan *involute* pada gigi (*tooth*) roda gigi lurus.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

Mengetahui sejauh mana pengaruh besar arus listrik pada proses *Wire EDM* terhadap *profile error involute* roda gigi lurus.

1.5 Manfaat Penelitian

Pada penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan informasi tentang pengaruh parameter besar arus listrik pada proses *Wire EDM* terhadap *profile error involute* roda gigi lurus.

2. Memberikan pengalaman pada penulis untuk menerapkan teori-teori yang didapatkan di perkuliahan.
3. Memberikan hasil penelitian sebagai sumbangan ilmu pengetahuan dan penambah wawasan dalam iptek tentang proses pemotongan logam dengan menggunakan *Wire EDM*.
4. Sebagai bahan masukan dan pertimbangan bagi operator mesin untuk menentukan parameter-parameter pemesinan *Wire EDM* agar hasil dan kualitas produk sesuai dengan yang diharapkan.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

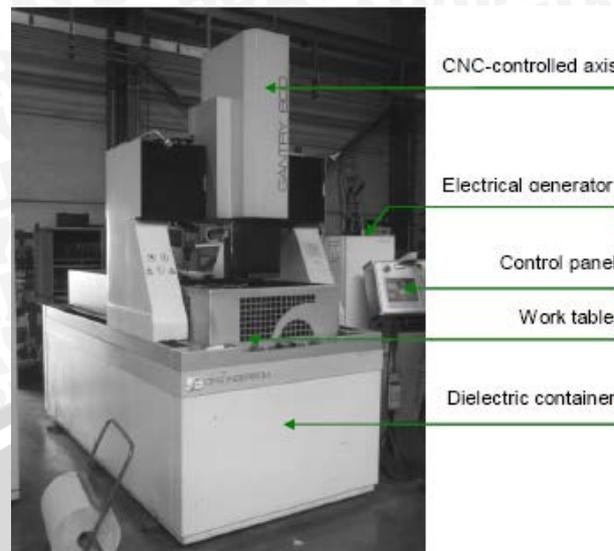
2.1. Penelitian Sebelumnya

Hasil penelitian Fredy Rein Tendi tahun 2000 adalah kekasaran permukaan dan ketelitian ukuran akan menurun dengan meningkatnya harga *on time capacitor* dan *servo voltage*. Selain itu, ketelitian ukuran juga akan menurun dengan meningkatnya harga *wire tension*. Tetapi, kekasaran permukaan dan ketelitian permukaan akan meningkat seiring dengan meningkatnya harga *off time capacitor*.

Hasil penelitian Adrian Junaidar tahun 2004 adalah semakin besar penarikan kawat maka *bicycle effect* yang terjadi semakin kecil, dikarenakan kekakuan kawat yang tinggi menyebabkan getaran kawat semakin kecil sehingga penyimpangan pemotongan juga rendah. Sedangkan semakin besar arus listrik yang digunakan maka *bicycle effect* yang terjadi juga semakin besar juga, disebabkan energi *sparking* yang dilepaskan semakin besar.

2.2. Definisi *Electric Discharge Machine* (EDM)

Electric Discharge Machine (EDM) merupakan teknologi pemotongan logam non konvensional yang menggunakan energi panas pada proses pemotongannya (*thermal cutting processes*). Proses EDM adalah proses pelepasan atau pengerosian material dari benda kerja oleh sejumlah loncatan bunga api listrik (*spark*) yang terjadi pada celah di antara katoda (elektroda) dengan anoda (benda kerja). Loncatan bunga api listrik tersebut terjadi secara tidak kontinu tetapi secara periodik terhadap waktu. Pada proses pemesinan ini digunakan cairan *deionized* yang disebut dengan cairan dielektrik, berada diantara elektroda dengan benda kerja.



Gambar 2.1: Mesin EDM
Sumber: Port, (1992:24)

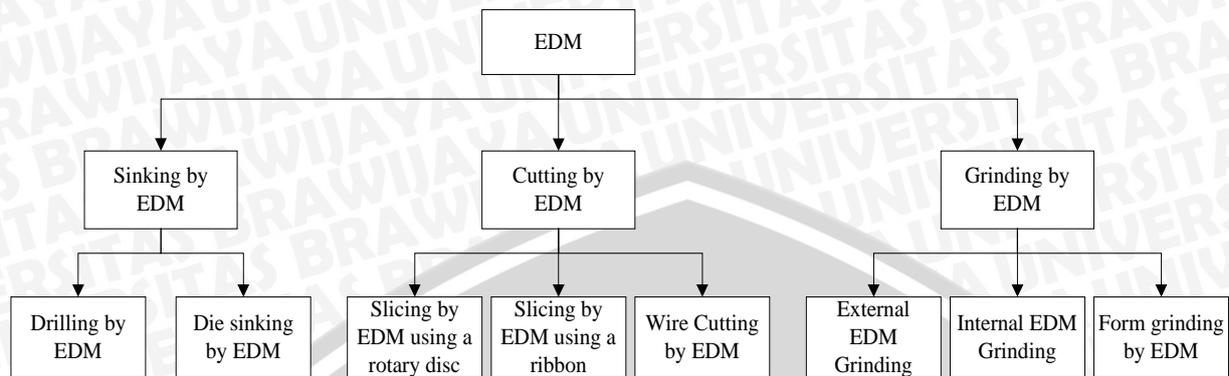
Keunggulan dari penggunaan *Electric Discharge Machine* adalah sebagai berikut:

- Mampu melakukan pengerjaan bentuk-bentuk benda kerja yang kompleks dan memiliki tingkat kepresisian yang tinggi.
- Hampir semua pekerjaan yang dilakukan pada mesin konvensional dapat dikerjakan dengan proses ini.
- Dapat melakukan pengerjaan benda kerja dengan tingkat kekerasan tinggi.

Ada 3 kategori utama dalam proses EDM, yaitu : *sinking*, *cutting*, dan *grinding*. Ketiga kategori ini dibedakan menurut jenis elektroda pahatnya, yaitu :

1. *Sinking* mempunyai bentuk pahat yang sesuai dari bentuk yang direncanakan pada benda kerja. Elektroda pahat melakukan gerak penetrasi ke benda kerja.
2. *Cutting* menggunakan pahat yang berbentuk antara lain plat, pita, kawat atau piringan. Arah gerakan pahat tegak lurus terhadap benda kerja.
3. *Grinding* menggunakan elektroda pahat yang bentuknya serupa dengan pahat gerinda konvensional. Pahat ini juga berputar pada sumbunya selain melakukan gerakan pemakanan.

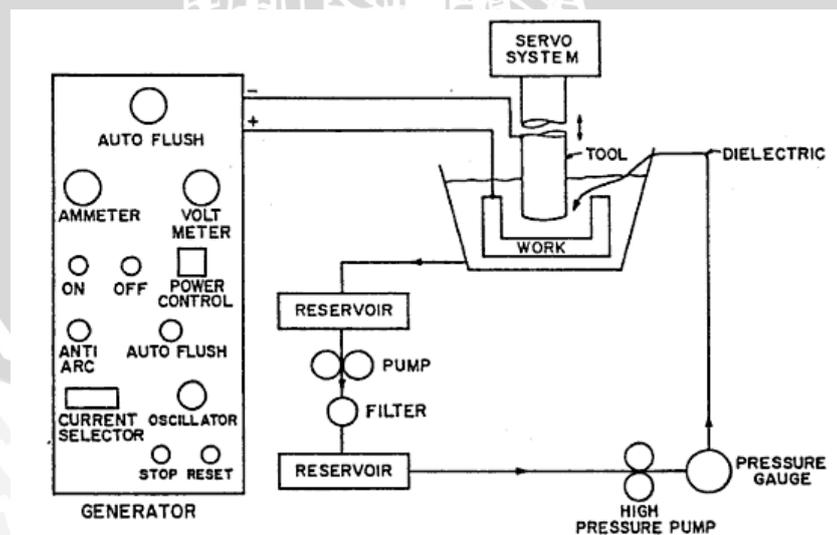
Klasifikasi dari jenis pengerjaan menggunakan EDM dapat dikelompokkan menjadi beberapa macam seperti terlihat pada diagram 2.2 berikut.



Gambar 2.2: Kategori Pemesinan EDM
Sumber: Pandey, (1983:86)

2.3. Prinsip Kerja *Electric Discharge Machine* (EDM)

EDM adalah suatu teknik pemotongan dimana *electric spark* digunakan untuk memotong benda kerja dengan menggunakan elektroda. Pada dasarnya mekanisme pelepasan logam pada *EDM* ditimbulkan oleh efek mengerosi benda kerja dari percikan listrik yang ditimbulkan diantara dua elektroda yang dipisahkan oleh cairan dielektrik, percikan listrik tersebut mampu menghasilkan panas yang dapat melelehkan material benda kerja. Oleh karena itu benda kerja harus merupakan material yang memiliki sifat konduktif terhadap listrik.



Gambar 2.3: Skema Dasar EDM
Sumber: Jain, (2002:134)

Proses percikan (*sparking*) listrik terjadi secara periodik dan beraturan dalam suatu media cairan dielektrik. Percikan akan timbul jika terdapat tegangan pada elektroda dan benda kerja.

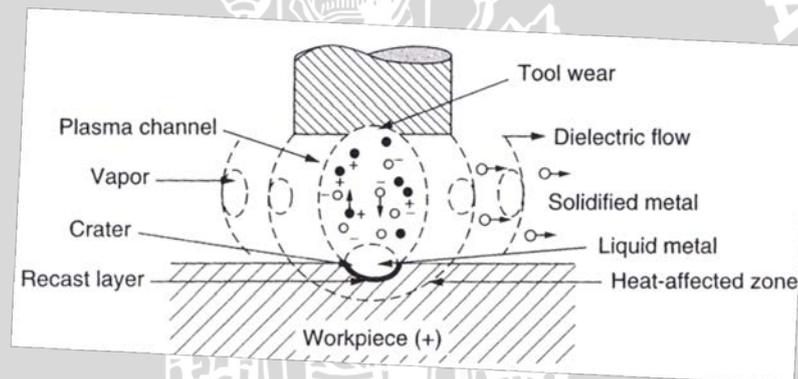
Pada proses awal EDM, elektroda yang bertegangan didekatkan ke benda kerja oleh mekanisme motor servo. Mekanisme servo tersebut mempertahankan suatu gap yang konstan dengan jarak 0.0005 – 0.001 in (0.01 – 0.02 mm) antara elektroda dan benda kerja, untuk mencegah gesekan langsung satu sama lain. Diantara dua elektroda tersebut terdapat cairan dielektrik. Cairan dielektrik berfungsi sebagai isolator dalam proses EDM, beda potensial listrik yang cukup besar menyebabkan cairan membentuk partikel yang bermuatan, hal ini menyebabkan tegangan listrik melewatinya dari elektroda ke benda kerja. Daerah yang memiliki tegangan listrik paling kuat adalah pada titik dimana jarak antara elektroda dan benda kerja paling dekat.

Mekanisme pengerjaan material benda kerja pada proses EDM dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Setiap terjadi pemusatan aliran elektron yang bergerak dengan kecepatan tinggi dalam waktu yang sangat singkat akan menimbulkan loncatan bunga api listrik yang menumbuk permukaan benda kerja.
2. Loncatan bunga api listrik yang menumbuk permukaan benda kerja menyebabkan terjadinya kenaikan temperatur (8000°C - 12000°C) dan menyebabkan pelelehan lokal pada benda kerja. Kondisi semacam ini juga terjadi pada permukaan pahat.
3. Pada saat yang bersamaan terjadi penguapan pada benda kerja, pahat maupun *fluida dielektrik* yang menghasilkan gelembung uap. Setelah terjadi loncatan bunga api listrik dan aliran listrik terhenti sesaat (*off time periode*), menyebabkan penurunan temperatur secara mendadak yang mengakibatkan lelehan material benda kerja maupun pahat elektroda akan membeku dengan cepat dan menyusut, pada akhirnya mengakibatkan bagian material yang meleleh akan terpecar keluar dari permukaan meninggalkan bekas berupa kawah-kawah halus pada permukaan material benda kerja.
4. Bagian-bagian material benda kerja dan pahat yang terpecar ini secepatnya akan membeku kembali terbentuk partikel-partikel halus yang terbawa pergi oleh aliran *fluida dielektrik*.

Proses terjadinya loncatan bunga api listrik antara katoda dan anoda sendiri dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Pergerakan elektron dari anoda ke katoda akibat adanya medan listrik.
2. Elektron akan menumbuk molekul-molekul fluida dielektrik sehingga menghasilkan elektron-elektron baru dan ion-ion positif baru yang berasal dari molekul dielektrik tersebut.
3. Ion positif yang berasal dari molekul fluida dielektrik tertarik ke arah katoda sedangkan elektron ke arah anoda.
4. Dari proses diatas terbentuklah saluran ion dimana arus listrik mengalir melalui saluran ion tersebut dan terjadilah loncatan bunga api listrik.
5. Dengan terbentuknya saluran ion, maka tahanan listrik pada saluran tersebut menjadi rendah sehingga voltage menurun. Akibatnya loncatan bunga api listrik tersebut terjadi dalam waktu singkat dan dalam secara periodik.

