

**PENGARUH VARIASI WIRE TENSION DAN WIRE FEED
RATE PADA WIRE EDM TERHADAP CORNER ERROR
HASIL PEMOTONGAN BAJA PADUAN ASSAB 618**

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh :

SHALAHUDDIN SHANTIKA P.

NIM. 0710623005 - 62

KEMENTERIAN PENDIDIKAN NASIONAL

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2011

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH VARIASI *WIRE TENSION* DAN *WIRE FEED RATE* PADA *WIRE EDM* TERHADAP *CORNER ERROR* HASIL PEMOTONGAN
BAJA PADUAN ASSAB 618**

SKRIPSI
Konsentrasi Teknik Produksi

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

SHALAHUDDIN SHANTIKA PUTRA
NIM. 0710623005-62

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Achmad As'ad Sonief, MT.
NIP. 19591128 198710 1 001

LEMBAR PERSETUJUAN

PENGARUH VARIASI *WIRE TENSION* DAN *WIRE FEED RATE* PADA *WIRE EDM* TERHADAP *CORNER ERROR* HASIL PEMOTONGAN
BAJA PADUAN ASSAB 618

SKRIPSI

Konsentrasi Teknik Produksi

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun Oleh:

SHALAHUDDIN SHANTIKA PUTRA

NIM. 0710623005-62

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 26 Januari 2012

MAJELIS PENGUJI

Skripsi I

Skripsi II

Ir. Suharto, MT.
NIP. 19531030 198212 1 001

Dr. Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT.
NIP. 19720817 200003 1 001

Komprehensif

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

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 Yang Maha Esa, karena dengan rahmat dan hikmat-Nya lah skripsi ini dapat diselesaikan. Skripsi berjudul “Pengaruh Variasi *Wire Tension* dan *Wire Feed Rate* pada *Wire EDM* Terhadap *Corner Error* Hasil Pemotongan Baja Paduan ASSAB 618” 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 Dr.Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya,
- Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, M.Sc.,CSE. selaku Ketua Konsentrasi Produksi Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
- Bapak Dr. Ir. Achmad As’ad Sonief, MT. selaku Dosen Pembimbing atas segala bimbingan, nasehat, pengarahan, motivasi, saran dan masukan yang telah diberikan.
- Ayahanda Hiendarso dan Ibunda Theresia tercinta, kedua adik saya Dika dan Satria, serta seluruh keluarga besar atas segala nasehat, kasih sayang, perhatian dan kesabarannya di dalam membesarkan dan mendidik penulis, serta telah banyak mendoakan kelancaran penulis hingga terselesaikannya skripsi ini.
- Novi yang selalu setia mendoakan, menyemangati dan menemani selama penyusunan skripsi ini.
- Seluruh Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin yang telah banyak memberikan ilmu pengetahuan yang sangat mendukung selama penyusunan skripsi ini.
- Seluruh Staf Recording atas bantuan dan kelancaran dalam hal urusan administrasi dan surat menyurat.
- Nugroho, Robert, Aris, Abid dan Tompi yang merupakan rekan dalam pengerjaan skripsi yang telah banyak mambantu dalam pengerjaan skripsi ini.

- Seluruh sahabat perantau Lendyeah, Fay, Erfan, Yoga, Deva, Ryan, Tungpey, Vina, bang Kentay, Rendota, Ilham dan semua yang tidak dapat disebut satu persatu atas persahabatannya yang semoga akan terus berlanjut.
- Teman - teman AEROKREASI atas dukungannya selama ini.
- Teman – teman Mesin Angkatan 2007 Brawijaya, atas dukungan dan solidaritasnya.
- Teman – teman Dugame, Gowes Jelajah, para senior, dan alumni serta semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan skripsi yang tidak dapat disebut satu persatu.

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



ABSTRAK

Shalahuddin Shantika Putra, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang, Desember 2011. “Pengaruh Variasi *Wire Tension* dan *Wire Feed Rate* pada *Wire EDM* Terhadap *Corner Error* Hasil Pemotongan Baja Paduan ASSAB 618”. Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Achmad As’ad Sonief, MT.

Wire EDM merupakan salah satu mesin yang memiliki kepresisian tinggi, mesin ini digunakan untuk membentuk komponen-komponen mesin yang memiliki bentuk kompleks dan membutuhkan kepresisian tinggi. Parameter pemesinan yang mempengaruhi kepresisian pada *Wire EDM* adalah *Wire Tension* dan *Wire Feed Rate*. Bentuk profil sudut merupakan bentuk yang memiliki kerumitan serta kepresisian tinggi yang sering mengakibatkan terbentuknya *corner error*. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk mengetahui sejauh mana pengaruh *Wire Tension* dan *Wire Feed Rate* terhadap besar *corner error* hasil pemotongan menggunakan *Wire EDM*.

Penelitian ini menggunakan metode ekperimental, variabel bebas yang digunakan adalah *Wire tension* dengan variasi 800, 900, 1000, 1100 gram dan *Wire Feed Rate* dengan variasi 3, 4 dan 5 mm/s. Baja Paduan ASSAB 618 dipotong menggunakan mesin *Wire EDM* menimbulkan *corner error* sebagai variabel terikatnya. Nilai dari *corner error* didapatkan menggunakan bantuan *Auto CAD* 2011 dan mistar insguts dengan mengukur spesimen dan gambar spesimen.

Hasil dari penelitian menunjukkan semakin tinggi nilai *wire tension* maka *corner error* akan semakin kecil sedangkan semakin tinggi *wire feed rate* maka *corner error* akan semakin besar. *Corner error* terendah terjadi pada variasi *wire tension* 1100 gram dan *wire feed rate* 3 mm/s yaitu sebesar 0,080 mm.

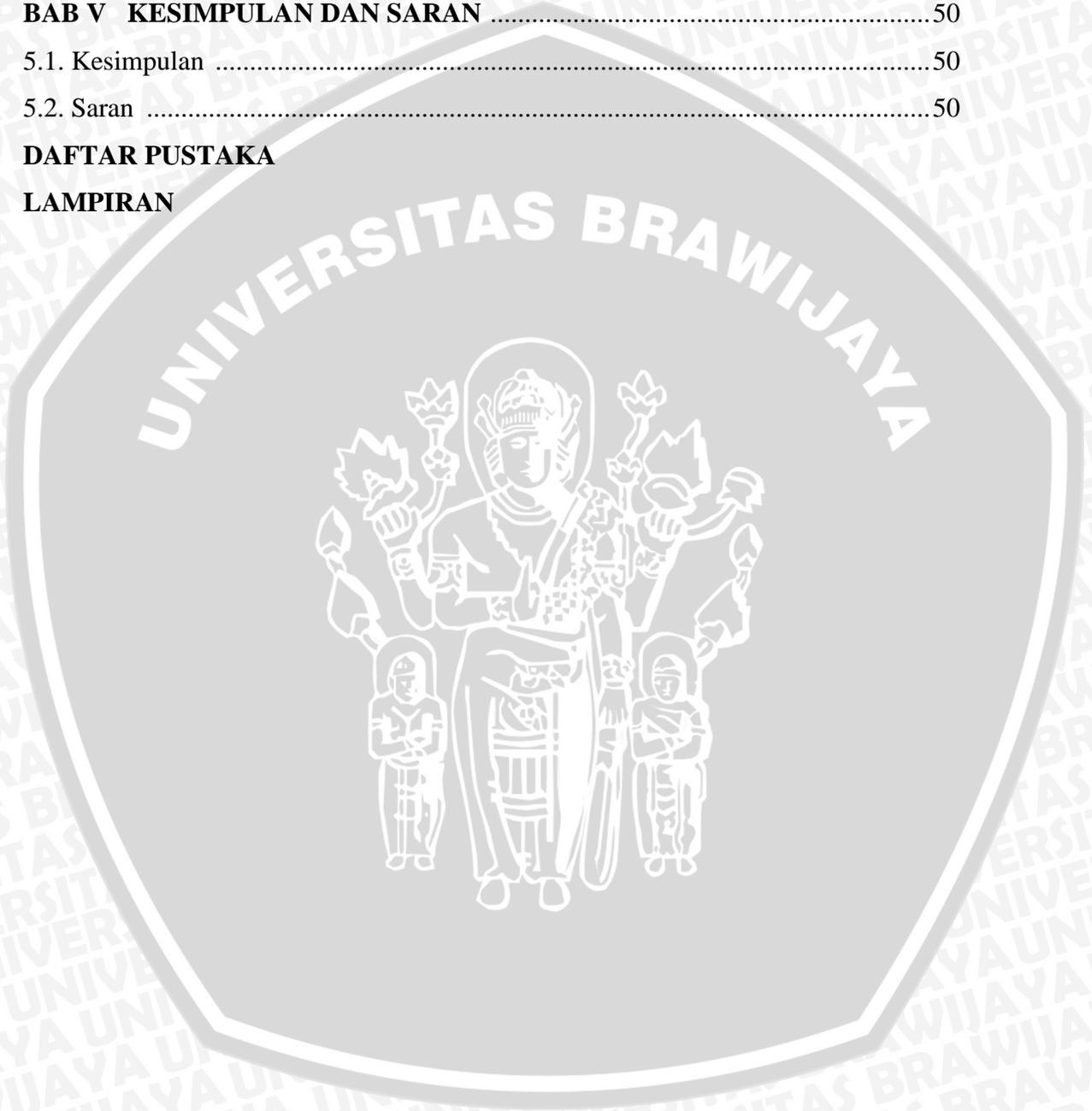
Kata kunci : *wire EDM*, *wire tension*, *wire feed rate*, *corner error*

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
ABSTRAK	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	2
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. Penelitian Sebelumnya	4
2.2. Definisi <i>Electric Discharge Machine (EDM)</i>	4
2.3. Prinsip Kerja <i>Electric Discharge Machine (EDM)</i>	6
2.4. Klasifikasi <i>Electric Discharge Machine (EDM)</i>	8
2.5. <i>Wire Electric Discharge Machine (WEDM)</i>	9
2.6. Prinsip Kerja <i>Wire Electric Discharge Machine (WEDM)</i>	10
2.6.1. Komponen Utama <i>Wire EDM</i>	11
2.6.2. Elektrode Kawat	12
2.6.3. Cairan Dielektrik (<i>Dielectric Fluid</i>)	13
2.6.4. <i>Flushing</i>	14
2.6.5. Siklus Percikan (<i>Spark Cycle</i>)	15
2.7. Parameter Pemesinan <i>Wire Electric Discharge Machine</i>	17
2.7.1. Intensitas Arus	17
2.7.2. <i>Discharge Time</i>	17
2.7.3. <i>Pulse Time-On</i>	16
2.7.4. <i>Pulse Time-Off</i>	17
2.7.5. <i>Servo Voltage</i>	17
2.7.6. <i>Wire Tension</i>	17
2.7.7. <i>Wire Feed Rate</i>	17