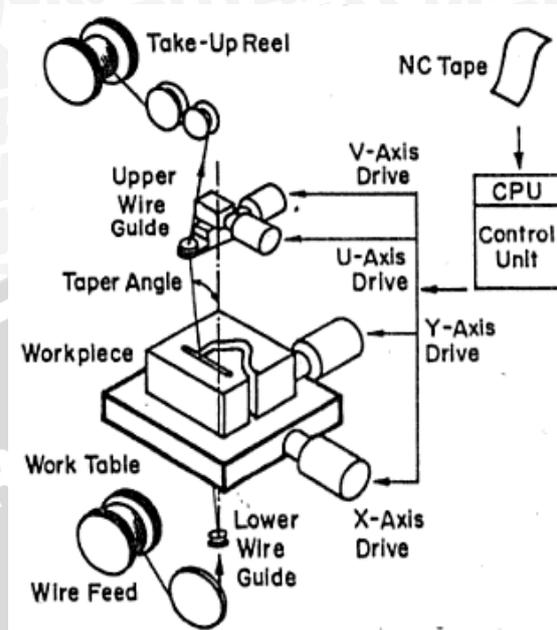


Gambar 2.4: Proses *Sparking* Pada EDM
Sumber: El-Hofy, (2003:118)

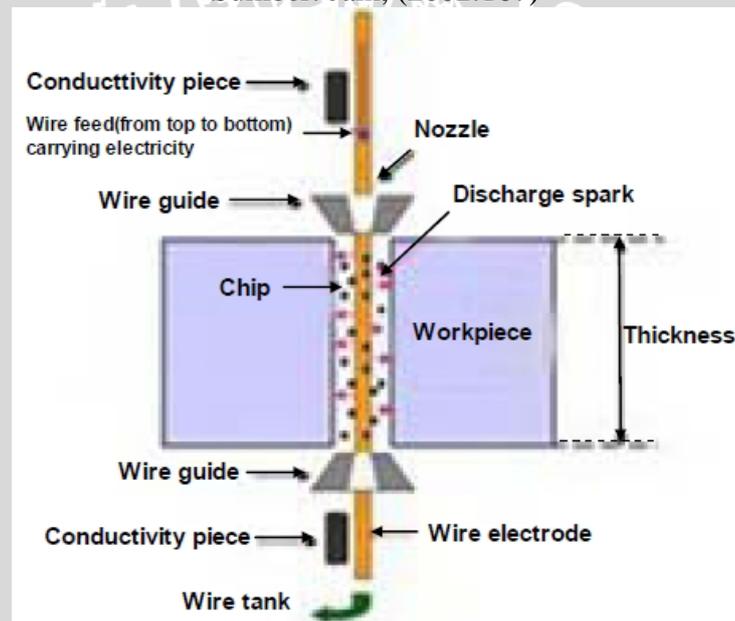
2.4. *Wire Electric Discharge Machine* (WEDM)

Wire EDM adalah salah satu proses *EDM* yang menggunakan sebuah kawat sebagai elektrodanya yang bergerak secara kontinu. Pelepasan material terjadi sebagai hasil erosi percikan listrik oleh kawat elektroda yang bergerak dari gulungan kawat baru memotong benda kerja (El-Hofy, 2005:132). *Wire EDM* menggunakan kawat elektroda untuk memotong benda kerja, gerakan kawat ini dikendalikan oleh program CNC untuk menghasilkan suatu bentuk geometri tertentu. Penggunaan *Wire EDM* mirip seperti *band saw*. Jika *band saw* menggunakan gerigi-gerigi gergaji untuk memotong benda kerja, maka *Wire EDM*

menggunakan *spark* untuk mengerosi benda kerja. Prinsip kerja *Wire EDM* dapat dijelaskan pada gambar berikut :



Gambar 2.5: Skema Dasar *Wire EDM*
Sumber: Jain, (2002:167)



Gambar 2.6: Mekanisme *Wire EDM*
Sumber: Raksiri, (2010:1)

Wire EDM melepaskan material dengan percikan bunga api yang dihasilkan oleh elektroda kawat yang dialiri listrik dari sebuah generator. Mekanisme sistem pemrograman *Computer – Numerical Control (CNC)* menjaga agar kawat elektroda tidak menempel ke benda kerja dan menjalankan mesin untuk memotong benda kerja sesuai dengan bentuk yang direncanakan.

Diantara benda kerja dan kawat terdapat sebuah pelindung isolator berupa *deionized water*, yang biasa disebut cairan dielektrik. Untuk mengontrol konduktivitas cairan tersebut, air harus melalui tangki resin untuk melepaskan elemen yang menyebabkan air menjadi terlalu konduktif. Sebuah pompa secara otomatis akan memaksa air untuk melalui sebuah tangki resin ketika konduktivitas air menjadi terlalu tinggi.

Ketika sebuah percikan bunga api listrik terjadi diantara elektroda kawat dan benda kerja maka akan terjadi peningkatan temperatur yang menyebabkan benda kerja meleleh dan menguap. Elektroda kawat terus-menerus mengalami perputaran sehingga elektroda yang digunakan untuk melakukan pemakanan selalu diperbarui. Cairan pendingin atau cairan dielektrik akan mendinginkan metal yang menguap dan menjadikannya solid partikel. Solid partikel ini kemudian akan terbawa keluar dari celah antara benda kerja dan elektroda kawat.

Kemudian cairan dielektrik ini, akan melalui filter yang akan memisahkan antar cairan dielektrik itu sendiri dengan partikel sisa pemotongan, melalui sebuah *chiller* untuk menjaga temperatur agar konstan.

2.4.1. Komponen Utama *Wire EDM*

Wire EDM memiliki lima komponen utama sebagai berikut:

1. Sistem Kontrol Gerakan Benda Kerja

Sistem ini berfungsi untuk mengontrol gerakan benda kerja sesuai dengan program yang telah dimasukkan serta menjaga jarak (*gap*) antara kawat elektroda dengan benda kerja agar tetap dijaga konstan.

2. Generator Pembangkit *Sparking*

Sumber tenaga yang diperlukan untuk mensuplai energi listrik yang dibutuhkan selama proses pemesinan benda kerja untuk menghasilkan proses aliran elektron pada *spark gap* yang menimbulkan loncatan bunga api listrik pada *Wire EDM*. Selain itu generator berfungsi untuk mengatur dan mengendalikan beda tegangan yang terjadi antara elektroda kawat dan benda kerja.

3. Unit Elektroda Kawat

Unit elektroda kawat ini berfungsi untuk menjalankan elektroda kawat agar terus-menerus bergerak dari kumparan kawat pengisi ke kumparan penggulung, sehingga elektroda kawat yang baru selalu berada di daerah

spark gap. Hal ini akan membuat keausan yang terjadi pada elektroda kawat tidak mempengaruhi keakuratan pemotongan.

4. Unit Fluida Dielektrik.

Unit ini berfungsi untuk mengatur sirkulasi aliran cairan dielektrik yang mengalir melewati celah antara elektroda kawat dan benda kerja. Unit ini meliputi *reservoir*, pompa, filter, *nozzle*, pendingin dan pengukur tekanan.

5. Sistem Mesin

Sistem ini berhubungan dengan penunpu benda kerja dan elektroda kawat, yang terdiri dari *base*, *column*, dan *head*.

2.4.2. Elektroda Kawat

Pemilihan elektroda kawat merupakan salah satu hal terpenting karena akan menentukan hasil akhir benda kerja. Secara teoritis semua material yang bersifat konduktif terhadap listrik dapat digunakan sebagai elektroda pahat. Elektroda dapat dikategorikan baik apabila memiliki titik leleh tinggi dan tahanan listrik rendah. Pada *Wire EDM* elektroda yang digunakan harus memiliki beberapa karakteristik sebagai berikut:

- Konduktor listrik dan panas yang baik.
- Ketahanan terhadap keausan akibat pengerjaan benda kerja.
- Tahan terhadap deformasi selama proses pengerosian.
- Menghasilkan pelepasan material (*material removal*) yang efisien.

Elektroda kawat yang digunakan dapat terbuat dari logam murni, logam paduan, ataupun logam yang dilapisi dengan logam lain. Beberapa logam yang sering digunakan adalah sebagai berikut:

1. Kuningan (*Brass*)

Elektroda kawat ini merupakan campuran dari seng (*Zn*). Biasanya memiliki prosentase kandungan 65%-35% dan 63%-37%. Penambahan seng (*Zn*) menyebabkan kenaikan signifikan pada kekuatan tarik dan titik leleh elektroda. Hal ini menyebabkan kuningan secara cepat menjadi elektroda yang paling umum digunakan pada *Wire EDM*.

2. *Molybdenum*

Jenis elektroda kawat ini memiliki kekuatan tarik yang tinggi, tidak mudah putus dan titik leleh yang tinggi. Kawat elektroda jenis ini hanya digunakan

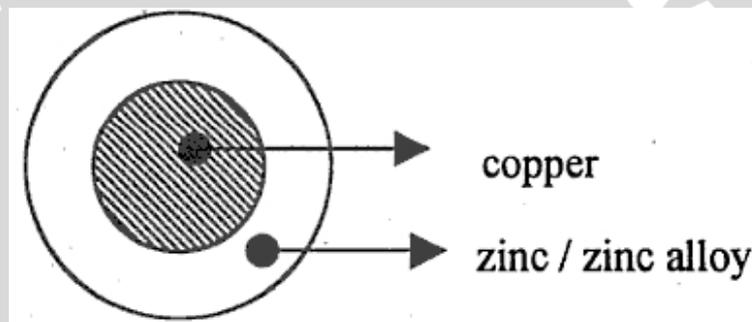
secara khusus dikarenakan harganya yang tinggi dan *machining time* yang rendah.

3. Tembaga (*Copper*)

Elektroda kawat jenis ini memiliki kekuatan tarik yang rendah, mudah mulur, mudah putus, memiliki titik leleh rendah memiliki konduktivitas listrik dan termal yang tinggi.

4. Kawat yang dilapisi (*Coated Wire*)

Elektroda kawat ini dapat diperoleh dengan menggunakan metode elektroplating. Elektroda kawat ini memiliki inti dari kuningan atau tembaga, untuk memperoleh konduktivitas dan kekuatan tarik. Sedangkan untuk meningkatkan formasi percikan (*spark formation*) dan karakteristik dari *flush*, digunakan lapisan seng (Zn) murni atau paduannya.



Gambar 2.7: *Coated Wire Electrode*
Sumber : Jain, (2002 : 311)

2.4.3. Cairan Dielektrik (*Dielectric Fluid*)

Cairan dielektrik merupakan cairan yang harus selalu berada pada celah diantara kawat elektroda dan benda kerja serta penyuplaiannya melalui lubang saluran cairan dielektrik pada elektroda atau pada benda kerja maupun dari pancaran yang berasal dari luar. Fungsi utama dari cairan dielektrik didalam proses *Electric Discharge Machine (EDM)* adalah sebagai berikut :

1. Cairan dielektrik memungkinkan suatu percikan (*spark*) listrik dapat terjadi bila dalam keadaan terionisasi.
2. Berfungsi sebagai isolator antara elektroda dan benda kerja.
3. Membilas partikel-partikel pada celah diantara elektroda kawat dan benda kerja yang timbul akibat proses pengerjaan material.
4. Media pendingin untuk benda kerja dan kawat elektroda.

Pada dasarnya cairan dielektrik dapat dikelompokkan menjadi 2 jenis, yaitu:

1. Air murni (*Aqua destilata*)

Digunakan pada proses pengerjaan kecil (*micromachining*), misalnya pada pengerjaan dengan menggunakan *Wire EDM*.

2. Cairan dengan senyawa hidrokarbon.

▪ Minyak mineral (*Mineral oil*)

Banyak digunakan dalam proses *EDM*, memberikan hasil yang baik bila tidak ditambahkan zat pencampur (*addictive*).

▪ *Kerosene*

Dengan viskositas yang rendah sehingga cocok digunakan pada pengerjaan *finishing*.

Pada pengerjaan menggunakan *Wire EDM* biasanya digunakan air murni (*aqua destilata*) sebagai cairan dielektriknya. Air murni (*aqua destilata*) adalah air yang telah mengalami proses deionisasi (*deionized water*) sehingga memiliki sifat isolator yang baik.

2.4.4 *Flushing*

Flushing adalah sirkulasi cairan dielektrik diantara benda kerja dan kawat elektroda. *Flushing* memegang peranan penting dalam proses EDM. Suatu proses *flushing* yang tidak cukup baik dapat menyebabkan penurunan umur elektroda, penurunan waktu produksi, dan penurunan efisiensi pemesinan. Cairan dielektrik merupakan medium isolator yang sempurna saat sebelum terjadi loncatan bunga api (*sparking*).

Tujuan dari proses *flushing* adalah sebagai berikut:

- Mensuplai cairan dielektrik baru ke celah diantara benda kerja dan elektroda dimana merupakan daerah terjadinya loncatan bunga api.
- Membawa dan mengeluarkan geram dan pengotor lain dari daerah loncatan bunga api listrik.
- Mendinginkan benda kerja dan elektroda.

Pada proses pemesinan menggunakan *Wire EDM*, metode *flushing* yang digunakan adalah :

1. *Flushing pressure*

Flushing jenis ini dilakukan dengan cara menyemprotkan cairan dielektrik ke daerah *spark gap* menggunakan *nozzle* dari atas maupun dari bawah

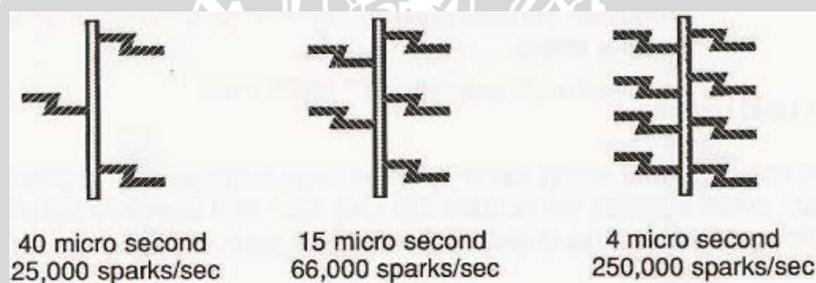
benda kerja, sehingga kawat akan dikelilingi oleh cairan dielektrik. Jarak *nozzle* dengan benda kerja dapat mempengaruhi hasil akhir proses pemotongan.

2. *Flushing submerge*

Flushing jenis ini dilakukan dengan cara merendam seluruh benda kerja dan elektroda kawat di dalam cairan dielektrik yang terus bersirkulasi. Biasanya digunakan untuk pemotongan benda kerja dengan bentuk yang rumit.

2.4.5. Silkus Percikan (*Spark Cycle*)

Siklus percikan (*spark cycle*) adalah jumlah waktu *pulse on/off* berlangsung. Satu siklus berarti jumlah 1 *pulse time-on* ditambah 1 *pulse time-off*. Satu siklus berlangsung dalam satuan seperseribu milidetik atau sepersejuta detik.



Gambar 2.8: Siklus On/Off *Pulse* Pada *Wire EDM*
Sumber: Port, (1992:8)

2.5. Parameter Pemesinan *Wire Electric Discharge Machine*

2.5.1. Arus Listrik

Arus memegang peranan yang sangat penting pada proses *Wire EDM*. Besar kecilnya arus akan berpengaruh terhadap loncatan bunga api listrik (*sparking*), semakin besar arus yang digunakan akan membuat terjadinya *sparking* atau pengerosian yang besar pula pada benda kerja, sehingga akan berpengaruh terhadap produk yang dihasilkan pada proses *Wire EDM*, yaitu ketelitian hasil pemotongan produk.

Arus pada elektroda merupakan fungsi dari tegangan yang digunakan, sehingga kenaikan tegangan akan menghasilkan arus listrik menjadi naik.

Pengaturan tegangan diatur menggunakan *servoentivity* yang secara tidak langsung akan digunakan untuk pengaturan besar arus yang digunakan.

Semakin besar arus yang digunakan untuk proses pemotongan maka semakin besar pula elektron-elektron yang dilepaskan dan mengerosi benda kerja, sehingga akan semakin tinggi laju pelepasan logamnya. Tetapi semakin besar arus yang digunakan akan mengurangi ketelitian geometri hasil pengerjaan. Ini dikarenakan semakin besar arus yang digunakan maka akan menyebabkan semakin besarnya energi loncatan tiap bunga api (*sparking*). Seperti pada gambar berikut:



a) *Spark* energi 5 ampere b) *Spark* energi 600 ampere.

Gambar 2.9: Besar Arus Listrik Terhadap *Spark* Energi
Sumber : Port, (1992:6)

Sedangkan untuk mengetahui besar energi tiap loncatan bunga api listrik dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$W_p = V \times I \times t \quad (2.1)$$

Dimana :

W_p = Energi tiap loncatan bunga api listrik

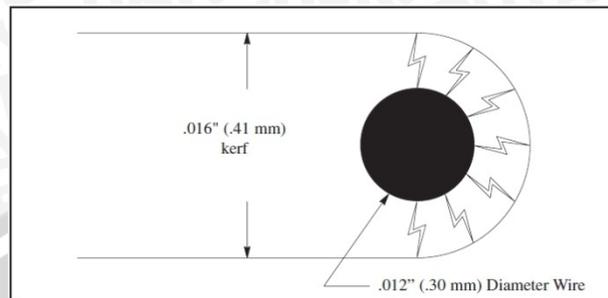
V = Tegangan Listrik

I = Arus Listrik

t = Lama waktu terjadinya loncatan bunga api listrik

Dari persamaan diatas dapat disimpulkan bahwa dengan penggunaan arus listrik yang semakin besar pada tegangan listrik dan waktu loncatan bunga api listrik yang konstan maka akan meningkatkan energi tiap loncatan bunga api listrik (*spark*). Peningkatan energi tiap *sparking* akan menyebabkan lebar pemotongan benda kerja akan semakin besar, disamping itu akan mengakibatkan pergerakan aliran elektron yang menumbuk permukaan benda

kerja menjadi semakin cepat, dan bagian dari permukaan benda kerja yang tertumbuk elektron dengan kecepatan tinggi akan mengalami peningkatan temperatur sehingga akan menyebabkan pelelehan permukaan benda kerja.



Gambar 2.10 : Kerf
Sumber : Complete EDM Handbook

2.5.2. Discharge Time

Discharge time adalah waktu pelepasan arus listrik diantara benda kerja dan kawat elektroda. Satuan dari *discharge time* adalah seperseribu milidetik (*micro second*).

2.5.3. Pulse Time-Off

Pulse time-off adalah waktu dimana terjadi ionisasi awal pada cairan dielektrik dan pembersihan partikel sisa pengerosian benda kerja pada celah diantara benda kerja dan elektroda kawat. *Pulse time-off* memiliki pengaruh signifikan pada keseluruhan kecepatan pengerjaan dan stabilitas proses pemesinan. Penambahan nilai *pulse time-off* akan berakibat pada penurunan jumlah periode percikan akan semakin turun.

2.5.4. Pulse Time-On

Pulse time on adalah waktu dimana terjadi aliran arus listrik dan pengerosian benda kerja. *Pulse time-on* memiliki pengaruh signifikan pada keseluruhan kecepatan pengerjaan, kekasaran benda kerja dan kawat elektrode. Penambahan nilai *pulse time-on* akan menyebabkan jumlah periode percikan akan naik, sehingga jumlah pemakanan akan naik.

2.5.5. Polaritas Pahat dan Benda Kerja

Polaritas merupakan hubungan antara benda kerja dan elektroda dengan kutub listrik. Dua jenis polaritas yang digunakan dalam proses pemesinan *Electric Discharge Machine (EDM)* adalah polaritas negatif dan polaritas positif. Polaritas negatif adalah kondisi dimana elektroda dihubungkan dengan

kutub negatif. Sedangkan polaritas positif adalah kondisi dimana elektroda dihubungkan dengan kutub positif.

2.5.6. *Wire Tension*

Wire tension merupakan gaya tarik yang dikenakan pada kawat sebelum proses pemotongan dilakukan. Setiap jenis elektrode kawat memiliki kekuatan tarik yang berbeda-beda, dimana akan menentukan gaya tarik yang dikenakan pada elektrode kawat tersebut. Besar penarikan kawat yang tinggi akan mengurangi getaran sehingga akan menurunkan simpangan yang terjadi. Turunnya simpangan yang terjadi akan berpengaruh pada ketelitian ukuran hasil pemotongan. Tetapi penarikan kawat yang terlalu tinggi dapat menyebabkan putusnya kawat elektrode.

2.5.7. *Wire Feed Rate*

Wire feed rate adalah kecepatan pemakanan kawat elektroda terhadap benda kerja dinyatakan dalam *inch per second* (ips) atau *mm per second*. Semakin besar harga *feed rate* maka semakin besar pula penyimpangan ketelitian ukuran dan turunnya nilai kekasaran permukaan benda kerja

2.6. Karakter Pemesinan *Wire Electric Discharge Machine*

2.6.1. Ketelitian (*Accuracy*)

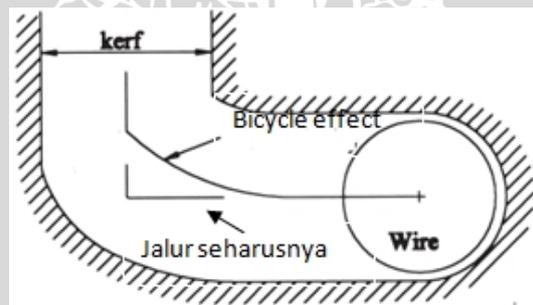
Kesalahan bentuk geometri pada benda kerja hasil pemesinan menggunakan *Wire EDM* sangat berhubungan dengan keakurasian atau ketelitian proses pemotongan. Ketelitian pada saat proses pemotongan ini dapat ditentukan oleh kesalahan penyetingan beberapa parameter, kesalahan penentuan koordinat pemotongan, kesalahan penentuan nilai kompensasi kawat, dan adanya *bicycle effect*. Kesalahan bentuk geometri biasanya banyak terjadi pada bentuk geometri sudut dan lengkungan.

Jika kita melakukan pemotongan pada benda kerja tebal dengan kecepatan maksimal yang dapat dicapai, maka kawat akan membentuk sebuah lengkungan pada saat pemotongan. Fenomena ini biasa disebut *wire lag* yaitu ketidakselarasan gerakan antara *Wire Guide* pada mesin *Wire EDM* dan kawat (*wire*) yang memotong benda kerja, sehingga gerakan aktual kawat tertinggal dari gerakan *Wire Guide*. Pada suatu pemotongan lurus tidak akan mempengaruhi bentuk benda kerja tetapi pada pemotongan sudut akan terjadi kesalahan bentuk geometri.

Kawat akan tetap fleksibel meskipun telah diberi tegangan dan juga secara fisik tidak bersentuhan dengan benda kerja, ini memungkinkan terjadinya lengkungan pada kawat saat proses pemotongan berlangsung. Pada saat lengkungan ini terjadi maka percikan akan memotong lagi bentuk yang sudah ada, sehingga akan terjadi kesalahan geometri.

Nilai kompensasi kawat juga akan mempengaruhi kesalahan geometri yang terjadi. Fungsi kompensasi kawat adalah agar kawat tetap terjaga pada lintasan koordinat yang sudah diprogram. Pusat diameter kawat harus dijaga terhadap jalur lintasan koordinat program yang dibuat dengan dimensi benda kerja yang sebenarnya. Oleh karena itu, dalam pembuatan struktur program haruslah mengacu pada geometri benda kerja yang sebenarnya serta memperhitungkan harga kompensasi kawat dengan harapan geometri benda kerja akhir yang didapat sesuai dengan persyaratan yang telah ditentukan.

Bicycle effect merupakan suatu fenomena terjadi kesalahan pemotongan pada bentuk melengkung atau sudut, lintasan yang dilalui kawat tidak sesuai dengan program yang telah dimasukan. *Bicycle effect* ini biasanya disebabkan oleh *wire lag*. Ini dikarenakan kawat keluar dari jalur yang seharusnya dilalui, sehingga memotong bagian yang seharusnya tidak dipotong. Biasanya kasus seperti ini sering terjadi pada pemotongan benda tebal dengan kecepatan pemotongan yang relatif tinggi.



Gambar 2.11: *Bicycle Effect*
Sumber : Hsue, (1997:56)

2.6.2. Laju Pelepasan Logam (*Material Removal Rate*)

Laju pelepasan logam atau *material removal rate* (MRR) adalah besarnya volume material yang dibuang tiap satu satuan waktu efektif. Pada proses EDM pelepasan material logam bukan hanya pada benda kerja melainkan juga pada elektroda pemotongnya. Hasil dari proses pengerjaan material ini adalah kawah-kawah halus (*crater*) pada permukaan benda kerja.

Laju pelepasan logam pada EDM didefinisikan sebagai berikut:

$$MRR = (4 \times 10^4)IT_w^{-1.23} \quad (\text{Hassan, 2005:126})$$

Dimana :

I = arus listrik (A)

T_w = titik leleh benda kerja ($^{\circ}\text{C}$)

Atau

$$MRR = k.t.v_c.\rho \quad (\text{Mahapatra, 2000:4})$$

Dimana :

k = lebar *kerf* (mm)

t = tebal benda kerja (mm)

v_c = kecepatan pemotongan (mm/menit)

ρ = densitas benda kerja (g/cm^3)

2.6.3. Kecepatan Pemotongan (*Cutting Speed*)

Secara umum kecepatan pemotongan (*cutting speed*) didefinisikan jumlah volume benda kerja yang terbuang dalam inch persegi per jam (*square inch per hour*), dan tiap mesin *Wire EDM* yang dibuat oleh perusahaan yang berbeda memiliki karakteristik kecepatan pemotongan yang berbeda-beda. Perbedaan dalam penentuan ketebalan benda kerja, jenis material dan ketelitian hasil pengerjaan yang diinginkan akan sangat menentukan kecepatan pemotongan pada proses pemotongan menggunakan *Wire EDM*.

2.7. Roda Gigi (*Gears*)

Roda gigi (*gear*) didefinisikan sebagai sebuah elemen mesin yang digunakan untuk mentransmisikan putaran dan daya diantara dua poros yang berputar, pentransmisian putaran dan daya ini dilakukan oleh gigi – gigi kedua roda yang saling berkait. Roda gigi lebih sering digunakan karena dapat mentransmisikan putaran dan daya yang lebih bervariasi.

Roda gigi bekerja secara berpasangan, yang lebih kecil biasa disebut *pinion*, dan yang lebih besar biasa disebut *gear*. Roda gigi memiliki beberapa kelebihan, yaitu:

- Kemampuan menerima beban lebih tinggi.
- Sistem transmisinya lebih ringkas, putaran lebih tinggi dan daya yang besar.

- Sistem konstruksi yang sederhana.
- Efisiensi pemindahan dayanya tinggi karena faktor terjadinya slip sangat kecil.

2.7.1. Klasifikasi Roda Gigi

Berdasarkan hubungan antara poros, bentuk dari gigi – gigi, dan beberapa bagian spesifik tertentu roda gigi dapat diklasifikasikan menjadi :

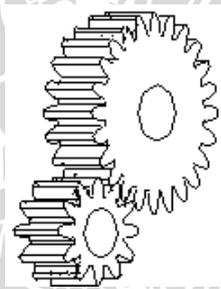
1. Roda Gigi Lurus (*Spur Gear*)

Roda gigi lurus digunakan untuk poros yang sejajar atau paralel. Roda gigi lurus ini cocok digunakan pada sistim transmisi yang gaya kelilingnya besar, karena tidak menimbulkan gaya aksial.

Roda gigi lurus dibagi menjadi beberapa jenis, yaitu:

a. Roda Gigi Lurus Luar (*External Gearing*)

Roda gigi lurus ini digunakan untuk menaikkan atau menurunkan putaran dalam arah yang berlawanan.

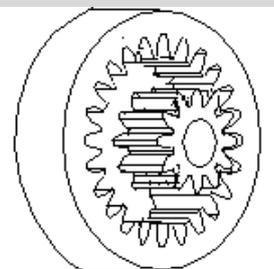


Gambar 2.12: Roda Gigi Lurus Luar (*External Gearing*)

Sumber: Handbook of Gear Design

b. Roda gigi Dalam (*Internal Gearing*)

Roda gigi dalam dipakai jika diinginkan alat transmisi yang berukuran kecil dengan perbandingan reduksi besar.

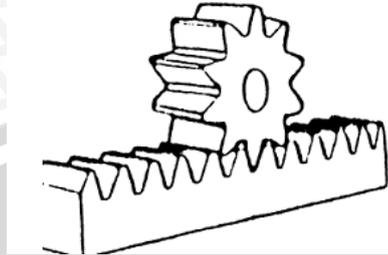


Gambar 2.13: Roda Gigi Dalam (*Internal Gearing*)

Sumber: Handbook of Gear Design

c. Roda gigi *Rack* dan *Pinion*

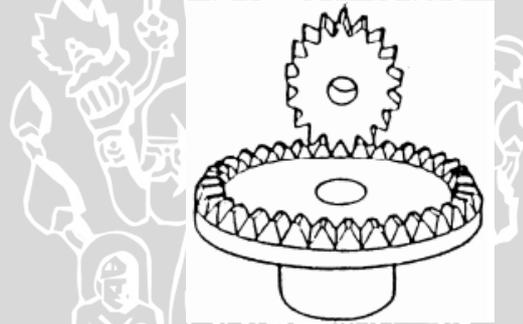
Roda gigi *Rack* dan *Pinion* berupa pasangan antara batang gigi dan pinion roda gigi jenis ini digunakan untuk merubah gerakan putar menjadi lurus atau sebaliknya.