2.7.8. Polaritas Pahat dan Benda Kerja	18
2.8. Karakter Pemesinan <i>Wire Electric Discharge Machine</i>	18
2.8.1. Laju Pelepasan Logam (<i>Material Removal rate</i>).....	18
2.8.2. Kecepatan Pemotongan (<i>Cutting Speed</i>)	19
2.8.3. Keakuratan (<i>Accuracy</i>)	19
2.8.4. <i>Corner Error</i>	21
2.9. Baja Paduan	22
2.9.1. Klasifikasi Baja Paduan	23
2.9.2. Pengaruh Penambahan Unsur Paduan	23
2.9.3. Baja ASSAB 618	24
2.10. Hipotesa	25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	26
3.1. Metodologi Penelitian	26
3.2. Variabel Penelitian	26
3.2.1. Variabel Bebas	26
3.2.2. Variabel Terikat	26
3.3. Bahan dan Peralatan Penelitian	27
3.3.1. Bahan	27
3.3.2. Peralatan	27
3.3.3. Benda kerja	29
3.4. Prosedur Penelitian	29
3.4.1. Proses Pengambilan Spesimen	29
3.4.2. Proses Pengambilan Data	30
3.5. Waktu dan Tempat Penelitian	30
3.6. Rancangan Pengolahan dan Analisa Data	30
3.7. Analisa Varian Dua Arah	31
3.8. Diagram Alir Penelitian	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	36
4.1. Data Hasil Pengukuran	36
4.2. Pengolahan Data	37
4.2.1. Analisa Statistik	37
4.2.2. Analisa Grafis	42
4.2.2.1. Analisis Grafik Besar <i>Wire Tension</i> Terhadap <i>Corner Error</i>	42
4.2.2.2. Analisa Grafik Besar <i>Wire Feed Rate</i> Terhadap <i>Corner Error</i>	43

4.3. Pembahasan	44
4.3.1. Analisis Pengaruh Besar <i>Wire Tension</i> Terhadap <i>Corner Error</i>	45
4.3.2. Analisa Pengaruh <i>Wire Feed Rate</i> Terhadap <i>Corner Error</i>	46
4.3.3. Analisa Pengaruh Interaksi Antara Besar <i>Wire Tension</i> dan <i>Wire Feed Rate</i> Terhadap <i>Corner Error</i>	48
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	50
5.1. Kesimpulan	50
5.2. Saran	50
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

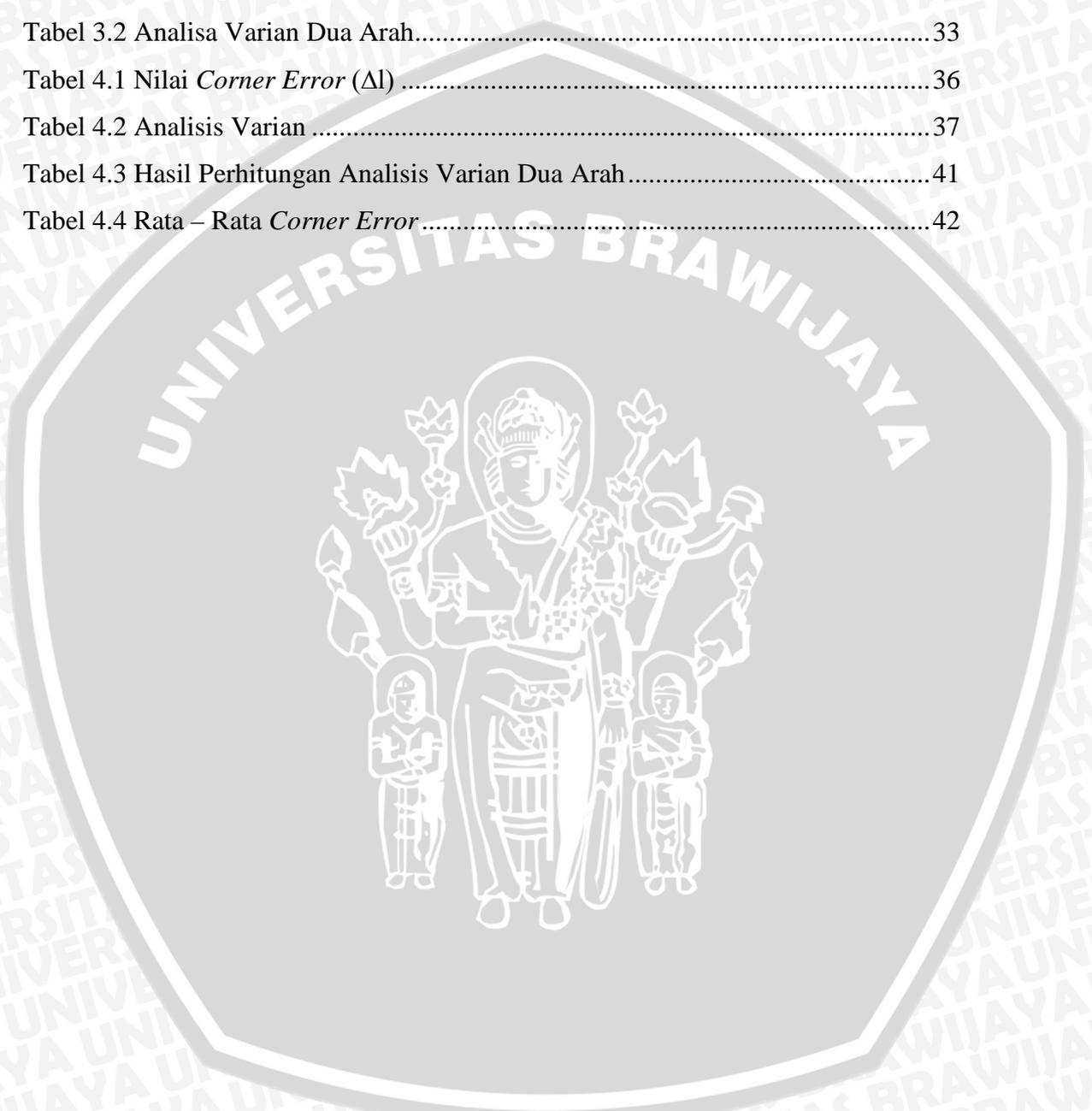


DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Mesin <i>EDM</i>	5
Gambar 2.2	Skema Mesin <i>EDM</i>	6
Gambar 2.3	Kategori Pemesinan <i>EDM</i>	8
Gambar 2.4	Mesin Wire Cutting <i>EDM</i>	9
Gambar 2.5	Skema Dasar Prinsip Kerja Wire <i>EDM</i>	10
Gambar 2.6	Percikan (Spark) Mengerosi Benda Kerja & Sisa Hasil Pengerosian Dibawa oleh Cairan Dielektrik	10
Gambar 2.7	<i>Coated Wire Electrode</i>	13
Gambar 2.8	Siklus <i>On/Off Pulse</i> Pada Wire <i>EDM</i>	15
Gambar 2.9	a) <i>Spark</i> Energi pada 5 Ampere. b) <i>Spark</i> Energi pada 600 Ampere	16
Gambar 2.10	<i>Kerf</i>	16
Gambar 2.11	<i>Wire Lag</i>	20
Gambar 2.12	<i>Bicycle Effect</i>	21
Gambar 2.13	<i>Corner Error</i>	21
Gambar 2.14	Efek <i>Wire Lag</i> pada Pemotongan Sudut.....	22
Gambar 3.1	Mesin Wire <i>EDM</i> Mitsubishi BA-8	28
Gambar 3.2	Scanner HP DESKJET F247	28
Gambar 3.3	Mistar Ingsut	29
Gambar 3.4	Benda Kerja Tampak Atas	29
Gambar 3.5	Benda Kerja Tampak Depan	29
Gambar 3.6	<i>Corner Error</i>	30
Gambar 3.7	Diagram Alir Penelitian	35
Gambar 4.1	Pengukuran Spesimen dengan <i>AutoCAD</i> 2011	36
Gambar 4.2	Grafik Pengaruh <i>Wire Tension</i> Terhadap <i>Corner Error</i> pada Setiap Wire <i>Feed Rate</i>	43
Gambar 4.3	Grafik Hubungan Besar <i>Wire Feed Rate</i> Terhadap <i>Corner Error</i> pada Setiap <i>Wire Tension</i>	44
Gambar 4.4	Grafik Interaksi Besar <i>Wire Tension</i> dan <i>Wire Feed Rate</i> Terhadap <i>Corner Error</i>	48

DAFTAR TABEL

No	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Sudut Berdasarkan Penyebab Terjadinya <i>Corner Error</i>	22
Tabel 3.1	Rancangan Penelitian.....	31
Tabel 3.2	Analisa Varian Dua Arah.....	33
Tabel 4.1	Nilai <i>Corner Error</i> (Δ)	36
Tabel 4.2	Analisis Varian	37
Tabel 4.3	Hasil Perhitungan Analisis Varian Dua Arah.....	41
Tabel 4.4	Rata – Rata <i>Corner Error</i>	42



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Gambar Benda Kerja

Lampiran 2 Sertifikat Baja Paduan ASSAB 618

Lampiran 3 Surat Tempat Penelitian



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Electrical discharge machining (EDM) merupakan proses permesinan non konvensional yang memanfaatkan energi termal yang berupa loncatan bunga api yang terjadi antara elektroda pahat dan benda kerja melalui media isolator (*fluida dielektrik*). Proses permesinan *EDM* banyak digunakan ketika pembuatan benda kerja dengan proses pemmesinan konvensional sulit dilakukan. Tidak terjadi kontak langsung antara elektroda dan benda kerja, karena itu proses permesinan menggunakan *EDM* memungkinkan untuk pengerjaan material yang keras dengan menggunakan pahat yang lunak.

Salah satu jenis permesinan *EDM* yang memiliki kepresisian tinggi adalah *Wire EDM*, mesin ini biasanya digunakan untuk membentuk komponen-komponen mesin yang memiliki bentuk yang kompleks dan membutuhkan kepresisian tinggi. *Wire EDM* merupakan proses permesinan yang bekerja dengan prinsip yang sama dengan *EDM*. Pada *Wire EDM* elektroda pahat yang digunakan adalah kawat yang berbentuk silinder dengan diameter tertentu untuk membuat dan memotong benda kerja.

Cepatnya perkembangan industri manufaktur, mengakibatkan permintaan akan produk dengan kepresisian yang tinggi semakin meningkat dan permintaan yang lebih besar untuk keakurasian dari proses permesinan *Wire EDM*. *Wire EDM* menggunakan sebuah kawat tipis yang fleksibel sebagai pahat elektrodanya sehingga memungkinkan kawat untuk berdeformasi dan kesalahan geometris dengan mudah dapat terjadi. Hal ini sering terjadi utamanya pada pemotongan sudut, dimana benda kerja tidak hanya mengalami kesalahan geometrik sepanjang arah elektroda kawat, tetapi juga untuk kesalahan geometrik pada pemotongan sudut karena sifat elektroda kawatnya.

Corner error merupakan kesalahan geometrik yang tidak dapat dipisahkan dari proses pemotongan dengan *Wire EDM*. *Corner error* terjadi pada saat memotong bagian benda kerja yang memiliki bentuk cenderung tajam. Semakin kecil sudut benda kerja yang akan dipotong maka *corner error* yang terbentuk akan semakin besar (Lin, 2009).

Pada *Wire EDM* terdapat parameter pemmesinan yang digunakan, beberapa diantaranya adalah *Pulse On Time* (T_{on}), *Pulse Off Time* (T_{off}), *Servo Voltage* (SV),

Wire Feed Rate (WF), dan *Wire Tension* (WT). *Wire Feed Rate* merupakan parameter pemesinan yang banyak mempengaruhi waktu produksi, semakin tinggi *Wire Feed Rate* yang digunakan maka waktu produksi akan semakin singkat, tetapi semakin tinggi pula resiko terjadinya kesalahan geometrik pada pemotongan benda kerja (Robertha, 2011). Meningkatkan *Wire tension* elektroda kawat pada *Wire EDM* dapat mengurangi *bicycle effect* yang menyebabkan kesalahan geometrik yang terjadi saat pemotongan benda kerja (Adrian, 2004).