Gambar 2.14: Roda Gigi Rack dan Pinion
Sumber: Handbook of Gear Design

d. Roda gigi Permukaan

Roda gigi lurus permukaan memiliki dua sumbu saling berpotongan dengan sudut sebesar 90° .



Gambar 2.15: Roda Gigi Permukaan
Sumber: Handbook of Gear Design

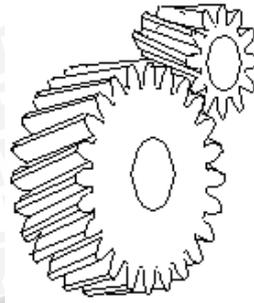
2. Roda Gigi Miring (*Helical Gears*)

Roda gigi miring (*helical gears*) memiliki bentuk gigi yang membentuk sudut terhadap sumbu poros (*helic*). Dalam pengoperasiannya roda gigi miring lebih lembut dan tingkat kebisingannya rendah.

Roda gigi miring dibagi menjadi beberapa jenis, yaitu:

a. *Parallel Helical Gears*

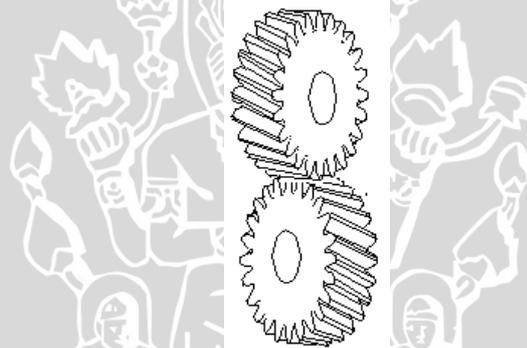
Parallel helical gears digunakan untuk poros yang sejajar. Digunakan untuk pemindah daya sedang sampai besar.



Gambar 2.16: *Parallel Helical Gears*
Sumber: Handbook of Gear Design

b. *Herringbone Gears*

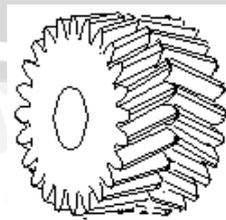
Herringbone gears atau yang biasa disebut roda gigi helik ganda, memiliki bentuk gigi helik yang saling berlawanan arah. Digunakan untuk pemindah daya yang besar pada dua poros yang sejajar (*parallel*) dan suara yang ditimbulkan tidak berisik.



Gambar 2.17: *Crossed Helical Gears*
Sumber: Handbook of Gear Design

c. *Crossed Helical Gears*

Crossed helical gears memiliki gigi sama dengan *helical gears* tetapi memiliki sudut gigi yang tidak berpotongan. Digunakan untuk pemindah daya sedang sampai daya yang besar pada dua poros yang saling bersilangan.



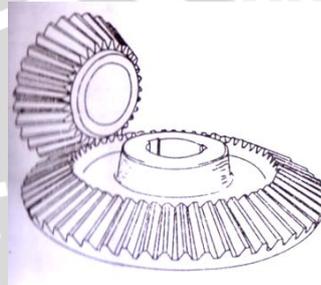
Gambar 2.18: *Herringbone Gears*
Sumber : Handbook of Gear Design

3. Roda Gigi Payung (*Bevel Gears*)

Digunakan untuk mentransmisikan daya pada dua poros yang saling bersilangan, membentuk sudut 90° . Roda gigi payung dibagi menjadi:

a. *Straight Bevel Gear*

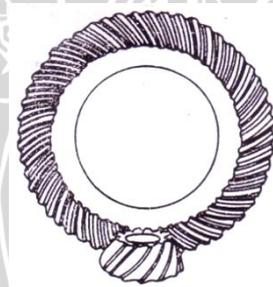
Straight bevel gears atau roda gigi payung lurus, memiliki bentuk gigi yang lurus pada permukaannya.



Gambar 2.19: *Straight Bevel Gears*
Sumber: Handbook of Gear Design

b. *Spiral Bevel Gears*

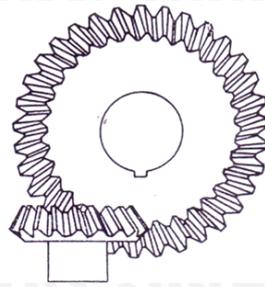
Spiral bevel gears atau roda gigi payung spiral memiliki bentuk gigi spiral.



Gambar 2.20: *Spiral Bevel Gears*
Sumber: Handbook of Gear Design

c. *Hypoid Gears*

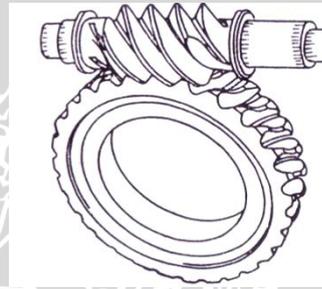
Hypoid gears hampir sama dengan *spiral bevel gear*, namun pada *spiral bevel gear* dua poros yang saling berpotongan berada dalam satu bidang, sedangkan pada *hypoid gears* kedua poros tidak saling berpotongan dan membentuk sudut.



Gambar 2.21: *Hypoid Gears*
Sumber: Handbook of Gear Design

5. Roda Gigi Cacing (*Worm Gears*)

Roda gigi cacing biasanya terdiri dari batang berulir cacing dan roda gigi cacing. Pada batang ulir cacing bentuk gigi berulir. Dalam penggunaannya roda gigi cacing memiliki suara halus dan mampu menahan beban yang berat.



Gambar 2.22: Roda Gigi Cacing
Sumber: Handbook Of Gear Design

2.7.2 Roda Gigi Lurus (*Spur Gear*)

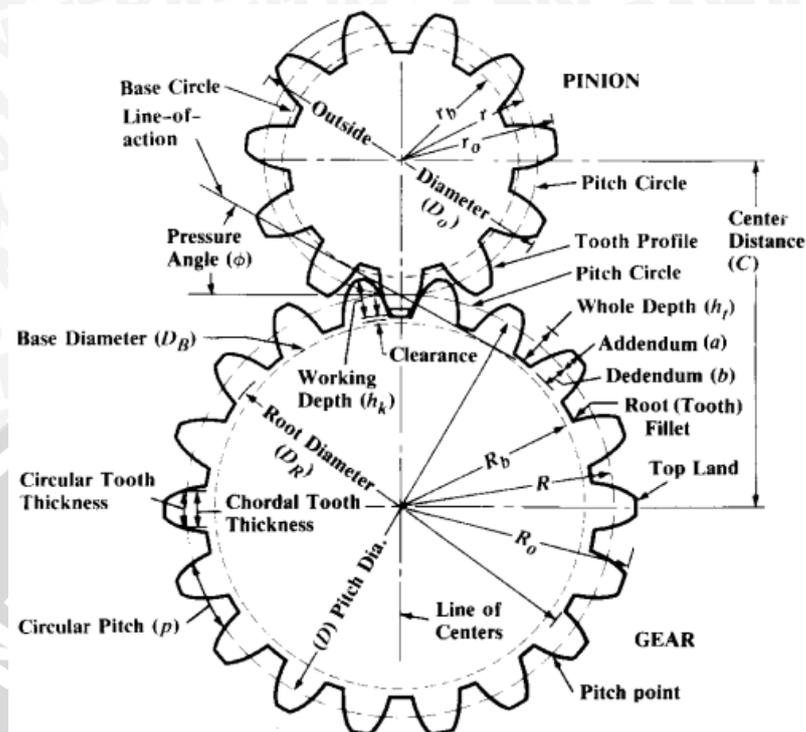
Roda gigi lurus (*spur gears*) merupakan roda gigi paling dasar dengan jalur gigi sejajar poros.



Gambar 2.23 : Roda Gigi Lurus
Sumber: Turner, (2004:17)

Dalam teori roda gigi pada umumnya dianut anggapan bahwa roda gigi merupakan benda kaku yang hampir tidak mengalami perubahan bentuk untuk jangka waktu lama. Dalam roda gigi terdapat berbagai macam elemen yang

digunakan. Berikut merupakan notasi dan definisi elemen roda gigi yang digunakan.



Gambar 2.24: Parameter Roda Gigi
Sumber: Handbook of Gear Design

1. Lingkaran Dasar (*Base Circle*)
Lingkaran dasar adalah lingkaran dimana kurva involute dari gigi-gigi terbentuk. Diameter lingkaran ini notasikan D_B .
2. Lingkaran Jarak Bagi (*Pitch Circle*)
Lingkaran pitch adalah lingkaran yang berada tepat ditengah gigi-gigi pada roda gigi. Diameter lingkaran pitch dinotasikan p .
3. Lingkaran Puncak (*Tip Circle*)
Lingkaran kepala adalah lingkaran terluar atau pada puncak gigi-gigi suatu roda gigi, biasa juga disebut addendum circle. Diameter lingkaran ini dinotasikan D_a .
4. Lingkaran Kaki (*Root Circle*)
Lingkaran kaki adalah lingkaran batas kaki gigi pada suatu roda gigi. Dikenal juga dengan nama dedendum circle, diameter lingkaran ini dinotasikan dengan D_R .
5. Addendum
Addendum adalah jarak radial diameter pitch dan diameter puncak. Dinotasikan sebagai a .

6. Dedendum

Dedendum adalah jarak radial diameter pitch dan diameter kaki. Dinotasikan sebagai b .

7. Modul

Modul adalah panjang dari diameter lingkaran *pitch* untuk tiap gigi atau perbandingan diameter lingkaran *pitch* dengan jumlah gigi pada roda gigi. Satuan untuk modul adalah milimeter. Dinotasikan sebagai m .

$$m = \frac{d}{N} \quad (\text{Sularso, 1997:214})$$

Dimana :

d = diameter lingkaran *pitch*

N = jumlah gigi

8. *Diametral pitch*

Diametral pitch adalah banyaknya gigi untuk tiap satu inchi dari diameter lingkaran *pitch*. *Diametral pitch* ini hanya merupakan harga secara hipotesis saja yang harganya tidak bisa diukur. Akan tetapi pengertiannya sangat penting untuk mempertimbangkan proporsi jumlah gigi. Dinotasikan sebagai D .

$$Pd = \frac{N}{d} \quad (\text{Sularso, 1997:215})$$

Dimana :

N = jumlah gigi

d = diameter lingkaran *pitch*

Atau

$$Pd = \frac{M}{25,4} \quad (\text{Sularso, 1997:215})$$

Dimana :

m = module

9. Tebal gigi (*tooth thickness*)

Tebal gigi adalah panjang busur pada lingkaran *pitch* diantara dua buah sisi profile pada suatu gigi.

10. Tinggi gigi (*tooth depth*)

Tinggi gigi adalah jarak radial antara lingkaran puncak dan lingkaran kaki atau jumlah dari addendum dan dedendum. Dinotasikan sebagai h_t .

11. Sudut Tekan (*Pressure Angle*)

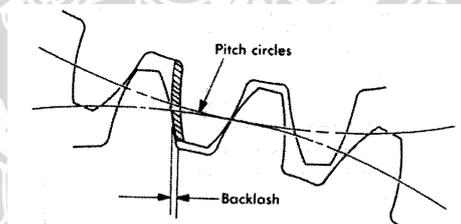
Sudut terkecil antara garis normal pada involute dan garis singgung pada lingkaran pitch di titik potong antara involute dengan lingkaran pitch. Dinotasikan sebagai ϕ .

12. Profil Gigi (*Tooth Profile*)

Profil adalah bentuk penampang dari suatu gigi pada roda gigi. Bentuk profil roda gigi yang sering digunakan adalah *involute profile*.

13. *Backlash*

Backlash adalah kelonggaran (*clearance*) atau ruang-bebas (*play*) diantara dua roda-gigi yang saling berpasangan. *Backlash* terjadi pada salah satu sisi, kontak terjadi pada sisi lainnya, apabila arah diubah, *backlash* pada sisi kontak berubah. *Backlash* yang terlalu besar disebabkan oleh gigi yang aus, gigi-gigi yang tidak tepat, ketebalan gigi yang tidak tepat atau bearing yang tidak menahan roda-gigi dengan benar. *Backlash* yang terlalu kecil menyebabkan keausan dan beban yang berlebihan pada gigi gear. Hal tersebut dapat menyebabkan kerusakan roda-gigi lebih awal.



Gambar 2.25: *Backlash*
Sumber: Shailendra, (2004:47)

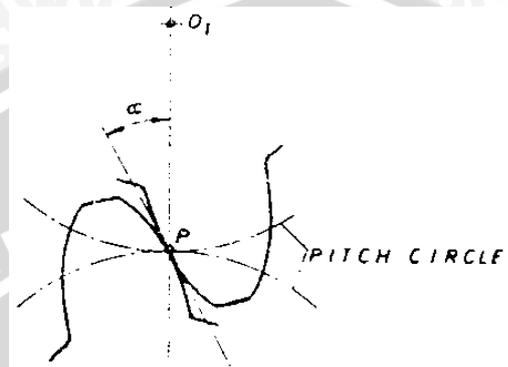
2.7.3. *Involute Profile*

Involute adalah bentuk profil gigi yang dibuat membentuk garis lengkung (kurva). Roda gigi bekerja dengan cara menempelkan pasangan gigi dari kedua komponen bergigi dengan berurutan. Agar perpindahan gerakan gigi berlangsung dengan halus tanpa gesekan yang merugikan, maka diciptakan profil gigi dengan bentuk sedemikian rupa yang disebut *involute*. Beberapa kelebihan bentuk profile gigi *involute*, yaitu:

1. Perbandingan kecepatan sepasang roda gigi, tidak akan berubah meskipun ada sedikit perubahan pada center kedua roda gigi.

2. Profil gigi *involute* batang gigi (*rack*) membentuk garis lurus, bentuk kurva *involute* yang sulit tersebut dapat dengan mudah dibentuk memakai pahat dengan profile sederhana.

Profil gigi dibentuk oleh dua buah kurva *involute* yang saling bertolak belakang sehingga arah putaran pasangan roda gigi dapat dibalik. Saat gigi mulai bersinggungan akan terjadi garis kontak sepanjang lebar gigi.



Gambar 2.26: Profil Gigi *Involute*
Sumber: Handbook of Gear Design

Selama roda gigi berputar, pada penampang akan terlihat titik kontak yang bergerak mengikuti garis lurus. Garis tersebut dinamakan garis aksi (*line of action*), yang adalah garis singgung bagi kedua lingkaran dasar. Melalui garis inilah gaya atau tekanan diteruskan oleh pasangan roda gigi sepanjang jarak kontak (*length of contact*). Oleh sebab itu disebut sudut tekan (*pressure angle*, α). Roda gigi pada umumnya dibuat dengan sudut tekan tertentu.

Berikut ini adalah beberapa jenis gigi involute yang sering digunakan yaitu:

1. *Full-Depth 20° Involute System*

Jenis profile gigi ini sangat banyak digunakan, memiliki sudut tekan 20°. Pada kaki gigi (*root profile tooth*) memiliki bagian yang lebih luas dan kuat jika dibandingkan dengan sistem yang memiliki sudut tekan lebih kecil.

2. *Full-Depth 14 $\frac{1}{2}$ ° Involute System*

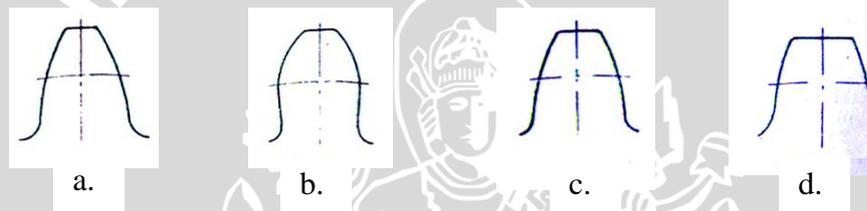
Jenis profil gigi ini memiliki sudut tekan (*pressure angle*) 14 $\frac{1}{2}$ °, merupakan salah satu sistem awal yang digunakan. Sistem ini baik digunakan selama jumlah gigi pada roda gigi cukup besar untuk menghindari *undercutting* pada proses produksinya.

3. Full-Depth 15° Involute System

Jenis profil gigi ini memiliki sudut tekan 15°, banyak digunakan di Eropa. Pada sistem 14 $\frac{1}{2}$ ° dan 15°, *undercutting* mulai terjadi ketika jumlah gigi berada dibawah 32.

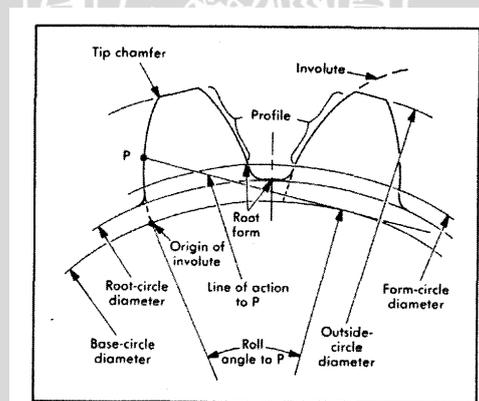
4. Stub-Tooth System.

Jenis profil ini memiliki kelebihan dapat mengurangi masalah *interference* karena memiliki addendum yang lebih pendek dan sudut tekan yang besar, biasanya 20°. Tetapi memiliki suara yang berisik ketika beroperasi, sistem ini memberikan hasil terbaik ketika jumlah gigi pada pinion kurang dari 25. Pada transmisi otomotif profile jenis banyak digunakan karena dengan bentuk gear yang kecil tetapi dengan kemampuan mentransmisikan daya yang besar.



a) Full-Depth 20°, b) Full-Depth 14 $\frac{1}{2}$ °, c) Full-Depth 15°, d) Stub-Tooth System

Gambar 2.27: Jenis-Jenis Profile Gigi *Involute*
Sumber: Handbook of Gear Design



Gambar 2.28: Profil *Involute* Gigi (*Involute Tooth Profile*)
Sumber: Shailendra, (2004:27)

2.8. Material Roda Gigi

Penentuan material dari sebuah roda gigi didasarkan pada jenis beban yang diterima, jenis roda gigi yang dibuat, daya dan putaran yang akan ditransmisikan. Jenis material yang digunakan dalam pembuatan roda gigi adalah:

1. Baja (*Steel*)

Penggunaan variasi baja dalam pembuatan *gear* sangat luas, mulai dari baja karbon sampai baja campuran. Pemilihan akan didasarkan pada nilai kekuatan, dan ukuran roda gigi yang akan dibuat.

Faktor terpenting dalam menentukan jenis baja yang akan digunakan adalah kekerasan baja tersebut. Dengan mengganti nilai kekerasan pada material roda gigi dari nilai kekerasan rendah menjadi nilai kekerasan tinggi dapat mengurangi dimensi *gear box* menjadi setengahnya, mengurangi berat dari keseluruhan *gear box*, dan ini juga akan menghemat biaya produksinya.

Dikarenakan pentingnya kekerasan pada roda gigi baja, maka roda gigi ini dibagi menjadi dua, yaitu: baja dengan perlakuan pengerasan permukaan spesimen (*surface-hardening*) dan baja dengan perlakuan pengerasan keseluruhan spesimen (*through-hardening*). Pengerasan permukaan (*surface-hardening*) menghasilkan lapisan yang keras pada permukaan roda gigi tetapi meninggalkan inti tengah tetap lunak, pengerasan permukaan memiliki dua cara dalam proses *hardening*, yaitu dengan penambahan zat (*Nitriding, Karbonitriding, Sianiding, Chromizing, Siliconizing, Boronizing*) dan tanpa penambahan zat (*FlameHardening, Induction Hardening, Laser and Electron Beam Hardening*). Sedangkan pada baja dengan pengerasan keseluruhan (*through-hardening*) mengalami pengerasan pada keseluruhan bagian spesimen. Secara umum roda gigi baja dengan pengerasan permukaan dapat menahan beban lebih besar dari roda gigi baja dengan pengerasan keseluruhan, tetapi roda gigi dengan pengerasan keseluruhan lebih tenang dalam operasinya, memiliki batas ketahanan yang tinggi dan biaya pengerjaan lebih murah.

2. Besi Tempa (*Cast Iron*).

Roda gigi yang terbuat dari besi tempa memiliki biaya produksi yang murah. Memiliki kemudahan dalam pengerjaannya sehingga roda gigi dengan bentuk rumit dapat dibuat menggunakan material jenis ini. *Cast iron* memiliki nilai kekuatan yang cenderung rendah dan lebih getas jika dibandingkan dengan baja, sehingga penggunaannya hanya terbatas untuk roda gigi yang tidak membutuhkan kekuatan tinggi.

3. Logam Bukan Besi (*Non Ferrous Metal*)

Dari keseluruhan logam *non-ferrous*, perunggu adalah salah satu logam campuran yang sering digunakan dalam pembuatan roda gigi. Perunggu

campuran tembaga dengan unsur kimia lain, biasanya dengan timah, walaupun bisa juga dengan unsur-unsur lain seperti fosfor, mangan, aluminium, atau silikon. Penggunaannya sebagai material pembuat roda gigi dikarenakan kemampuannya dalam menahan beban geser yang ditemui dalam *worm gears*. Seperti besi tempa, perunggu mudah dibentuk ketika dibutuhkan bentuk yang rumit.

4. Material Bukan Logam (*Non Metal Material*)

Penggunaan material non metal telah banyak digunakan sejak awal, penggunaan material ini terutama dikarenakan tidak menimbulkan suara pada operasi kecepatan tinggi, ketahanannya, kemampuannya menyerap getaran dan biaya produksi yang rendah. Beberapa bahan non metal yang sering digunakan sebagai bahan dari roda gigi adalah plastik hasil bentukan (*moulded plastic*) seperti nilon, *resin-bonded material*, *hard fabric* dan lain-lain.

2.8.1. Baja ASSAB 618

Baja ASSAB 618 Supreme adalah paduan baja Cr-Ni-Mo yang dibuat dengan *vacuum degassing*, yaitu proses penghilangan gas terlarut dari cairan, terutama air atau larutan berair. Baja ASSAB 618 didistribusikan dalam kondisi *prehardened*, dengan keunggulan :

- Memiliki *tensile strength* yang cukup tinggi sehingga tahan terhadap puntiran dan tarikan.
- Dengan kandungan Sulfur yang cukup rendah dan bersih dikombinasikan dengan struktur mikro yang homogen, maka didapatkan keuletan yang tinggi.
- *Hardenability* lebih baik dari *machinery steel* biasa karena distribusi komposisi kimia yang merata sampai kedalam meskipun pada ukuran yang lebih besar.
- *Ductility* dan *toughness* lebih baik, material tahan lama.

Baja ASSAB 618 memiliki komposisi : *Carbon* (C) 0,37%, *Silicon* (Si) 0,30%, *Manganese* (Mn) 1,40%, *Chromium* (Cr) 2.0%, *Nickel* (Ni) 1,0%, *Molybdenum* (Mo) 0,2%.

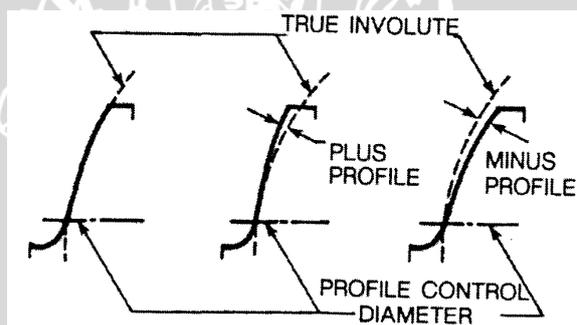
2.9. Jenis Kesalahan Geometri Pada Roda Gigi.

Pada suatu pembuatan roda gigi sangatlah tidak mungkin untuk menghasilkan suatu roda gigi tanpa cacat, oleh karena diijinkan suatu toleransi pada suatu pembuatan roda gigi.

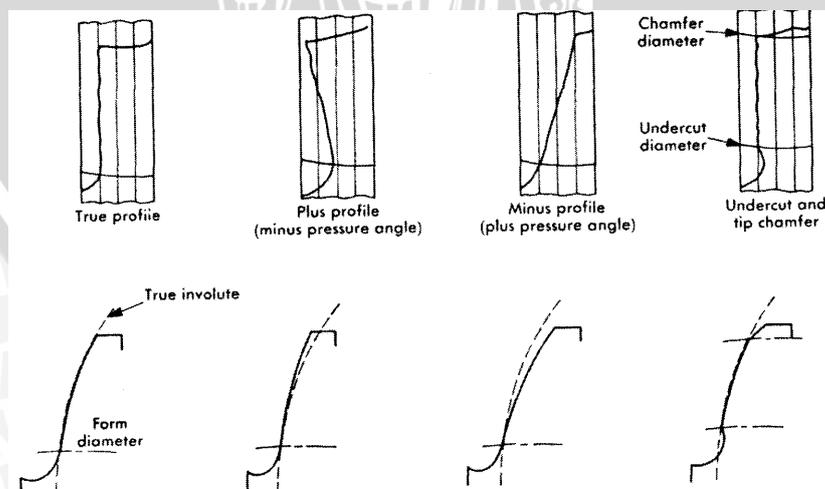
Kesalahan geometri pada roda gigi dapat didefinisikan sebagai selisih nilai atau ketidaksamaan antara bentuk atau ukuran aktual dengan bentuk atau ukuran idealnya. Berikut merupakan jenis kesalahan (*error*) pada pembuatan roda gigi :

1. Kesalahan Bentuk Profil (*Profile Error*)

Kesalahan ini diindikasikan dengan kesalahan bentuk profil aktual dari profil idealnya. Kesalahan ini biasa disebut *profile error*. Jika kurva *involute* pada roda gigi aktual lebih besar dari kurva *involute* idealnya maka disebut *plus profile*, yang akan menyebabkan sudut tekannya menurun. Jika kurva *involute* pada roda gigi aktual lebih kecil dari kurva *involute* idealnya maka disebut *minus profile*, yang akan menyebabkan sudut tekannya meningkat.



Gambar 2.29: *Profile Error Variation*
Sumber : Shailendra, (2004:8)



Gambar 2.30: *Tooth Profile Error*
Sumber: Shailendra, (2004:8)

2. *Pitch Error*

Kesalahan ini didefinisikan sebagai ketidaksesuaian jarak aktual gigi dengan jarak idealnya. *Pitch error* didefinisikan sebagai ketidaksesuaian jarak aktual pada dua gigi yang berdekatan dengan jarak idealnya. Sedangkan pengukuran pada suatu panjang yang terdiri dari beberapa pitch disebut *cumulative pitch error*.

3. *Tooth Thickness Error*

Kesalahan tebal gigi (*tooth thickness error*) didefinisikan sebagai ketidaksesuaian tebal aktual gigi dengan tebal idealnya. Kesalahan pada ketebalan gigi dapat mengakibatkan terjadinya *backlash* yang terlalu besar.

4. *Base Circle Error*

Kesalahan ini didefinisikan sebagai ketidaksesuaian antara diameter aktual lingkaran dasar (*base circle diameter*) dengan diameter teoritisnya.

5. *Tooth Alignment Error*

Kesalahan ini biasanya terjadi pada *spur gear* atau *helical gear*, saat pemotongan dilakukan terjadi gangguan sehingga jalur dari gigi tidak sesuai dengan kondisi idealnya.

6. *Radial Run-Out*

Radial run-out adalah ukuran keanehan (*eccentricity*) dari sebuah sistem gigi (*tooth system*).

7. *Axial Run-Out*

Axial run-out merupakan ukuran terjadinya goyangan (*wobble*) pada suatu roda gigi.