Berdasarkan uraian diatas dapat disimpulkan bahwa dengan meningkatnya *wire feed rate* maka kesalahan geometris berupa *corner error* akan semakin besar sedangkan *wire tension* dapat mengurangi kesalahan geometrik berupa *corner error* pada proses pemotongan dengan *Wire EDM*. Karenanya peneliti mengambil permasalahan berupa pengaruh *wire tension* dan *wire feed rate* pada proses permesinan dengan *Wire EDM* terhadap penyimpangan geometrik berupa *corner error* pada pemotongan baja paduan ASSAB 618.

1.2 Rumusan Masalah.

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

1. Bagaimana pengaruh *wire tension* dan *wire feed rate* mesin *Wire EDM* terhadap *corner error* pada hasil pemotongan baja paduan ASSAB 618.
2. Bagaimana interaksi antara *Wire Tension* dan *Wire Feed Rate* terhadap *corner error* hasil potong dengan proses *Wire EDM*?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Mesin yang digunakan adalah Mesin *Wire Cut* Mitshubishi BA-8.
2. *Fluida dielektrik* yang digunakan *aqua destilasi*.
3. Parameter pemesinan yang divariasikan adalah *wire tension* dan *wire feedrate* dari *Wire EDM*.
4. Parameter – parameter pemesinan lainnya dikondisikan konstan.
5. Bahan yang digunakan adalah baja paduan ASSAB 618.
6. Jenis elektroda kawat yang digunakan adalah kuningan dengan diameter 0,2 mm.
7. Permasalahan yang dibahas adalah *corner error*

8. Pemotongan membentuk sudut 45°

1.4 Tujuan penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. mengetahui sejauh mana pengaruh besar *wire tension* dan *wire feed rate* pada *Wire EDM* terhadap besar *corner error* hasil pemotongan baja paduan ASSAB 618
2. Untuk mengetahui interaksi antara *Wire Tension* dan *Wire Feed Rate* terhadap *Corner error* hasil potong dengan proses *Wire EDM*

1.5 Manfaat penelitian

1. Manfaat dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi tentang pengaruh tegangan tarik kawat dan *wire feed rate* pada mesin *Wire EDM* terhadap besar *corner error*
2. Dapat membantu dalam pemilihan besar *wire tension* dan *wire feed rate* agar memperkecil *corner error* dalam proses permesinan dengan menggunakan *Wire EDM*
3. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi penelitian selanjutnya

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

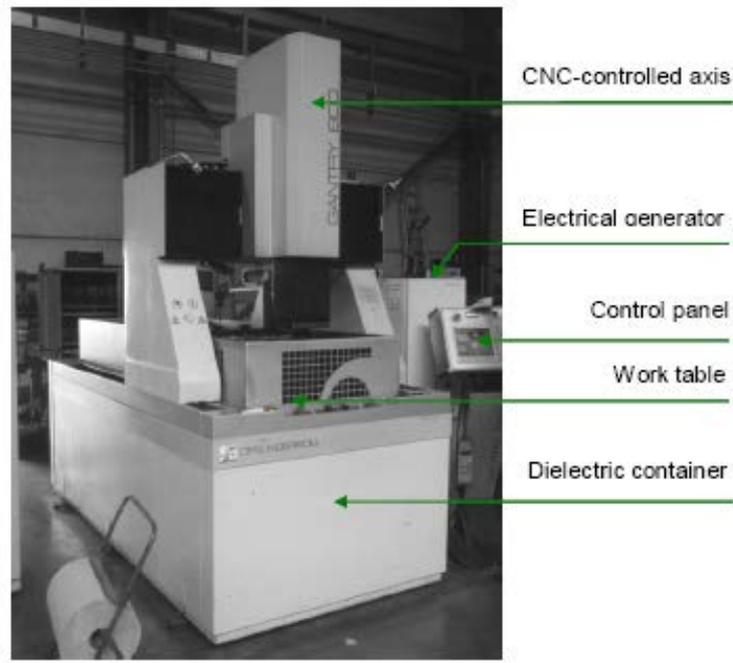
Besar sudut yang akan dibentuk dengan *Wire EDM* akan mempengaruhi besar *corner error*. Semakin besar sudut yang akan dibentuk dengan *Wire EDM* maka *corner error* akan semakin kecil, sedangkan semakin kecil sudut yang akan dibentuk maka *corner error* yang terbentuk akan semakin besar. (Lin, 2001)

Besar penarikan kawat (*wire tension*) berpengaruh nyata terhadap *bicycle effect*, semakin besar penarikan kawat maka kekakuan kawat akan semakin tinggi, sehingga simpangan yang terjadi semakin kecil dan oleh karena itu *bicycle effect* yang terjadi semakin kecil. Sedangkan arus listrik berpengaruh nyata terhadap *bicycle effect*, semakin besar arus yang digunakan maka energi yang dilepaskan pada waktu sparking semakin besar, sehingga kecepatan potongnya meningkat, dimana akan meningkatkan *bicycle effect*. (Adrian, 2004)

Besar dari *wire feed rate* berpengaruh terhadap keakurasian pada proses pemotongan dengan menggunakan *Wire EDM*. Pada pembuatan roda gigi dengan menggunakan *Wire EDM*, terjadi penyimpangan pada *Involute* dari roda gigi yang dibuat. Hal ini dipengaruhi oleh besar *wire feed rate*, dimana semakin besar *wire feed rate* yang digunakan maka akan menyebabkan meningkatnya penyimpangan saat proses pemotongan. (Robertha, 2011)

2.2 *Electric Discharge Machining (EDM)*

Electric Discharge Machining (EDM) adalah suatu mesin perkakas non-conventional yang proses pemotongan material (material removal) benda kerjanya berupa erosi yang terjadi karena adanya sejumlah loncatan bunga api listrik secara periodik pada celah antara katoda (pahat) dengan anoda (benda kerja) di dalam cairan dielektrik.



Gambar 2.1 Mesin EDM
Sumber : Wolf (2010:246)

EDM banyak digunakan untuk pembuatan produk yang menuntut kepresisian yang tinggi. Proses *Electric Discharge Machining (EDM)* memiliki kemampuan dasar, antara lain :

1. Mampu mengerjakan metal atau paduan yang sangat keras yang tidak mudah untuk dikerjakan dengan proses pemesinan konvensional, sehingga proses EDM banyak digunakan dalam pembuatan peralatan-peralatan pembentuk (cetakan) dan perkakas pemotong yang dibuat dari baja yang dikeraskan, karbida, tungsten, dll.
2. Mampu mengerjakan kontur permukaan benda kerja yang kompleks, dengan dimensi sama secara berulang-ulang selama proses pembentukan tidak membutuhkan gerakan elektroda diluar jangkauan gerakan utama proses *Electric Discharge Machining (EDM)*.

Selain kemampuan dasar di atas proses EDM juga memiliki beberapa keuntungan, antara lain:

- a. Kontrol benda kerja di atas mesin tidak rumit.
- b. Permukaan benda kerja hasil proses EDM relatif halus.
- c. Tingkat kebisingan rendah.
- d. Kemudahan dalam pembuatan elektroda.

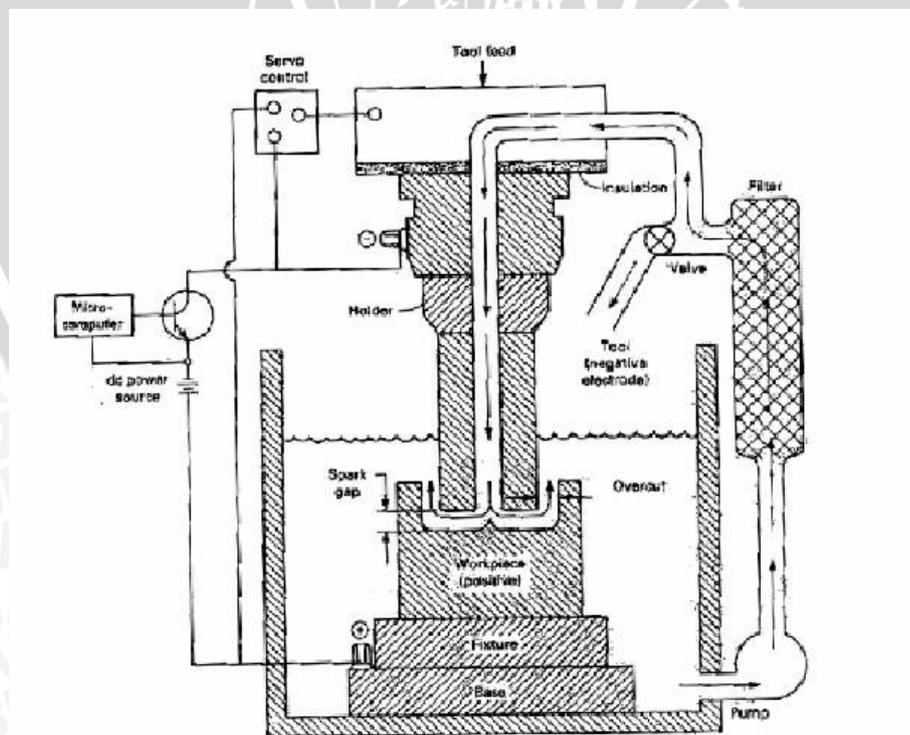
Namun demikian, proses *EDM* juga mempunyai beberapa kerugian, diantaranya:

- Mesin *EDM* dan perlengkapannya masih relatif mahal.
- Proses erosi benda kerja sangat kecil, sehingga waktu operasinya relatif lama.

2.3 Prinsip Kerja *Electric Discharge Machine (EDM)*

Seperti peralatan pemesinan lainnya, *EDM* melepaskan material dari benda kerjanya, tetapi *EDM* memanfaatkan percikan listrik yang ditimbulkannya untuk mengerosi benda kerja. Pada dasarnya mekanisme pelepasan logam pada *EDM* ditimbulkan oleh efek merusak dari percikan listrik yang ditimbulkan diantara dua elektrode yang dipisahkan oleh cairan dielektrik. Oleh karena itu benda kerja harus merupakan material yang memiliki sifat konduktif terhadap listrik.

Percikan listrik tersebut mampu menghasilkan panas yang dapat melelehkan material benda kerja, sehingga benda kerja dapat dibentuk sesuai dengan keinginan. Proses percikan (*sparking*) listrik terjadi secara periodik dan beraturan dalam suatu media cairan dielektrik yang berfungsi sebagai isolator. Percikan akan timbul jika terdapat tegangan pada elektroda dan benda kerja.



Gambar 2.2 Skema Mesin *EDM*
Sumber: David (1999:557)

Pada proses awal *EDM*, elektrode 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. Secara keseluruhan proses pengerjaan material dengan proses *EDM* adalah suatu proses yang kompleks. Elektroda dan benda kerja berada dalam cairan dielektrik (*dielectric fluid*) yang pada dasarnya bersifat sebagai media isolator. Untuk memungkinkan terjadinya loncatan bunga api listrik maka beda tegangan antara katoda dan anoda harus melampaui “*dielectric breakdown voltage*”

Breakdown voltage bergantung pada:

1. Jarak dua posisi yang terdekat antara pahat dengan benda kerja.
2. Sifat isolator cairan dielektrik.
3. Tingkat polusi yang terjadi pada celah dielektrik tersebut.

Proses terjadinya loncatan bunga api listrik (*spark*) dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Pengaruh medan listrik yang ada diantara elektroda dengan benda kerja menyebabkan terjadinya pergerakan ion positif dan elektron yang masing-masing menuju kutub yang berlawanan. Akhirnya terbentuklah saluran ion yang bersifat konduktif.
2. Pada kondisi tersebut maka arus listrik bisa mengalir melalui ion tersebut dan terjadilah loncatan bunga api listrik (*spark*).

Mekanisme pengerjaan material benda kerja dalam proses *EDM* dapat diuraikan 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. Pada saat yang bersamaan terjadi penguapan pada permukaan benda kerja, elektroda pahat maupun *fluida dielektrik* yang menghasilkan gelembung uap.
3. 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.