2.10. Hipotesa

Penggunaan arus listrik yang semakin besar akan menyebabkan percikan bunga api (*sparking*) semakin besar pula, hal ini disebabkan karena adanya medan listrik yang terjadi menyebabkan loncatan bunga api listrik (*sparking*). Percikan bunga api tersebut menumbuk bagian permukaan benda kerja menyebabkan peningkatan temperatur yang mengakibatkan pelelehan material pada permukaan benda kerja, hal ini akan berpengaruh pada kepresisian hasil pemotongan. Sehingga penambahan besar arus listrik akan meningkatkan nilai penyimpangan geometri profil gigi *involute* roda gigi, dalam hal ini dinyatakan sebagai *profile error involute*.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan dengan menggunakan metode eksperimental. Metode ini dijalankan dengan pengamatan secara langsung untuk mengetahui pengaruh parameter pemotongan yang berupa Besar Arus Listrik pada *Wire EDM* terhadap terhadap *Profile Error Involute* Roda Gigi Lurus.

3.2. Variabel Penelitian

3.2.1. Variabel Bebas (*Independent Variable*)

Variabel bebas adalah variabel yang besar nilainya ditentukan sebelum penelitian. Variabel bebas divariasikan untuk mendapatkan hubungan antara variabel bebas dengan variabel terikat sehingga tujuan penelitian dapat tercapai. Dalam penelitian ini variabel bebas yang digunakan adalah *arus listrik* dengan variasi 3 Ampere, 4 Ampere, 5 Ampere, 6 Ampere, dan 7 Ampere.

3.2.2. Variabel Terikat (*Depent Variable*)

Variabel terikat adalah variabel yang besar nilainya bergantung pada variabel bebas dan diketahui setelah penelitian dilakukan. Dalam penelitian ini variabel terikat yang diamati adalah *profile error involute* Roda Gigi Lurus (*Spur Gear*).

3.2.3. Variabel Terkontrol (*Controlled Variabel*)

Variabel terkontrol adalah variabel yang berfungsi sebagai pembanding yang besarnya ditentukan oleh peneliti. Dalam penelitian ini variabel terkontrol yang digunakan adalah *Pulse Time-Off* = 1 μ s, dan *Wire Tension* = 8.

3.3. Bahan dan Peralatan Penelitian.

3.3.1. Bahan

- Baja paduan ASSAB 618, setara dengan baja AISI 4140.
 - Komposisi:

<i>Carbon</i> (C)	: 0,37%
<i>Silicon</i> (Si)	: 0,30%

Manganese (Mn) : 1,40%

Chromium (Cr) : 2.0%

Nickel (Ni) : 1,0%

Molybdenum (Mo) : 0,2%

- *Tensile Strength* : 1080 N/mm²
- *Yield Strength* : 990 N/mm²

3.3.2. Peralatan

- Mesin Wire EDM Mitsubishi BA-8

Spesifikasi:

- *Maximum workpiece dimensions* : 700 x 550 x 115 (mm)
- *Maximum workpiece weight* : 500 kg
- *Table dimensions* : 540 x 430 (mm)
- *Machining range X – Y* : 320 x 250 (mm)
- *Maximum Z – Axis height* : 220 mm
- *U – V Axis travel (from centre)* : ± 32 mm
- *Taper angle @ thickness* : 15° @ 100 mm
- *Wire diameter possible* : 0,1 – 0,3 mm
- *Filtration elements* : Paperfilter
- *Filtered particle size* : 3
- *Water purifier* : 18 ℓ
- *Filter tank capacity* : 440 ℓ
- *Dielectric chiller unit* : Unit Cooler
- *Machine system dimensions* : 1764 x 2402 mm
- *Machine installed height* : 2037 mm
- *Machine system weight* : 1800 kg
- *Power requirement* : 200/220 V



Gambar 3.1: Mesin Wire EDM Mitsubishi BA-8
Sumber: Dokumentasi Pribadi

- Jangka Sorong
Untuk mengukur dimensi benda kerja.



Gambar 3.2: Jangka Sorong
Sumber: Dokumentasi Pribadi

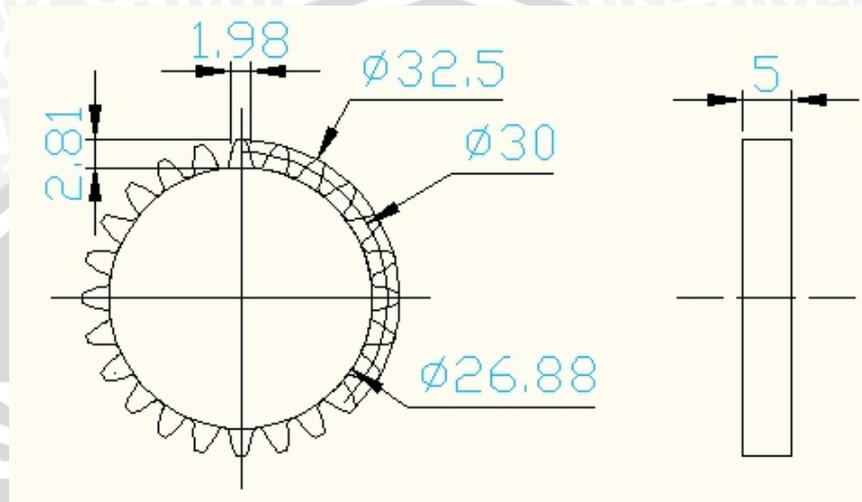
- Foto Makro
Digunakan untuk mengambil gambar penampang benda kerja.
- *Software* AutoCAD 2009
Untuk pembuatan dan perancangan gambar kerja.

3.3.3. Benda Kerja

Benda kerja yang akan dibuat merupakan Roda Gigi lurus dengan profil gigi involute yang sesuai dengan *Japan Industrial Standart* (JIS) nomor B 1701-1973 tentang “*Involute Gear Tooth Profile and Dimension*”, memiliki spesifikasi:

Modul m : 1,25 mm
Jumlah gigi z : 24

Sudut tekan α	: 20°
Diameter luar d_a	: 32,5 mm
Diameter pitch d	: 30 mm
Diameter dasar d_f	: 26,8 mm
Tinggi gigi h	: 2,8 mm
Tebal gigi s	: 1,99 mm



Gambar 3.3: Gambar Benda Kerja

3.4. Prosedur Penelitian

3.4.1. Proses Pengambilan Spesimen

1. Menyiapkan gambar pemotongan sesuai dengan JIS nomor B 1701 tahun 1973 “*Involute Gear Tooth Profile and Dimension*”.
2. Menyiapkan benda kerja yang akan digunakan yaitu baja paduan ASSAB 618 dengan tebal 10 mm.
3. Menyiapkan mesin *Wire EDM* Mitsubishi BA-8.
4. Melakukan pemotongan sesuai dengan parameter – parameter yang telah ditentukan.

3.4.2. Proses Pengambilan Data

1. Membersihkan hasil pemotongan
2. Melakukan pengambilan gambar foto pada penampang profil gigi *involute* dengan *foto makro* untuk setiap spesimen.
3. Melakukan pengukuran dimensi benda kerja dengan menggunakan jangka sorong.

4. Melakukan pengukuran hasil pengambilan gambar yang menggunakan *foto makro* dengan program *AutoCAD 2009*.
5. Pengambilan dan pengolahan data menggunakan skala, dan pengukuran penyimpangan yang terjadi menggunakan *software AutoCAD 2009*.
6. Melakukan pembahasan data.
7. Penarikan kesimpulan.

3.5. Waktu dan Tempat Penelitian

1. Tempat Penelitian

Laboratorium Produksi Politeknik Negeri Malang, untuk pengerjaan pemotongan spesimen menggunakan *Wire EDM*. Dan Laboratorium Material ITN Malang, untuk melakukan penelitian menggunakan *foto makro*.

2. Waktu Penelitian

Waktu penelitian dilakukan mulai akhir November - Desember 2011.

3.6. Rancangan Pengolahan dan Analisa Data.

Pada penelitian ini menggunakan model analisa varian satu arah dengan pengulangan 3 kali pada tiap interaksi. Dengan analisa varian satu arah ini akan diketahui apakah variasi arus listrik pada proses *Wire EDM* berpengaruh terhadap *profile error involute* roda gigi lurus.

Tabel 3.1 Rancangan Penelitian

	Involute ke	Arus Listrik (Ampere)				
		3	4	5	6	7
Profile Error (mm)	1	X ₁₁	X ₂₁	X ₃₁	X ₄₁	X ₅₁
	2	X ₁₂	X ₂₂	X ₃₂	X ₄₂	X ₅₂
	3	X ₁₃	X ₂₃	X ₃₃	X ₄₃	X ₅₃
	4	X ₁₄	X ₂₄	X ₃₄	X ₄₄	X ₅₄
	5	X ₁₅	X ₂₅	X ₃₅	X ₄₅	X ₅₅
	6	X ₁₆	X ₂₆	X ₃₆	X ₄₆	X ₅₆
Jumlah						
Rata - rata						

3.7. Analisa Varian Satu Arah

Untuk menganalisa hasil penelitian digunakan analisis ragam satu arah, dimana akan menguji apakah hasil penelitian disebabkan oleh variasi *besar arus listrik*.

Untuk menentukan apakah sebagian keragaman hasil penelitian disebabkan oleh perbedaan variasi *besar arus listrik*, dilakukan uji hipotesis :

$$H_0 : \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_i = 0$$

H_1 : sekurang-kurangnya satu α_i tidak sama dengan nol.

Hasil perhitungan dalam analisis varian satu arah dengan interaksi dapat diringkas seperti pada tabel.

Tabel 3.2 Analisa Varian Satu Arah

Sumber Keragaman	Derajat Bebas (db)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F_{hitung}	F_{kritis}
Pengaruh A	$r - 1$	JKA	$S_1^2 = \frac{JKA}{k - 1}$	$\frac{S_1^2}{S_2^2}$	Dari tabel uji F
Galat	$r(n - 1)$	JKG	$S_2^2 = \frac{JKG}{k(n - 1)}$		
Total	$nk - 1$	JKT			

- Faktor Koreksi

$$FK = \frac{[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k Y_{ij}^2]^2}{\sum ni}$$

- Jumlah kuadrat total

$$JKT = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k Y_{ij}^2 - FK$$

- Jumlah kuadrat perlakuan

$$JKP = \frac{\sum_{j=1}^k [\sum_{i=1}^n Y_{ij}^2]}{ni} - FK$$

- Jumlah kuadrat galat

$$JKG = JKT - JKP$$

- Kuadrat tengah perlakuan

$$S_1^2 = \frac{JKP}{k - 1}$$

- Kuadrat tengah galat

$$S_2^2 = \frac{JKG}{k(n - 1)}$$

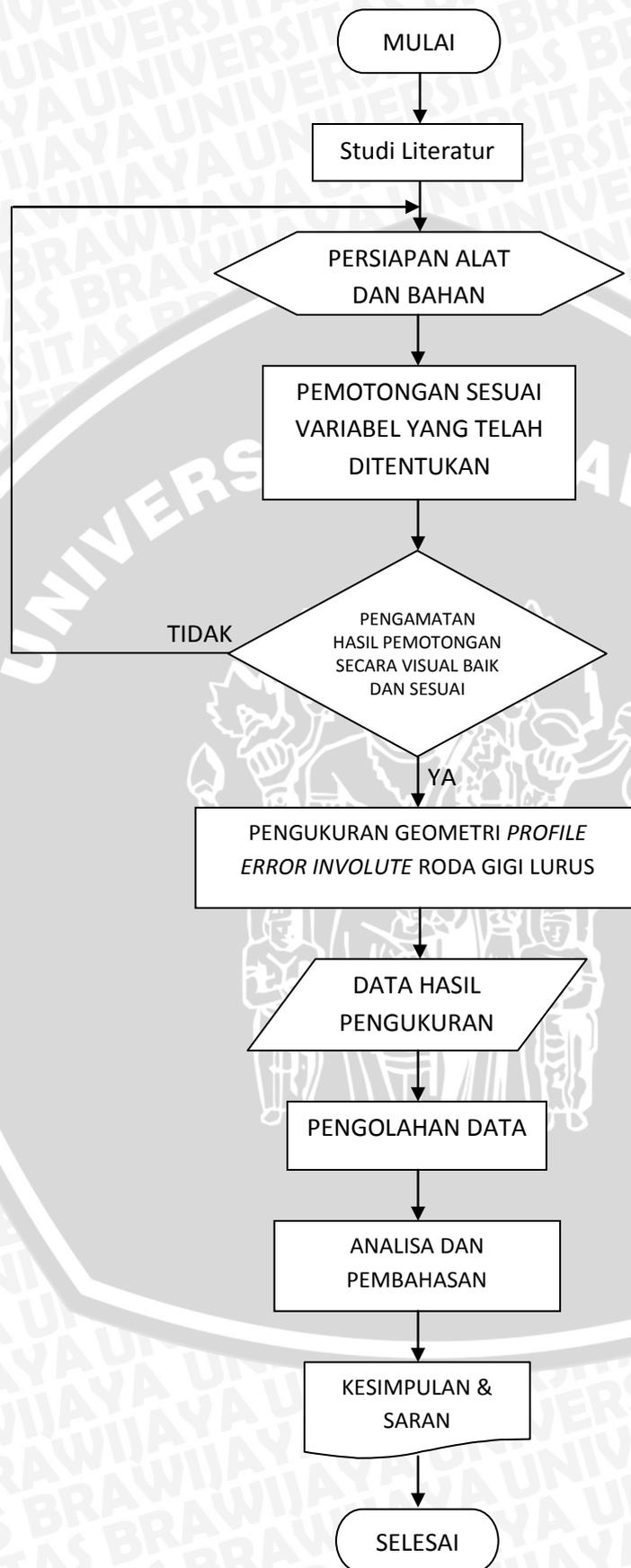
Dari rumus di atas dapat dicari F_{hitung} yang digunakan untuk menentukan ada atau tidaknya pengaruh variabel bebas terhadap variabel terkontrol dengan metode uji F.

- $F_{hitung} = \frac{S_1^2}{S_2^2}$

Kesimpulan yang didapat dari uji F adalah sebagai berikut:

1. Bila $FA_{hitung} > FA_{tabel}$, maka H_0 ditolak dan H_1 diterima. Berarti faktor A (besar arus listrik) berpengaruh terhadap *profile error involute* pada pembuatan Roda Gigi Lurus menggunakan *Wire EDM*.