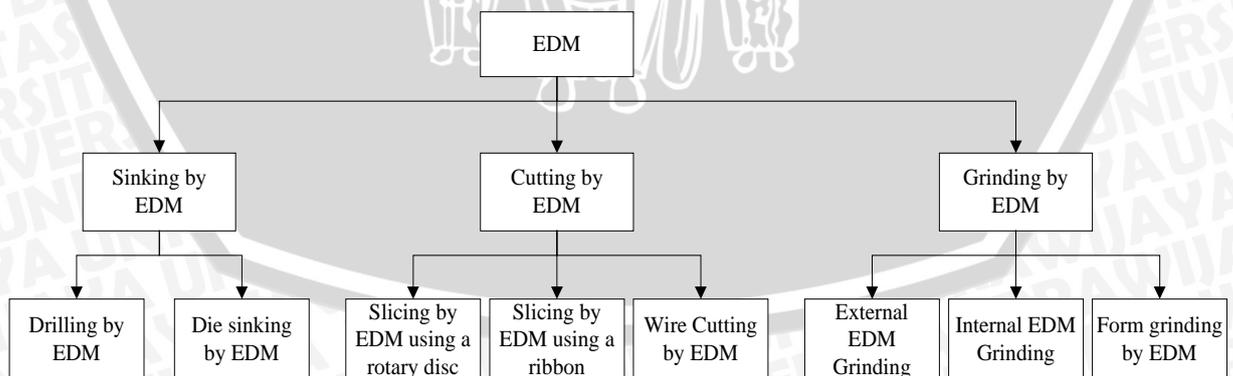
4. Bagian-bagian material benda kerja dan pahat yang terpecar ini secepatnya akan membeku kembali terbentuk partikel-partikel halus yang terbawa pergi oleh aliran *fluida dielektrik*.

2.4 Klasifikasi EDM

Terdapat tiga kategori utama pada proses EDM. Ketiga kategori tersebut dibedakan menurut jenis pahatnya:

1. *Sinking* mempunyai bentuk pahat negatif dari bentuk yang direncanakan pada benda kerja. Pahat melakukan gerak penetrasi ke benda kerja.
2. *Cutting* menggunakan pahat yang berbentuk plat, pita, kawat atau piringan. Pahat berupa pita memotong benda kerja dengan arah tegak lurus terhadap benda kerja. Pahat berupa piringan berputar pada sumbunya, bergerak dengan arah tegak lurus terhadap benda kerja.
3. *Grinding* menggunakan 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 2.3 Kategori Pemesinan EDM
Sumber: Shan (1980:86)

2.5 Mesin Wire Cutting EDM

Wire EDM adalah salah satu bentuk *EDM* yang menggunakan sebuah kawat elektroda yang bergerak secara terus-menerus. Pelepasan material terjadi sebagai hasil erosi percikan listrik oleh kawat elektroda yang bergerak dari gulungan kawat baru memotong benda kerja (E.H. Hassan, 2005:132). *Wire EDM* menggunakan kawat kecil sebagai elektrode untuk memotong benda kerja, gerakan kawat ini dikendalikan oleh CNC untuk menghasilkan suatu bentuk tertentu. Penggunaan *Wire EDM* mirip seperti *band saw*. Jika *band saw* menggunakan gerigi-gerigi untuk memotong maka *Wire EDM* menggunakan percikan listrik untuk mengerosi benda kerja.



Gambar 2.4 Mesin Wire Cutting EDM

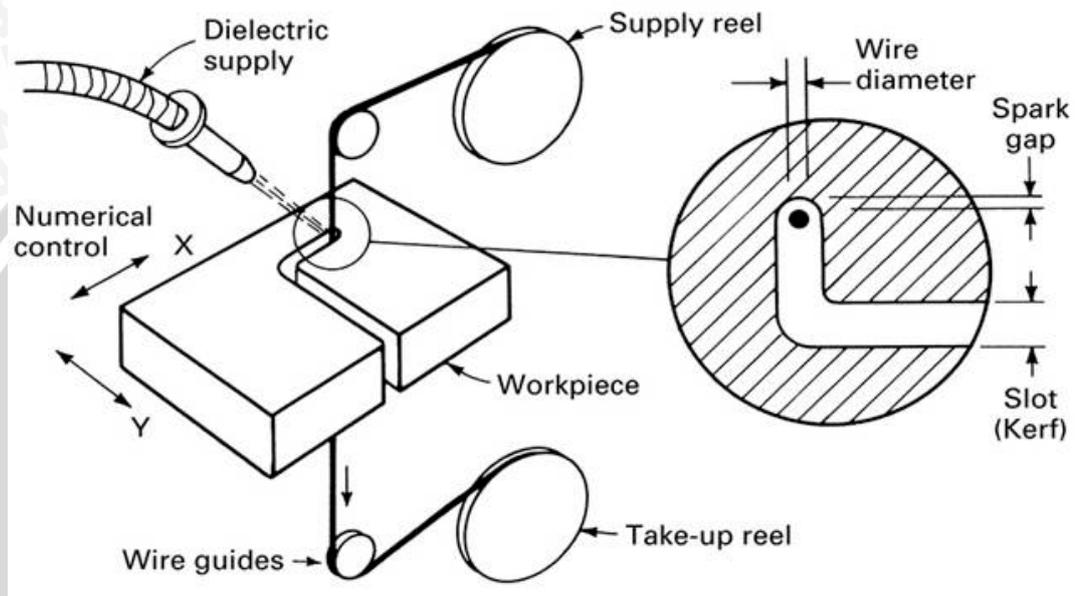
Sumber: Mitsubishi Electric Wire-cut EDM SYSTEMS BA Series

Wire EDM banyak digunakan untuk pembuatan produk yang menuntut kepresisian yang tinggi. Beberapa kemampuan dasar Proses *Wire EDM*, antara lain:

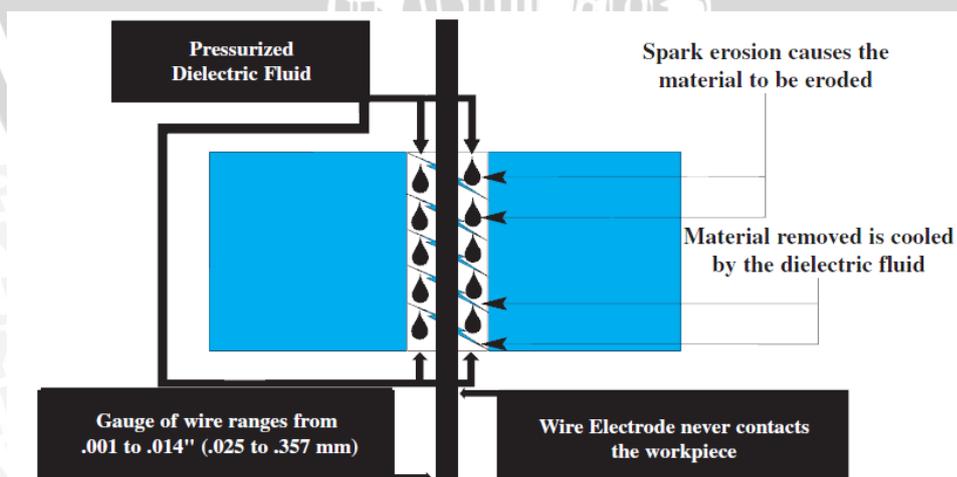
1. Toleransi proses yang sangat akurat hingga 0.0001 inch
2. Gaya pemotongan yang kecil
3. Mampu mengerjakan bentuk yang kompleks
4. Tidak ada keausan pahat (pahat secara kontinyu diganti)
5. Dapat mengerjakan material yang keras

2.6 Prinsip Kerja Wire Cutting EDM

Seperti peralatan EDM lainnya, Wire EDM melepaskan material dengan percikan listrik yang dihasilkan oleh elektrode yang dialiri listrik dari sebuah generator. Mekanisme sistem *Computer – Numerical Control* (CNC) menjaga agar kawat elektroda tidak menempel ke benda kerja dan menjalankan mesin untuk memotong benda kerja sesuai dengan bentuk yang diinginkan. Prinsip kerja Wire EDM dapat dijelaskan pada gambar berikut :



Gambar 2.5 Skema dasar prinsip kerja Wire EDM.
Sumber: Jain (2002:167)



Gambar 2.6 Percikan (spark) mengerosi benda kerja & sisa hasil pengerosian dibawa oleh cairan dielektrik.
Sumber: Complete EDM Handbook.

Diantara benda kerja dan kawat terdapat sebuah pelindung berupa *deionized water*, yang biasa disebut cairan dielektrik. Untuk mengontrol konduktivitas air, 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 listrik terjadi diantara kawat dan benda kerja maka akan terjadi peningkatan temperatur yang menyebabkan benda kerja meleleh dan menguap. Hal tersebut dengan gerakan elektrode kawat yang terus-menerus mengalami perputaran sehingga elektrode yang digunakan selalu baru. 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 elektrode kawat.

Kemudian cairan dielektrik akan melalui filter yang akan memisahkan antar cairan dielektrik itu sendiri dan partikel sisa pemotongan. Untuk menjaga keakuratannya, cairan dielektrik melalui sebuah chiler untuk menjaga temperatur agar konstan.

2.6.1 Komponen Utama *Wire EDM*

Wire EDM memiliki lima komponen utama sebagai berikut:

1. Generator Pembangkit

Komponen ini memberikan energi listrik agar terjadi beda tegangan antara elektroda kawat dan benda kerja.

2. Sistem Kontrol Gerakan

Sistem ini berfungsi untuk mengontrol gerakan benda kerja serta menjaga jarak antara kawat elektrode dengan benda kerja.

3. Unit Fluida Dielektrik.

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

4. Unit Elektrode Kawat

Elektroda kawat bergerak dari kumparan kawat pengisi ke kumparan penggulung, sehingga elektrode kawat yang baru selalu berada di daerah *spark gap*. Hal ini akan membuat keausan yang terjadi pada elektrode kawat tidak mempengaruhi keakuratan pemotongan.

2.6.2 Elektrode Kawat

Pemilihan elektrode 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 elektrode pahat. Elektroda dapat dikategorikan baik apabila memiliki titik leleh tinggi dan tahanan listrik rendah. Pada *Wire EDM* elektrode yang digunakan harus memiliki beberapa karakteristik sebagai berikut :

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

Elektrode 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. Tembaga (*Copper*)

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

2. Kuningan (*Brass*)

Elektroda kawat ini merupakan campuran tembaga (Cu) dan 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*.

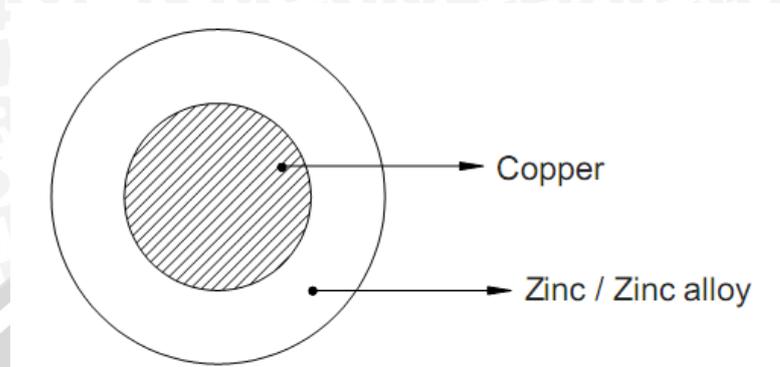
3. *Molybdenum*

Jenis elektrode 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.