3.8 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.4: Diagram Alir Penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Hasil Pengukuran

Untuk mendapatkan data *profile error involute* hasil pemotongan menggunakan *Wire EDM*, maka digunakan *foto makro* dan *software Autocad 2009*.

Setelah dilakukan pengambilan data, maka diperoleh data sebagai berikut :

Tabel 4.1 Data Penyimpangan *Profile Involute*

	Involute ke	Arus Listrik (Ampere)				
		3	4	5	6	7
Profile Error Involute (mm)	1	0,0889	0,08987	0,07307	0,1089	0,1394
	2	0,0948	0,07147	0,1100	0,1264	0,1293
	3	0,0862	0,09467	0,1095	0,1171	0,1155
	4	0,0939	0,1046	0,1067	0,12873	0,1318
	5	0,0947	0,1125	0,1127	0,1133	0,11667
	6	0,0858	0,0912	0,1079	0,1198	0,1207
Jumlah		0,5443	0,564	0,6199	0,7143	0,7534
Rata - rata		0,0907	0,094	0,1033	0,1190	0,1256

4.2. Pengolahan Data

4.2.1. Analisa Statistik

Setelah diperoleh data dari pengukuran penyimpangan geometri *profile involute*, maka dilakukan analisa varian satu arah untuk mengetahui apakah variasi besar arus listrik akan berpengaruh terhadap *profile error involute* yang menggunakan *Wire EDM*.

Hipotesis dari penggunaan variasi besar arus listrik terhadap penyimpangan geometri profil gigi *involute* pemotongan menggunakan *Wire EDM* adalah sebagai berikut:

$$a) H_0 : \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5$$

H_0 menyatakan bahwa setiap variasi besar arus listrik pada pemotongan geometri profil involute menggunakan *Wire EDM* tidak akan berpengaruh terhadap *profile error involute* yang terjadi.



$$H_1 : \alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3 \neq \alpha_4 \neq \alpha_5$$

H_1 menyatakan bahwa setiap variasi besar arus listrik pada pemotongan geometri profil *involute* menggunakan *Wire EDM* akan berpengaruh terhadap *profile error involute* yang terjadi.

- b) Pengujian dilakukan dengan menggunakan taraf nyata $\alpha = 0,05$
 c) Wilayah kritik $f > 2,76$

Dari tabel 4.1 diperoleh perhitungan analisis varian satu arah sebagai berikut:

- Jumlah seluruh perlakuan :

$$\begin{aligned} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k y_{ij} \\ &= 0,0889 + 0,0948 + 0,0862 + \dots + 0,1207 \\ &= 3,1962 \end{aligned}$$

- Jumlah kuadrat seluruh perlakuan :

$$\begin{aligned} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k y_{ij}^2 \\ &= (0,0889)^2 + (0,0948)^2 + (0,0862)^2 + \dots + (0,1207)^2 \\ &= 0,349 \end{aligned}$$

- Faktor Koreksi :

$$\begin{aligned} FK &= \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k y_{ij} \right]^2 / n \times k \\ &= \frac{(3,1962)^2}{6 \times 5} \\ &= 0,3405 \end{aligned}$$

- Jumlah Kuadrat Total (JKT) :

$$\begin{aligned} JKT &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k y_{ij}^2 - FK \\ &= 0,349 - 0,3405 \\ &= 0,00854 \end{aligned}$$

- Jumlah Kuadrat Perlakuan (JKP):

$$\begin{aligned} JKP &= \frac{\sum_{j=1}^k [\sum_{i=1}^n y_{ij}]^2}{n} - FK \\ &= \frac{(0,5443)^2 + (0,564)^2 + (0,6199)^2 + (0,7143)^2 + (0,7534)^2}{6} - 0,3405 \\ &= 0,00561 \end{aligned}$$

- Jumlah Kuadrat Galat (JKG):

$$\begin{aligned} JKG &= JKT - JKP \\ &= 0,00854 - 0,00561 \\ &= 0,002932 \end{aligned}$$

Nilai varian dari perlakuan adalah sebagai berikut :

- Kuadrat Tengah Perlakuan :

$$\begin{aligned} s_1^2 &= \frac{JKP}{k - 1} \\ &= \frac{0,00561}{5 - 1} \\ &= 0,002932 \end{aligned}$$

- Kuadrat Tengah Galat :

$$\begin{aligned} s_2^2 &= \frac{JKG}{k(n - 1)} \\ &= \frac{0,002881}{5(6 - 1)} \\ &= 0,0001172 \end{aligned}$$

Nilai F hitung dari sumber keragaman adalah sebagai berikut :

- F Hitung

$$f_{hitung} = \frac{s_1^2}{s_2^2}$$

$$= \frac{0,001402}{0,0001172}$$

$$= 11,9592$$

Tabel 4.2. Data Hasil Analisis Varian Satu Arah

Sumber Keragaman	Jumlah Kuadrat	Derajat Bebas	Kuadrat Tengah Rata-Rata	f Hitung	f Tabel
Perlakuan	0,00561	4	0,001402	11,9592	2,76
Galat	0,002932	25	0,0001172		
Total	0,008542	29			

Berdasarkan hasil perhitungan analisa varian satu arah yang ditunjukkan pada tabel 4.2 diatas, dengan mengambil tingkat keyakinan 95% ($\alpha = 5\%$), maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

$F_{hitung} > F_{tabel}$, maka H_0 ditolak dan H_1 diterima.

Ini menyatakan bahwa besar arus listrik berpengaruh terhadap *profile error involute* pada proses *Wire EDM*.

Dari data tabel 4.1. dihitung rata – rata penyimpangan yang terjadi pada setiap variasi besar arus listrik yang dijelaskan pada tabel berikut :

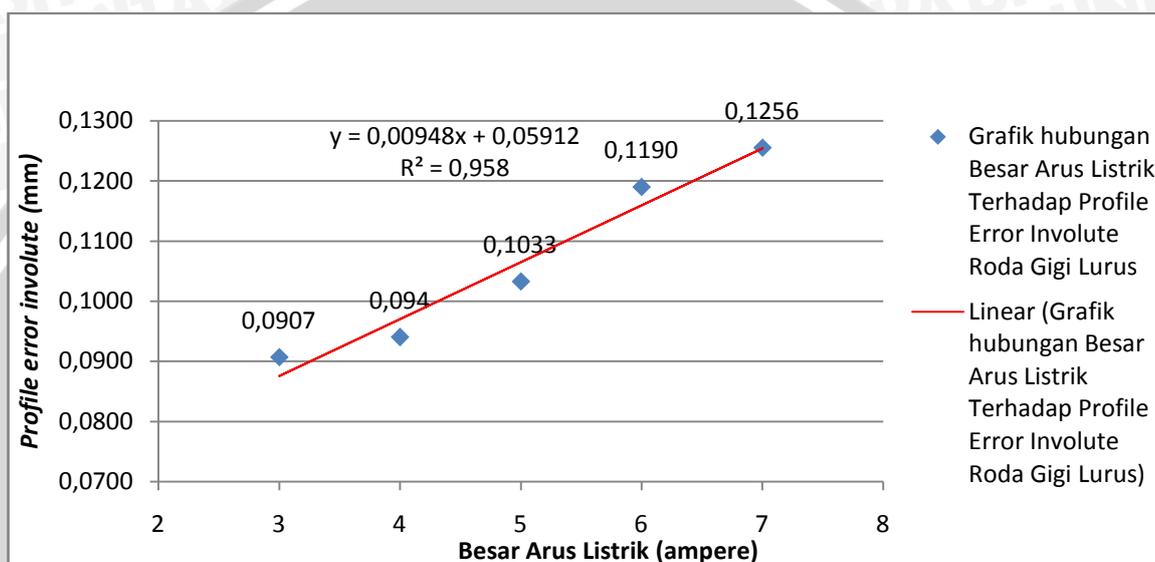
Tabel 4.3. Rata – rata besar *profile error involute*

No	<i>Profile Error Involute</i> (mm)	Besar Arus Listrik (Ampere)
1	0,0907	3
2	0,094	4
3	0,1033	5
4	0,119	6
5	0,1256	7

4.3. Pembahasan

Dari hasil pengolahan data menggunakan analisa varian satu arah didapatkan bahwa perubahan nilai besar arus listrik berpengaruh terhadap *profile error involute* roda gigi lurus menggunakan *Wire EDM*. Ini dibuktikan dengan nilai $F_{hitung} > F_{tabel}$.

Dari hasil analisa diketahui bahwa nilai variasi arus listrik akan mempengaruhi kepada *profile error involute* roda gigi lurus. Oleh karena itu grafik yang digunakan adalah grafik hubungan besar arus listrik terhadap *profile error involute*.



Gambar 4.1 : Grafik Linear Hubungan Besar Arus Listrik Terhadap *Profile Error Involute* Roda Gigi Lurus.

Pada gambar 4.1. menunjukkan grafik untuk model regresi linier dan juga menunjukkan persamaan garis liniernya, yaitu :

$$Y = 0,00948 X + 0,05912 \quad (4.1)$$

Keterangan :

Y = *Profile Error Involute*

X = Besar Arus Listrik

Untuk mengetahui taraf presisi atau ketepatan garis regresi digunakan koefisien determinasi (R^2). Nilai R^2 berkisar 1-100% semakin nilai mendekati 100% menunjukkan semakin tinggi korelasi antara arus listrik dan kekasaran permukaan. Artinya, bahwa semakin besar koefisien determinasi yang terjadi maka akan semakin kuat pula presisi garis regresinya. Regresi merupakan suatu metode analisis statistik yang mempelajari pola hubungan antara dua atau lebih variabel.

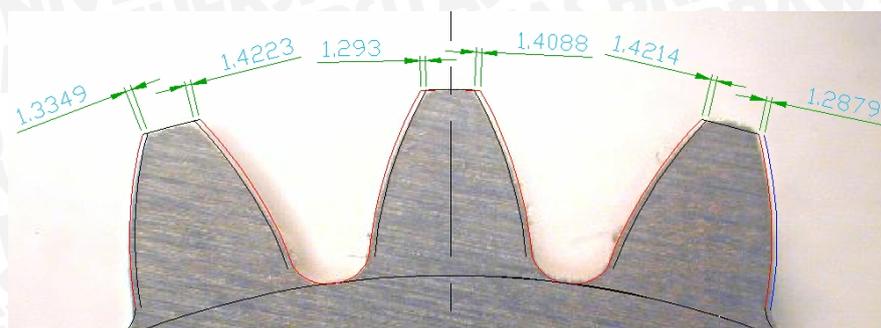
Koefisien determinasi menjelaskan besarnya variasi respon (y) atau variabel terikat yang dapat dijelaskan prediktor (x) atau variabel bebas.

Nilai R^2 sebesar 0,958, adalah koefisien determinasi model regresi linier sebesar 95,8%. Artinya, 95,8 % variasi sampel besar nilai penyimpangan *profile error involute* pada proses *Wire EDM* dijelaskan oleh pengaruh variabel besar arus listrik yang digunakan pada proses pemotongan. Sedangkan 4,2 % dipengaruhi oleh faktor-faktor pemotongan yang tidak diteliti pada saat proses pemotongan menggunakan *Wire EDM*, seperti *bicycle effect*. *Bicycle effect* merupakan suatu fenomena terjadi kesalahan pemotongan pada bentuk melengkung atau sudut, lintasan yang dilalui kawat tidak sesuai dengan program yang telah dimasukan. *Bicycle effect* ini biasanya disebabkan oleh *wire lag*. Ini dikarenakan kawat keluar dari jalur yang seharusnya dilalui, sehingga memotong bagian yang seharusnya tidak dipotong. *Wire lag* dapat terjadi akibat percikan listrik yang terlalu besar, tegangan penarikan kawat yang rendah, *gap voltage* yang terlalu sempit, jarak *nozzle* cairan dielektrik yang terlalu jauh dan kecepatan pemakanan terlalu tinggi.

Pada grafik 4.1 dapat dilihat bahwa hubungan antara parameter yang digunakan yaitu besar arus listrik dengan *profile error involute*, dimana nilai pada sumbu Y merupakan nilai dari *profile error involute* yang dipengaruhi oleh nilai pada sumbu X yaitu besar arus listrik. Pada penggunaan besar arus listrik 3 ampere, 4 ampere, 5 ampere, 6 ampere, dan 7 ampere masing – masing terjadi rata-rata penyimpangan sebesar 0,0907 mm, 0,094 mm, 0,1033 mm, 0,119 mm, dan 0,1256 mm, secara umum dapat dilihat bahwa seiring dengan peningkatan nilai pada sumbu X maka nilai pada sumbu Y akan semakin meningkat.

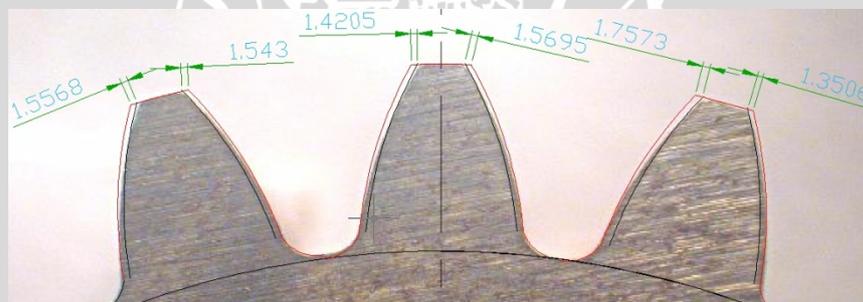
Pada penggunaan variasi besar arus listrik sebesar 3 ampere *profile error involute* yang terjadi rata-rata sebesar 0,0907 mm. Hal ini disebabkan besar arus listrik yang digunakan mempengaruhi nilai *profile error involute* gigi pada spesimen. Penggunaan arus listrik yang semakin besar pada tegangan listrik akan menyebabkan percikan bunga api listrik (*sparking*) semakin besar pula, mengakibatkan pergerakan aliran elektron untuk menumbuk bagian permukaan benda kerja semakin cepat, sehingga terjadi peningkatan temperatur yang mengakibatkan pelelehan spesimen pada area permukaan benda kerja yang dipotong, hal ini mempengaruhi terhadap hasil pemotongan yang direncanakan. Ini dapat dibuktikan dengan *profile error involute* yang terjadi tidak terlalu besar dan

hampir terjadi diseluruh permukaan sisi *involute*, seperti terlihat pada gambar 4.2 berikut:

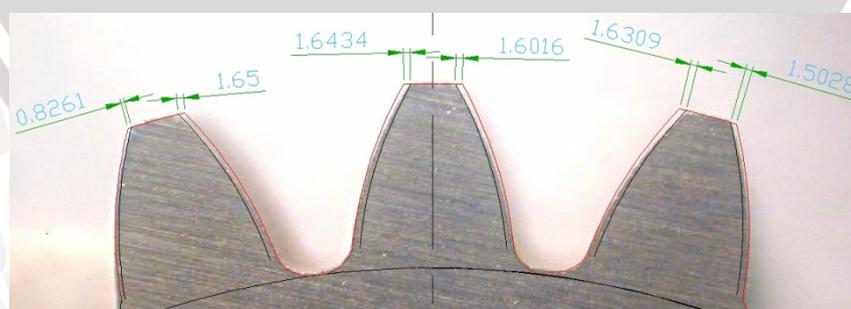


Gambar 4.2: Penampang Profil *Involute* Dengan Variasi Arus Listrik 3 Ampere

Pada variasi besar arus listrik pada 4 ampere dan 5 ampere, penyimpangan yang terjadi rata-rata sebesar 0,094 dan 0,1033 mm. Penyimpangan yang terjadi pada variasi ini, *profile error involute* yang terjadi lebih besar daripada variasi sebelumnya dikarenakan arus listrik yang diterapkan menimbulkan *sparking* yang terjadi antara benda kerja dan elektrode kawat menjadi semakin besar yang akan mengakibatkan area pengerosian yang lebih besar pula. Pada variasi ini *profile error involute* juga terjadi pada seluruh sisi *involute*, seperti terlihat pada gambar 4.3 dan 4.4 sebagai berikut:

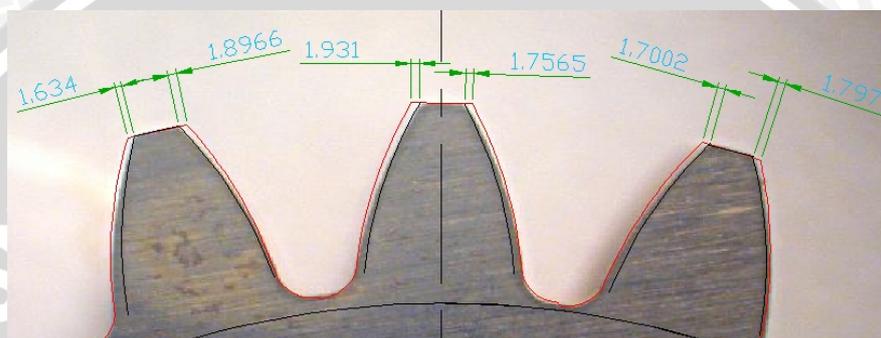


Gambar 4.3: Penampang *Profile Involute* Dengan Variasi Arus Listrik 4 Ampere



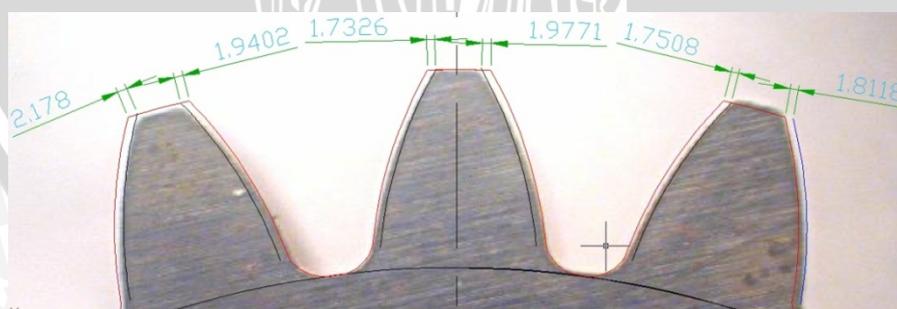
Gambar 4.4: Penampang *Profile Involute* Dengan Variasi Arus Listrik 5 Ampere

Pada variasi besar arus listrik 6 ampere *profile error involute* gigi pada roda gigi lurus yang terjadi rata-rata sebesar 0,1190 mm, diakibatkan oleh besarnya percikan api listrik antara elektroda kawat dan benda kerja, sehingga percikan lebih mudah terjadi dan energi pemotongan lebih besar yang mengakibatkan pengerosian benda kerja lebih besar yang mengakibatkan terjadinya penyimpangan. Pada saat penyimpangan pemotongan ini terjadi maka elektroda kawat akan memotong benda kerja dengan ukuran yang tidak sama dengan ukuran yang telah direncanakan sebelumnya. Pada gambar 4.5 dapat dilihat bahwa penyimpangan terbesar berada pada ujung dari sisi *involute*.



Gambar 4.5: Penampang Profil *Involute* Dengan Variasi Arus Listrik 6 Ampere

Sedangkan pada variasi 7 ampere terlihat rata-rata *profile error involute* yang terjadi sebesar 0,1256 mm. Pada variasi ini *profile error* selain diakibatkan oleh percikan bunga api listrik antara benda kerja dan elektroda kawat, juga oleh terjadinya pengerosian permukaan benda kerja yang terjadi paling besar. Hal ini dapat ditunjukkan oleh gambar 4.6, pada gambar terlihat bahwa penyimpangan terbesar terjadi pada ujung-ujung dari sisi *involute*.



Gambar 4.6: Penampang Profil *Involute* Dengan Variasi Arus Listrik 7 Ampere

Pada variasi arus listrik 7 ampere terlihat penyimpangan profil yang terjadi lebih besar dari pada yang terlihat variasi-variasi sebelumnya, ini dikarenakan *sparking* antara elektroda kawat dan benda kerja paling besar diantara variasi-

variasi sebelumnya sehingga pengerosian area permukaan benda kerja yang terjadi paling tinggi, yang berdampak pada nilai *profile error involute* yang paling besar. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa *profile error involute* spesimen yang paling banyak terjadi adalah *minus profile*, dikarenakan kurva *involute* pada roda gigi aktual lebih kecil dari kurva *involute* idealnya.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dan pembahasan pada bab sebelumnya dapat disimpulkan bahwa,

- Variasi besar arus listrik yang digunakan pada proses *Wire EDM* berpengaruh nyata terhadap *profile error involute*. Berdasarkan hasil penelitian didapatkan bahwa nilai *profile error involute* meningkat seiring dengan bertambahnya besar arus listrik.
- Nilai *profile error involute* terkecil sebesar 0,0907 mm didapat pada variasi besar arus listrik 3 ampere yang merupakan variasi terkecil yang digunakan. Penyimpangan terbesar sebesar 0,1256 mm didapat pada variasi arus listrik sebesar 7 ampere yang merupakan variasi terbesar yang digunakan.
- *Profile Error Involute* yang terjadi pada kurva *involute* gigi adalah *minus profile*.

5.2. Saran

- Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh parameter besar arus listrik dan jenis elektroda terhadap kepresisian geometri benda kerja pada *Wire EDM*.
- Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh parameter besar arus listrik terhadap laju pengerjaan benda kerja.
- Perlu dilakukan penelitian terhadap permukaan lapisan atau layer yang terjadi pada hasil produk pemotongan yang menggunakan proses *Wire EDM*.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 1973. *Japan Industrial Standart B 1701 Involute Gear Tooth Profile and Dimension*. Japan: Japanese Standart Asiciation.
- Anonim. 2011. *EDM Wire Tutorial*. USA: Makino Inc.
http://www.makino.com/about/article/2-1-2008/EDM_Wire_Tutorial
- Abdel, Hassan and Gawad El-Hofy. 2005. *Advanced Machining Processes*. New York : McGraw Hill International.
- Jain, Shailendra and Syed Samsul Amin. 2004. *Gear Metrology*. Department of Mechanical Engineering and Engineering Science The University of North Carolina at Charlotte 9201 University City Blvd. Charlotte, NC 28223-0001 USA.
<http://www.coe.uncc.edu/.../reports/GearMetrology>
- Jain, Vijay K. 2002. *Advanced Machining Processes*. New Delhi : Allied Publisher PVT. Limited.
- Junaidar, Adrian. 2004. *Pengaruh Besar Penarikan Kawat Dan Arus Listrik Terhadap Bicycle Effect Pada Wire Electric Discharge Machine (WEDM)*. Malang : Jurusan Mesin FT Unibraw, 2004.
- Mahapatra, S.S & Amar Patanaik. 2000. *OptimatiOn Of Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) Process Using Taguchi Method*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology.
- Maitra, G.M. 1985. *Handbook Of Gear Design*. New Delhi : Mc Graw Hill.
- Michalec, George. 2009. *Elements of Metric Gear Technology*. Designatronics, Inc.
<http://www.qtcgears.com/Q410/PDF/techsecindex.pdf>
- Pandey, PC & H.S Shan. 1983. *Modern Machining Processes*. New Delhi : McGraw Hill.
- Port, John. 1992. *What Is Wire EDM ?*; Brother Industries and Charmile.
<http://www.jacksmachine.com/pdf/what-is-wire-edm.pdf>

Raksiri, Chana. 2010. *CNC Wire-Cut Parameter Optimized Determination of the Stair Shape Workpiece*; World Academy of Science, Engineering and Technology.

Sommer, Carl & Steve Sommer, M.E. 2000. *Complete EDM Handbook*. Texas: Advance Publishing.

Tandi, Fredi Rein. 2000. *Analisis Pengaruh Parameter Pemesinan Terhadap Ketelitian Ukuran Dan Kekasaran Permukaan Pada Proses Wire Electric Discharge Machine*. Malang : Jurusan Mesin FT Unibraw, 2000.

Turner, Frederick W. 2004. *Gear Reference Guide*. Berg Manufacturing.

W.J. Hsue, Y.S. Liao, 1997. *Fundamental geometry analysis of wire electrical discharge machining in corner cutting*. International Journal of Machine Tools & Manufacture.

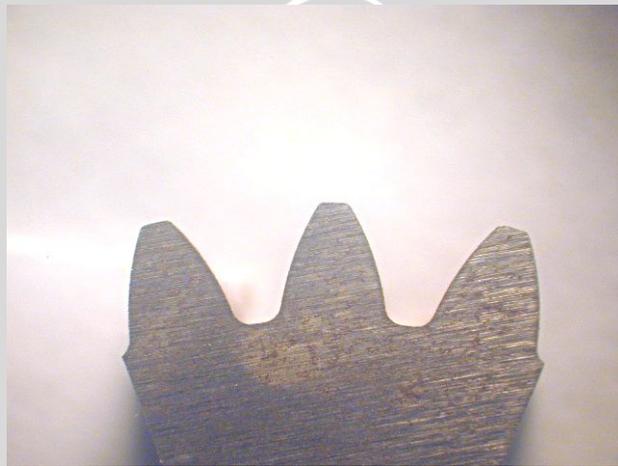
<http://ntur.lib.ntu.edu.tw/bitstream/246246/86961/1/05.pdf>



LAMPIRAN 1 FOTO SPESIMEN



Spesimen dengan variasi arus listrik 3 *ampere*



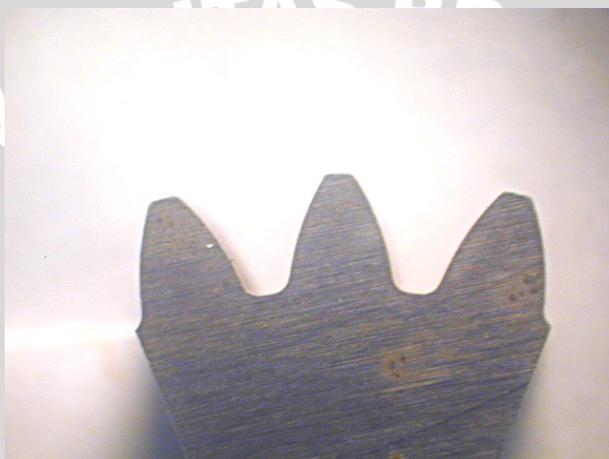
Spesimen dengan variasi arus listrik 4 *ampere*



Spesimen dengan variasi arus listrik 5 *ampere*



Spesimen dengan variasi arus listrik 6 *ampere*



Spesimen dengan variasi arus listrik 7 *ampere*



LAMPIRAN 2 SURAT KETERANGAN PENELITIAN



**KEMENTERIAN PENDIDIKAN NASIONAL
POLITEKNIK NEGERI MALANG**

Jl. Soekarno Hatta No.9 Malang 65141
Telp (0341) 404424 – 404425 Fax (0341) 404420
<http://www.poltek-malang.ac.id>



SURAT KETERANGAN

Nomor : 316/K13/TM/2011

Dengan hormat,

Yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama : A. Agus Hardjito, ST., M.T.

NIP : 19610822 198801 1 001

Jabatan : Kepala Produksi Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang

Dengan ini menerangkan dengan sesungguhnya bahwa :

Nama : Nugroho Bagus P.

NIM : 0710620024

Jurusan : Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang

Telah menggunakan sarana Laboratorium Produksi (*CNC Wire Cutting*) di Jurusan Mesin Politeknik Negeri Malang untuk penelitian yang dilaksanakan pada tanggal 7 Desember 2011 s/d 9 Desember 2011

Demikian keterangan ini dibuat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya



Imam Mashudi, B.Eng(Hons),M.T
NIP 19631110 199103 1 003

Hormat kami,

A. Agus Hardjito, S.T.,M.T.
NIP 19610822 198801 1 001

FRM.RME.02.01.00





INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI JURUSAN TEKNIK MESIN
LABORATORIUM PENGUJIAN MATERIAL
Jl. Raya Karanglo Km. 2 Telp. (0341) 417636 Ext. 511 Malang

Nama : Nugroho Bagus P.
Nim : 0710620024
Jurusan/ Prodi : Teknik Mesin UB



Kuat Arus 3 Ampere



Kuat Arus 6 Ampere



Kuat Arus 4 Ampere



Kuat Arus 7 Ampere



Kuat Arus 5 Ampere

Malang, 12 Desember 2011
Laboratorium



L. Komahito Astana Widi, ST . MT
NIP. Y : 1030400405