4. Kawat yang dilapisi (*Coated Wire*)

Elektrode kawat ini dapat diperoleh dengan menggunakan metode elektroplating. Elektrode 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)

2.6.3 Cairan Dielektrik (*Dielectric Fluid*)

Cairan dielektrik merupakan cairan yang berada pada celah diantara kawat elektroda dengan benda kerja. Fungsi utama dari cairan dielektrik adalah :

1. Menyediakan suatu kondisi *insulation* diantara kawat elektrode dengan benda kerja, dalam keadaan terionisasi cairan dielektrik bersifat seperti konduktor sehingga memungkinkan suatu percikan (*spark*) listrik dapat terjadi.
2. Membilas partikel-partikel pada celah diantara elektrode kawat dan benda kerja yang timbul akibat proses pengerjaan material.
3. Media pendingin untuk benda kerja dan kawat elektrode.

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

1. Air murni (Aqua destilata)
Digunakan pada proses pengerjaan kecil (*micro machining*), 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*). Memiliki titik nyala rendah yang menyebabkan terjadinya gelembung-gelembung uap.

- Kerosen

Memiliki viskositas yang rendah sehingga bagus digunakan pada pengerjaan finishing dan super 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 isolatif yang baik.

2.6.3 Flushing

Flushing adalah sirkulasi cairan dielektrik diantara benda kerja dan kawat elektrode. *Flushing* memegang peranan penting dalam proses EDM. Suatu proses *flushing* yang tidak cukup baik dapat menghasilkan penurunan umur elektrode, penurunan waktu produksi, dan penurunan efisiensi pemesinan.

Saat belum terjadi loncatan bunga api (*sparking*) cairan dielektrik diantara benda kerja dan elektroda merupakan medium isolator yang sempurna. Setelah terjadi loncatan bunga api (*sparking*) akan timbul partikel-partikel kecil didalam cairan dielektrik hasil dari pengerosian benda kerja. Sehingga kemampuan isolator cairan dielektrik akan menurun.

Tujuan dari proses *flushing* adalah :

- Mensuplai cairan dielektrik baru pada celah diantara benda kerja dan elektrode dimana merupakan daerah terjadinya loncatan bunga api (*spark gap*).
- Membawa dan mengeluarkan geram dan pengotor lain dari daerah loncatan bunga api.
- Mendinginkan benda kerja dan elektroda.

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

1. *Flushing pressure*

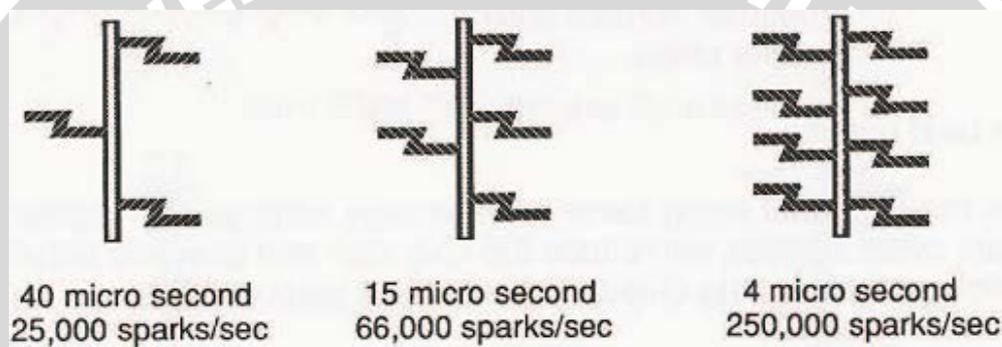
Flushing jenis ini dilakukan dengan cara menyemprotkan cairan dielektrik ke daerah *spark gap* menggunakan *nozzle* dari atas maupun dari bawah benda kerja, sehingga kawat akan dikelilingi oleh cairan dielektrik. Jarak *nozzle* dengan benda kerja dapat mempengaruhi hasil akhir proses pemotongan.

2. *Flushing submerge*

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

2.6.3 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 detik.



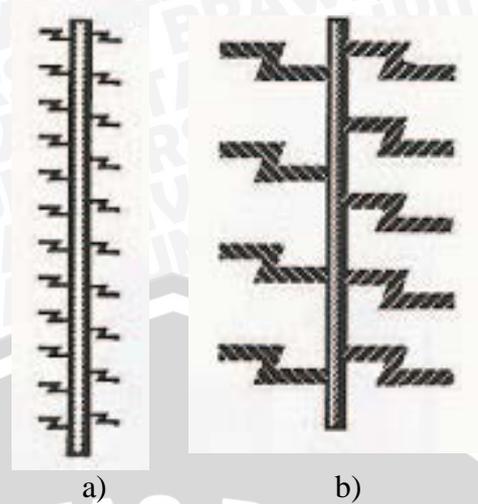
Gambar 2.8 Siklus *on/off pulse* pada *Wire EDM*.

Sumber: Port (1992 : 8)

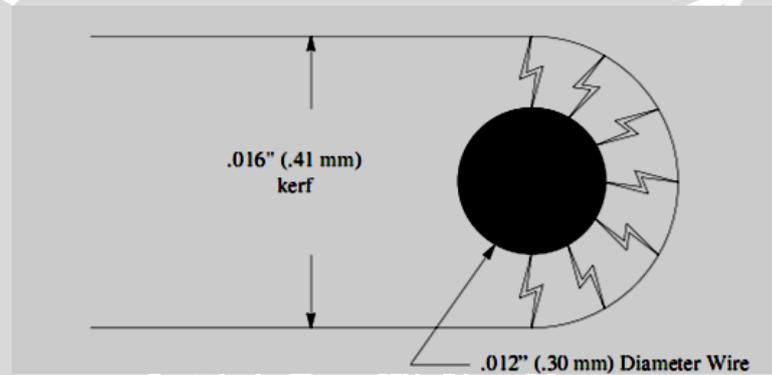
2.7 Parameter Pemesinan *Wire EDM*

2.7.1 Intesitas Arus

Intensitas arus adalah batas arus maksimum yang diterapkan pada proses *EDM*. 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 semakin besar energi loncatan tiap bunga api (*sparking*) yang menyebabkan semakin besarnya lebar pemotongan (*kerf*). Seperti pada gambar berikut:



Gambar 2.9 a) Spark energi pada 5 ampere. b) Spark energi pada 600 ampere
 Sumber: Port (1992:6)



Gambar 2.10 kerf
 Sumber: Complete EDM Handbook

2.7.2 Discharge Time

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

2.7.3 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 dan ini dapat menyebabkan ketelitian pada geometri hasil akan turun.

2.7.4 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 elektrode 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 yang menyebabkan penurunan pemakanan sehingga ketelitian geometri akan semakin naik

2.7.5 Servo Voltage

Servo voltage adalah tegangan yang dihasilkan dan diatur oleh servo. Tegangan inilah yang memiliki pengaruh pada intensitas arus dan lebar *kerf*.

2.7.6 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.

2.7.7 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. Hal ini dikarenakan semakin besar nilai *feed rate* maka jumlah siklus percikan listrik dalam satu satuan panjang tertentu akan lebih banyak, inilah yang menyebabkan nilai laju pelepasan logamnya naik dan permukaan benda kerja yang semakin halus.

Sedangkan turun nilai ketelitian ukuran disebabkan oleh semakin tinggi nilai *feed rate* maka celah (*gap*) yang terjadi diantara benda kerja dan

elektrode kawat akan semakin kecil, jika *gap* ini semakin kecil maka percikan akan semakin mudah terjadi dan energi yang dihasilkan akan semakin besar pula, sehingga akan mengerosi benda kerja lebih banyak. Inilah yang menyebabkan turunnya nilai ketelitian ukuran hasil.

2.7.8 Polaritas Pahat dan Benda Kerja

Polaritas merupakan hubungan antara benda kerja dan elektrode 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 elektrode dihubungkan dengan kutub negatif. Sedangkan polaritas positif adalah kondisi dimana elektrode dihubungkan dengan kutub positif.

2.8 Karakter Pemesinan Wire EDM

2.8.1 Laju Pelepasan Logam (*Material Removal Rate*)

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

Laju pelepasan logam pada *EDM* didefinisikan sebagai berikut:

$$MRR = k \cdot t \cdot v_c \cdot \rho$$

(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)

2.8.2 Kecepatan Pemotongan (*Cutting Speed*)

Secara umum kecepatan pemotongan (*cutting speed*) didefinisikan jumlah volume benda kerja yang terbang dalam inch persegi per jam (*square inch per hour*), dan tiap mesin *WEDM* yang dibuat oleh perusahaan yang berbeda memiliki karakteristik kecepatan pemotongan yang berbeda-beda.

Tetapi perbedaan dalam penentuan ketebalan benda kerja, jenis material dan ketelitian hasil pengerjaan yang diinginkan akan sangat menentukan kecepatan pemotongan pada proses pemotongan menggunakan WEDM. Konduktivitas dan *melting properties* juga akan berpengaruh pada kecepatan pemotongan, aluminium memiliki kecepatan pemotongan yang lebih cepat dari pada baja karbon, hal ini disebabkan aluminium memiliki titik leleh yang lebih rendah dibanding baja karbon.

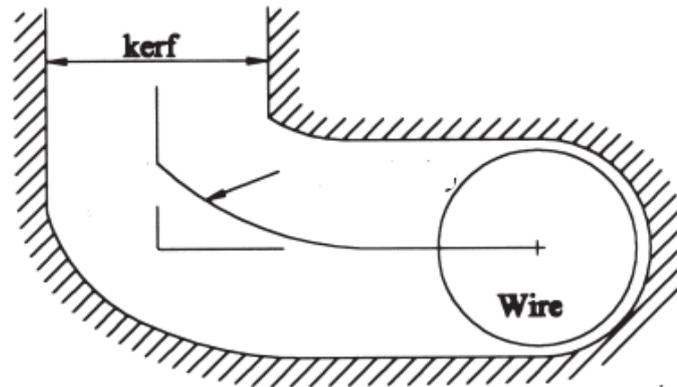
2.8.3 Keakuratan (*Accuracy*)

Kesalahan bentuk geometrik pada benda kerja hasil pemesinan menggunakan WEDM sangat berhubungan dengan keakuratan proses pemotongan. Ketelitian pada saat proses pemotongan ini dapat ditentukan oleh kesalahan penyetingan beberapa parameter, kesalahan penentuan koordinat pemotongan, kesalahan penentuan nilai kompensasi kawat, adanya *bicycle effect* dan *barrel 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.

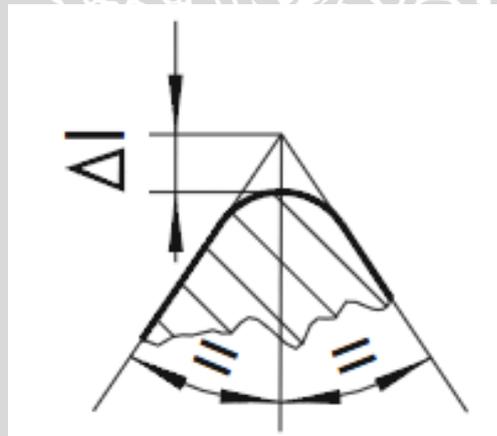
Wire lag dapat terjadi akibat percikan listrik yang terlalu besar, tegangan penarikan kawat yang rendah, tekanan *flushing* yang terlalu tinggi, *gap voltage* yang terlalu sempit, jarak *nozzle* cairan dielektrik yang terlalu jauh dan kecepatan pemakanan terlalu tinggi.



Gambar 2.12 *Bicycle effect*
Sumber: Hsue & Liao (1997:656)

2.8.4 *Corner Error*

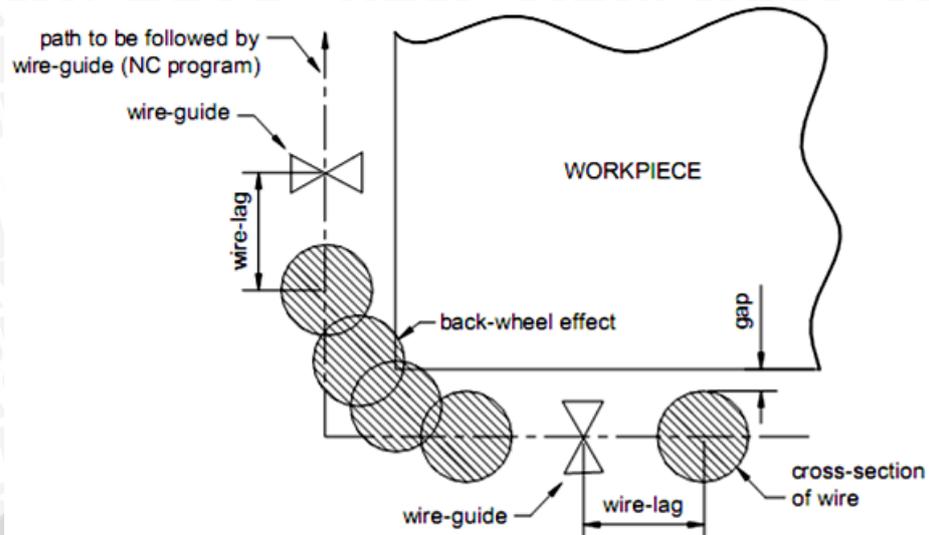
Corner error dapat didefinisikan sebagai hilangnya ketinggian pada bagian (Δl) pada pemotongan sudut (Lin, 2001), merupakan jarak antara ujung sudut yang di rencanakan dan yang terpotong. Gambar dibawah menunjukkan *corner error* pada proses pemotongan dengan *wire EDM*.



Gambar 2.13 *Corner Error*
Sumber: Int J Adv Manuf Technol (2009:859)

Ketidak akurasian dalam pemotongan sudut dapat disebabkan oleh beberapa hal sebagai berikut:

1. *Wire Lag* merupakan fenomena defleksi kawat. pada kenyataannya, gaya yang bekerja pada kawat menyebabkan kawat membengkok berlawanan dengan arah pemakanan.



Gambar 2.14 Efek *Wire Lag* pada pemotongan sudut.
Sumber: SINHA, (2010 : 2)

2. Perubahan arah pemakanan. Hal ini menyebabkan perubahan dari defleksi kawat karena kesetimbangan gayanya terganggu.
3. Meningkatnya intensifikasi dari medan listrik di sekitar puncak sudut. Hal ini menyebabkan ketidakstabilan tingkat removal material.

Tiga kelompok sudut dapat dikelompokkan berdasarkan penyebab terjadinya *corner error*. Kelompok dengan sudut lebih dari 135° , kelompok dengan sudut antara 30° hingga 135° , dan kelompok dengan sudut lebih kecil dari 30° .

Tabel 2.1 Sudut berdasarkan penyebab terjadinya *corner error*

Sudut	135°	$30^\circ < \text{sudut} < 135^\circ$	Sudut $< 30^\circ$
Penyebab <i>Corner error</i>	<i>Wire deflection</i>	Perubahan arah pemakanan	Intensifikasi medan listrik

Sumber : Fuzzy Sets and Systems 122 (2001 : 503)

2.9 Baja Paduan

Perbedaan mendasar dari baja karbon dengan baja paduan terletak pada dominasi atas unsur dalam suatu baja. Jika yang mendominasi sifat fisik dan mekanik adalah prosentase atau kadar karbon maka dapat disebut sebagai baja karbon sedang bila yang mendominasi sifat fisik dan mekanik adalah paduan (selain unsur karbon) maka dapat disebut sebagai baja paduan. Unsur yang paling

banyak digunakan untuk baja paduan, yaitu: Cr, Mn, Si, Ni, W, Mo, Ti, Al, Cu, Nb dan Zr.

Tujuan dilakukan penambahan unsur yaitu:

- Untuk menaikkan sifat mekanik baja (kekerasan, ketahanan, kekuatan tarik dan sebagainya)
- Untuk meningkatkan daya tahan terhadap reaksi kimia (oksidasi dan reduksi)
- Untuk membuat sifat-sifat spesial

2.9.1 Klasifikasi Baja Paduan

a. Baja Paduan Rendah

bila jumlah unsur tambahan selain karbon lebih kecil dari 8%, misalnya : baja ASSAB 618 terdiri atas 0,37% C; 0,37% Si; 1,40% Mn; 2,0% Cr; 1,0% Ni; 0,2% Mo [Dalam hal ini 4,9% < 8%].

b. Baja Paduan Tinggi

bila jumlah unsur tambahan selain karbon lebih dari atau sama dengan 8%, misalnya : baja M3-1 (AISI) mempunyai kandungan unsur : 1,25% C; 4,5% Cr; 6,2% Mo; 6,7% W; 3,3% V.

2.9.2 Pengaruh Penambahan Unsur paduan

Jumlah unsur paduan dalam baja akan menyebabkan perubahan pada sifat baja paduan tersebut. Berikut beberapa unsur paduan tersebut serta pengaruhnya terhadap baja paduan:

1. Karbon (C)

Peningkatan kadar karbon menyebabkan peningkatan *hardenability* dan *tensile strength*, akan tetapi menurunkan *ductility* dan *weldability*.

2. Mangan (Mn)

Peningkatan kadar mangan akan meningkatkan *hardenability* dan *tensile strength*.

3. Sulfur (S)

Sifat sulfur adalah meningkatkan sifat permesinan, mengurangi *ductility*, kekuatan *impact*, dan *weldability*

4. Silicon (Si)

Merupakan bahan yang dapat memperbaiki kekuatan baja, menaikkan kekuatan tarik dan kekerasan baja. Tetapi jika terlalu tinggi akan menyebabkan *crack*.

5. Phospor (P)

Pada baja phosphor memperbaiki sifat permesinan dan tahan terhadap korosi.

6. Nitrogen (N)

Kadar nitrogen yang lebih besar dari 1 % akan menyebabkan *porosity* dan *crack*.

2.9.3 Baja ASSAB 618

Baja ASSAB 618 Supreme adalah paduan baja Cr-Ni-Mo yang dibuat dengan *vacuum degassing* serta didisbusikan 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%

2.10 Hipotesa

Wire tension dan *Wire feed rate* berpengaruh terhadap besar kesalahan geometrik berupa *corner error* pada proses permesinan dengan *Wire EDM*. Meningkatnya *wire feed rate* akan menyebabkan *corner error* yang dihasilkan semakin besar karena akan menyebabkan terjadinya *wire lag* dan perubahan defleksi kawat elektroda saat arah pemakanan berubah. Sedangkan dengan meningkatkan *Wire Tension* akan menyebabkan defleksi dari kawat elektroda semakin kecil sehingga *corner error* yang terjadi semakin kecil.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian

Penelitian dilakukan dengan menggunakan metode eksperimental. Metode ini dijalankan dengan pengamatan secara langsung untuk mengetahui pengaruh parameter pemotongan yang berupa variasi *wire tension* dan *wire feed rate* pada *Wire EDM* terhadap *corner error* hasil pemotongan baja paduan ASSAB 618.

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. Pada penelitian ini variabel bebas yang digunakan adalah sebagai berikut:

- *Wire tension* :
 - 800 gram
 - 900 gram
 - 1000 gram
 - 1100 gram
- *Wire feed rate* :
 - 3 mm/s
 - 4 mm/s
 - 5 mm/s.

3.2.2 Variabel Terikat (*Depent Variable*)

Variabel terikat adalah variabel yang besar nilainya bergantung pada variabel bebas dan diketahui setelah penelitian dilakukan. Pada penelitian ini variabel terikat yang diamati adalah besar *corner error* pada spesimen hasil pemotongan.

3.3 Bahan dan Peralatan Penelitian

3.3.1 Bahan

- Baja ASSAB 618
 - Komposisi:

<i>Carbon (C)</i>	: 0,37%
<i>Silicon (Si)</i>	: 0,30%
<i>Manganese (Mn)</i>	: 1,40%
<i>Chromium (Cr)</i>	: 2,0%
<i>Nickel (Ni)</i>	: 1,0%
<i>Molybdenum (Mo)</i>	: 0,2%
 - *Tensile Strength* : 1080 N/mm²
 - *Yield Strength* : 990 N/mm²

3.3.2 Peralatan

- Mesin Wire EDM Mitsubishi BA-8

Spesifikasi :

 - *Maximum submerged workpiece dimensions* : 1050 x 820 x 415 (mm)
 - *Maximum submerged workpiece weight* : 1500 kg
 - *Table dimensions* : 880 x 680 mm
 - *Machining range X – Y* : 600 x 400 mm
 - *Maximum Z – Axis height* : 420 mm
 - *U – V Axis travel (from centre)* : ± 75 mm
 - *Taper angle @ thickness* : 15 deg. @ 265 mm
 - *Wide angle taper (optional guide required)* : 45 deg. @ 2,4”
 - *Minimum drive unit / resolution* : 0,0001 / 0,05 µm
 - *Table rapid feed speed* : 1300 mm/min
 - *Wire diameter possible* : 0,1 – 0,3 mm
 - *Minimum start hole diameter* : 0,5 mm
 - *Maximum wire spool size STD* : 10 kg
 - *Filter / type* : 2 / paper
 - *Filter tank capacity* : 800 ℓ
 - *Machine system dimensions* : 2685 x 2816 mm
 - *Machine installed height* : 2275 mm

- *Machine system weight* : 4135 kg
- *Power requirement* : 200 – 230 V
- *Compressed air requirement* : 2,7cu.ft/min@71–100 psi



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

- *Scanner HP DESKJET F2476*

Digunakan untuk pengambilan gambar penampang profil sudut benda kerja.



Gambar 3.2 *Scanner HP DESKJET F247*
Sumber : Dokumentasi Pribadi

- *Jangka Sorong*

Digunakan untuk mengambil untuk mengukur dimensi benda kerja.



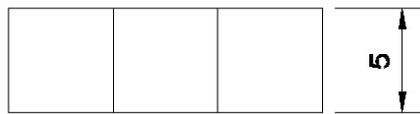
Gambar 3.3 Mistar Insuts
Sumber : Dokumentasi Pribadi

- *Software AUTOCAD 2011*

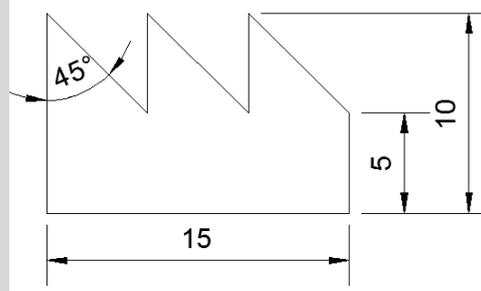
Untuk pembuatan gambar benda kerja dan mengukur *corner error* dari benda kerja.

3.3.3 Benda Kerja

Benda kerja yang akan dibuat pada proses pemotongan dengan *Wire EDM* memiliki sudut sebesar 45° .



Gambar 3.4 Benda kerja tampak atas



Gambar 3.5 Benda kerja tampak depan

3.4 Prosedur Penelitian

3.4.1 Proses Pengambilan Spesimen

1. Menyiapkan gambar pemotongan spesimen.
2. Menyiapkan spesimen yang akan digunakan yaitu baja paduan ASSAB 618 dengan tebal 10 mm.
3. Menyiapkan mesin *Wire EDM* Mitsubishi BA-8.

- Melakukan pemotongan sesuai dengan parameter – parameter yang telah ditentukan.

3.4.2 Proses Pengambilan Data

- Membersihkan hasil pemotongan
- Melakukan pengukuran dengan mistar ingsut untuk tiap spesimen yang telah dipotong.
- Ukuran tiap spesimen yang didapat dengan mistar ingsut dikalikan 10.
- Melakukan pengambilan gambar dengan *scanner* untuk setiap spesimen dengan pembesaran 1000%, format gambar berupa jpg.
- Gambar diimpor kedalam program *Auto CAD* 2011.
- Melakukan pengukuran *corner error* dengan program *Auto CAD* 2011, dengan cara membandingkan disain spesimen dan gambar spesimen.



Gambar 3.6 *Corner Error*

Sumber: Int J Adv Manuf Technol (2009:859)

- Melakukan pengambilan dan pengolahan data menggunakan Microsoft Excel
- Melakukan pembahasan dan penarikan kesimpulan

3.5 Waktu dan Tempat Penelitian

- Tempat Penelitian
Laboratorium Produksi Politeknik Negeri Malang.
- Waktu Penelitian
Waktu penelitian dilakukan mulai Desember 2011

3.6 Rancangan Pengolahan dan Analisa Data.

Pada penelitian ini menggunakan model analisa varian dua arah dengan pengulangan 3 kali pada tiap interaksi. Dengan analisa varian dua arah ini akan diketahui apakah *wire tension* dan *wire feed rate* berpengaruh terhadap *corner error* hasil pemotongan spesimen dengan *wire EDM*.

Tabel 3.1 Rancangan Penelitian

		Wire feed rate		
		14 cm/s	17 cm/s	20 cm/s
Wire Tension	800 gr	u_{111}	u_{211}	u_{311}
		u_{112}	u_{212}	u_{312}
		u_{113}	u_{213}	u_{313}
	Rata - Rata	u_{11}	u_{21}	u_{31}
	900 gr	u_{121}	u_{221}	u_{321}
		u_{122}	u_{222}	u_{322}
		u_{123}	u_{223}	u_{323}
	Rata - Rata	u_{12}	u_{22}	u_{32}
	1000 gr	u_{131}	u_{231}	u_{331}
		u_{132}	u_{232}	u_{332}
		u_{133}	u_{233}	u_{333}
	Rata - Rata	u_{13}	u_{23}	u_{33}
	1100 gr	u_{141}	u_{241}	u_{341}
		u_{142}	u_{242}	u_{342}
		u_{143}	u_{243}	u_{343}
Rata - Rata	u_{14}	u_{24}	u_{34}	

3.7 Analisa Varian Dua Arah

Untuk pengolahan data digunakan bantuan Microsoft Excel untuk menghitung nilai yang sesungguhnya dengan mengkalikan nilai yang didapat dari gambar dengan skala yang telah kita dapatkan.

Untuk analisa data digunakan bantuan Microsoft Excel untuk analisa secara statistik dan grafis. Untuk analisa statistic akan dianalisa menurut analisa varian seperti yang dijelaskan di bawah

Yang akan kita uji adalah pengaruh pada :

1. α = pengaruh pada faktor A
2. β = pengaruh pada faktor B
3. $(\alpha\beta)$ = pengaruh interaksi faktor A dan faktor B

Ketiga hipotesanya ditulis sebagai berikut :

1. $H_{01} : \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_i$
 $H_{11} : \text{paling sedikit satu } \alpha_i = 0$
2. $H_{02} : \beta_1 = \beta_2 = \beta_i$
 $H_{12} : \text{paling sedikit satu } \beta_i = 0$
3. $H_{03} : (\alpha\beta)_{11} = (\alpha\beta)_{12} = (\alpha\beta)_{ij}$
 $H_{13} : \text{paling sedikit satu } (\alpha\beta)_{ij} = 0$

Tiap pengujian hipotesa diatas didasarkan pada perbandingan varian yang bebas dan varian penduganya

$$JKT = \sum_{i=r}^r \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^t (Y_{ijk} - Y_{...})^2$$

$$JKA = ct \sum_{i=r}^r (Y_i - Y_{...})^2$$

$$JKB = rt \sum_{k=1}^t (Y_{.j} - Y_{...})^2$$

$$JKAB = \sum_{i=r}^r \sum_{j=1}^c (Y_{ij} - Y_{i...} - Y_{.j} + Y_{...})^2$$

$$JKB = \sum_{i=r}^r \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^t (Y_{ijk} - Y_{ij})^2$$

Maka dapat dituliskan persamaan sebagai berikut :

$$JKT = JKA + JKB + JKAB + JKB$$

Apabila masing – masing dibagi dengan derajat bebasnya akan diperoleh nilai varian dari masing – masing suku tersebut. Nilai ini sering kita sebut sebagai kwadrat tengah yang disingkat KT.

Nilai varian tersebut adalah :

$$1) S_1^2 = \frac{JKA}{r-1}$$

$$2) S_2^2 = \frac{JKB}{c-1}$$

$$3) S_3^2 = \frac{JKAB}{(r-1)(c-1)}$$

$$4) s^2 = \frac{JKG}{rc(t-1)}$$

Untuk menguji ketiga hipotesa di atas kita hitung harga F_{hitung} dari masing masing sumber keragaman (faktor A, B dan interaksi) kemudian dibandingkan dengan tabel F_{tabel} dengan derajat bebas yang sesuai dengan nilai α tertentu.

Nilai f_{hitung} dari masing – masing sumber keragaman adalah sebagai berikut :

$$\text{Untuk faktor A : } F_{hitung} = \frac{s_1^2}{s^2}$$

$$\text{Untuk faktor B : } F_{hitung} = \frac{s_2^2}{s^2}$$

$$\text{Untuk faktor interaksi antara A dan B : } F_{hitung} = \frac{s_3^2}{s^2}$$

Tabel 3.2 Analisa Varian Dua Arah

Sumber Keragaman	dB	JK	KT	F_{hitung}
Pengaruh A	$r - 1$	JKA	$S_1^2 = \frac{JKA}{r - 1}$	$F_{hitung} = \frac{s_1^2}{s^2}$
Pengaruh B	$c - 1$	JKB	$S_2^2 = \frac{JKB}{c - 1}$	$F_{hitung} = \frac{s_2^2}{s^2}$
Pengaruh interaksi A dan B	$(r - 1) \times (c - 1)$	JKAB	$S_3^2 = \frac{JKAB}{(r - 1)(c - 1)}$	$F_{hitung} = \frac{s_3^2}{s^2}$
Galat	$rc(t - 1)$	JKG	$s^2 = \frac{JKG}{rc(t - 1)}$	
Total	$rc t - 1$	JKT		

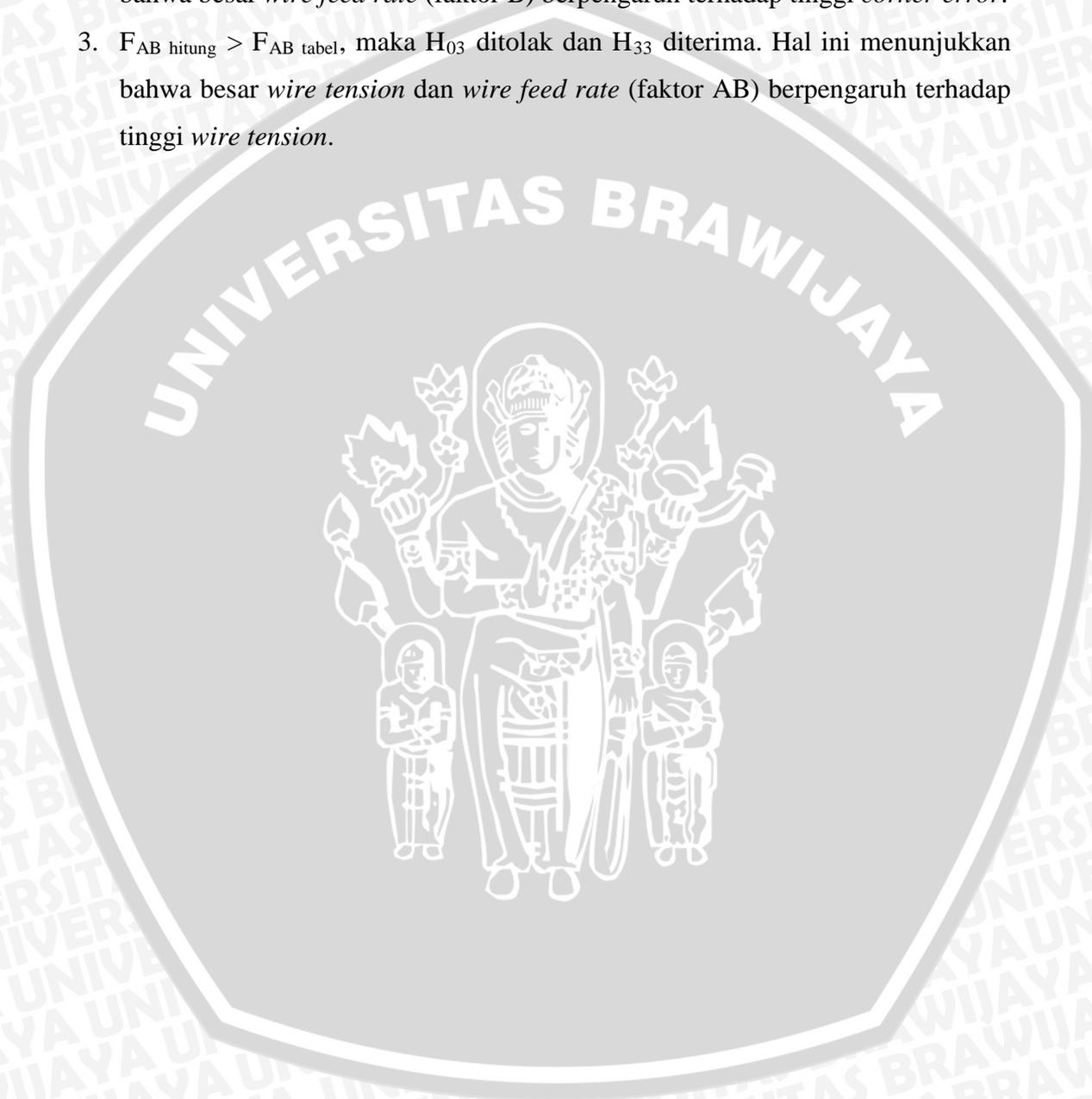
Keterangan :

Faktor A : *Wire Tension*

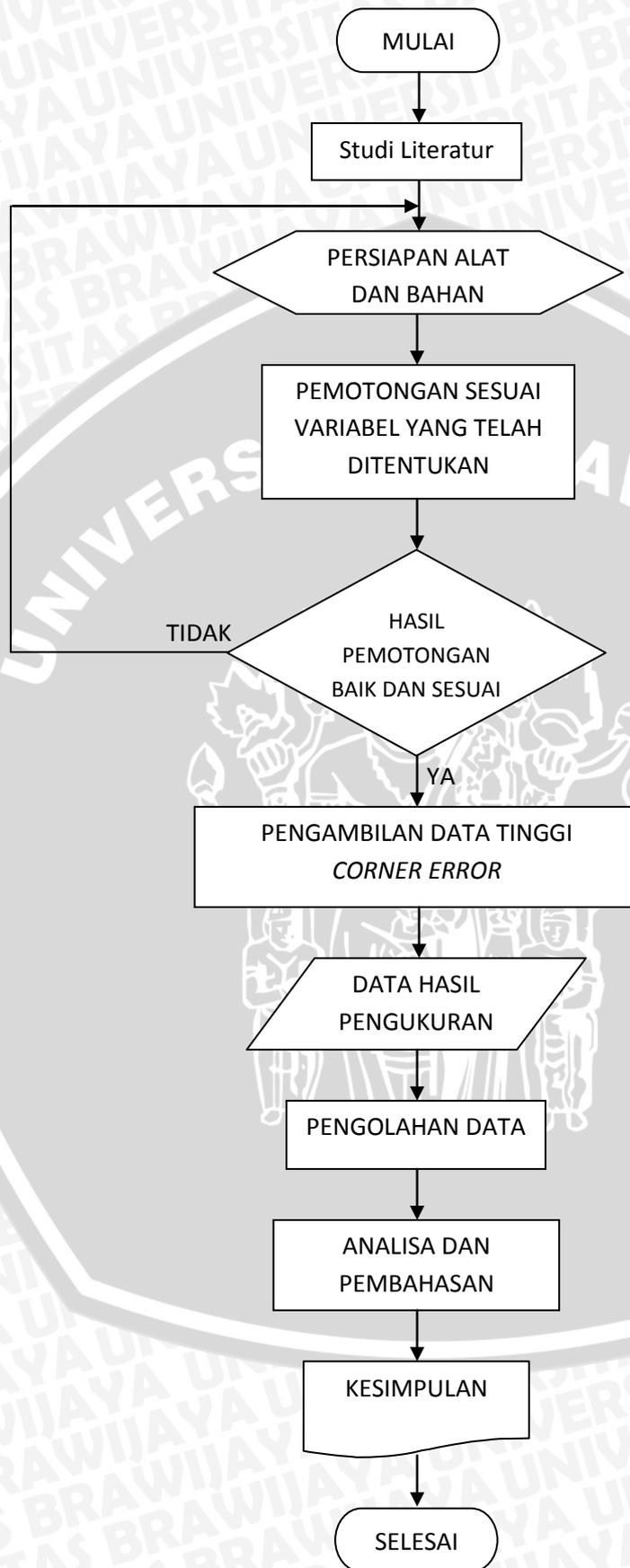
Faktor B : *Wire Feed Rate*

Kesimpulan yang diperoleh adalah dengan cara membandingkan antara F_{hitung} dan F_{tabel} , yaitu :

1. $F_A_{hitung} > F_A_{tabel}$, maka H_{01} ditolak dan H_{11} diterima. Hal ini menunjukkan bahwa besar *wire tension* (faktor A) berpengaruh terhadap tinggi *corner error*.
2. $F_B_{hitung} > F_B_{tabel}$, maka H_{02} ditolak dan H_{22} diterima. Hal ini menunjukkan bahwa besar *wire feed rate* (faktor B) berpengaruh terhadap tinggi *corner error*.
3. $F_{AB_{hitung}} > F_{AB_{tabel}}$, maka H_{03} ditolak dan H_{33} diterima. Hal ini menunjukkan bahwa besar *wire tension* dan *wire feed rate* (faktor AB) berpengaruh terhadap tinggi *wire tension*.



3.8 Diagram Alir Penelitian



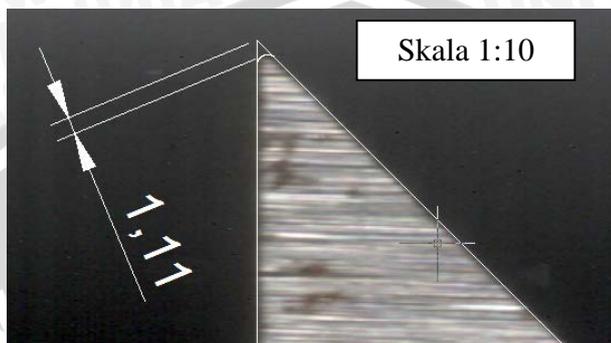
Gambar 3.7 Diagram Alir Penelitian

BAB IV

DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data hasil pengukuran

Untuk mendapatkan data penyimpangan ketegaklurusan, dilakukan pengambilan foto makro dan pengukuran dengan software *AutoCAD* 2011.



Gambar 4.1 Pengukuran Spesimen dengan *AutoCAD* 2011

Pengukuran dilakukan dengan 3 kali pengulangan untuk memberikan tingkat ketelitian data pengukuran yang diperoleh, kemudian diambil rata – rata dari data hasil pengukuran tersebut.

Tabel 4.1 Data nilai *corner error* (Δ)

		<i>Wire Feed Rate</i> (mm/s)		
		3	4	5
<i>Wire Tension</i> (gram)	800	0,125	0,127	0,142
		0,115	0,128	0,132
		0,125	0,126	0,143
	900	0,109	0,111	0,115
		0,109	0,11	0,112
		0,109	0,111	0,111
	1000	0,101	0,103	0,106
		0,099	0,103	0,108
		0,103	0,104	0,108
	1100	0,081	0,089	0,098
		0,072	0,088	0,093
		0,088	0,091	0,093

4.2 Pengolahan Data

4.2.1 Analisa Statistik

Dari data hasil pengukuran *corner error* yang diperoleh, dilakukan analisa varian dua arah untuk mengetahui ada tidaknya pengaruh variasi *wire tension* dan *wire feed rate*, serta interaksi dari keduanya terhadap besar *corner error* hasil pemotongan dengan *Wire EDM*.

Hipotesis dari *wire tension* (pengaruh A) terhadap *corner error* hasil pemotongan adalah:

$$H_{01} : H_{800 \text{ gr}} = H_{900 \text{ gr}} = H_{1000 \text{ gr}} = H_{1100 \text{ gr}}$$

$$H_{11} : H_{800 \text{ gr}} \neq H_{900 \text{ gr}} \neq H_{1000 \text{ gr}} \neq H_{1100 \text{ gr}}$$

Hipotesis dari *wire feed rate* (pengaruh B) terhadap *corner error* hasil pemotongan adalah:

$$H_{02} : d_{3 \text{ mm/s}} = d_{4 \text{ mm/s}} = d_{5 \text{ mm/s}}$$

$$H_{22} : d_{3 \text{ mm/s}} \neq d_{4 \text{ mm/s}} \neq d_{5 \text{ mm/s}}$$

Hipotesis dari interaksi antara tekanan *wire tension* dan *wire feed rate* terhadap kekasaran permukaan hasil pemotongan adalah :

$$H_{03} : (H d)_{800 \text{ gr}, 3 \text{ mm/s}} = (H d)_{900 \text{ gr}, 4 \text{ mm/s}} = (H d)_{1000 \text{ gr}, 5 \text{ mm/s}}$$

$$H_{33} : (H d)_{800 \text{ gr}, 3 \text{ mm/s}} \neq (H d)_{900 \text{ gr}, 4 \text{ mm/s}} \neq (H d)_{1000 \text{ gr}, 5 \text{ mm/s}}$$

Tabel 4.2 Perhitungan analisis varian

Wire Tension \ Wire Feed Rate	D1	D2	D3	TOTAL
	C1	0,365	0,381	0,417
C2	0,327	0,332	0,338	0,997
C3	0,303	0,310	0,322	0,935
C4	0,241	0,268	0,284	0,793
TOTAL	1,236	1,291	1,361	3,888

Keterangan : C = *Wire tension*
D = *Wire feed rate*

Dari tabel 4.2 maka dapat dilakukan perhitungan untuk analisis varian sebagai berikut:

- Faktor koreksi (FK) :

$$FK = \frac{\left[\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^n Y_{ijk} \right]^2}{rcn}$$

$$= \frac{15,116}{4.3.3}$$

$$= 0,4198$$

- Jumlah Kuadrat total :

$$JKT = \{(0,125)^2 + (0,115)^2 + (0,125)^2 + \dots + (0,093)^2\} - FK$$

$$= \{(0,0156) + (0,0132) + (0,0156) + \dots + (0,086)\} - FK$$

$$= 0,4289 - 0,4198$$

$$= 0,0091$$

- Jumlah Kuadrat variable C :

$$JKC = \frac{\{(1,163)^2 + (0,997)^2 + (0,935)^2 + (0,793)^2\}}{cn} - FK$$

$$= \frac{1,352 + 0,9940 + 0,8742 + 0,6288}{9} - FK$$

$$= \frac{3,8496}{9} - 0,4198$$

$$= 0,0078$$

- Jumlah Kuadrat Variable D :

$$JKD = \frac{\{(1,236)^2 + (1,291)^2 + (1,361)^2\}}{rn} - FK$$

$$= \frac{(20.9878) + (12.0868) + (33.5626)}{12} - 0,4198$$

$$= \frac{5,0466}{12} - 0,4198$$

$$= 0,00075$$

- Jumlah Kuadrat Perlakuan (JKP) :

$$\begin{aligned}
 \text{JKP} &= \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c T_{ij}^2}{n} - \text{FK} \\
 &= \frac{\{(0,365)^2 + (0,327)^2 + (0,303)^2 + \dots + (0,284)^2\}}{3} - 0,4198 \\
 &= 0,4286 - 0,4198 \\
 &= 0,0088
 \end{aligned}$$

- Jumlah kuadrat pengaruh interaksi C dan D (JKCD)

$$\begin{aligned}
 \text{JKCD} &= \text{JKPerlakuan} - \text{JKC} - \text{JKD} \\
 &= 0,0088 - 0,0078 - 0,0087 \\
 &= 0,000215
 \end{aligned}$$

- Jumlah Kuadrat Galat (JKG)

$$\begin{aligned}
 \text{JKG} &= \text{JKT} - \text{JKC} - \text{JKD} - \text{JKCD} \\
 &= 0,0091 - 0,0078 - 0,0087 - 0,000215 \\
 &= 0,000313
 \end{aligned}$$

Nilai varian dari masing-masing perlakuan sebagai berikut :

- Kuadrat Tengah pengaruh C (S_c^2)

$$\begin{aligned}
 S_c^2 &= \frac{\text{JKC}}{r-1} \\
 &= \frac{0,0078}{4-1} \\
 &= 0,0026
 \end{aligned}$$

- Kuadrat Tengah pengaruh D (S_d^2)

$$\begin{aligned}
 S_d^2 &= \frac{\text{JKD}}{r-1} \\
 &= \frac{0,00075}{3-1} \\
 &= 0,000375
 \end{aligned}$$

- Kuadrat Tengah pengaruh interaksi C dan D (S_{cd}^2)

$$\begin{aligned} S_{cd}^2 &= \frac{JKCD}{(r-1)(c-1)} \\ &= \frac{0,000215}{(4-1)(3-1)} \\ &= 0,0000358 \end{aligned}$$

- Kuadrat Tengah Galat (S^2)

$$\begin{aligned} S^2 &= \frac{JKG}{rc(n-1)} \\ &= \frac{0,000313}{4,3(3-1)} \\ &= 0,000013 \end{aligned}$$

Nilai F hitung dari masing-masing sumber keragaman sebagai berikut:

- F_{hitung} pengaruh C

$$\begin{aligned} F_{c \text{ hitung}} &= \frac{S_c^2}{S^2} \\ &= \frac{0,0026}{0,000013} \\ &= 199,361 \end{aligned}$$

- F_{hitung} pengaruh D

$$\begin{aligned} F_{d \text{ hitung}} &= \frac{S_d^2}{S^2} \\ &= \frac{0,000375}{0,000013} \\ &= 28,754 \end{aligned}$$

- F_{hitung} pengaruh C dan D

$$F_{cd \text{ hitung}} = \frac{S_{cd}^2}{S^2}$$

$$= \frac{0,0000358}{0,000013}$$

$$= 2,747$$

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Analisis Varian Dua Arah

Sumber Keragaman	JK	Db	KT	F Hitung	F Tabel
<i>Wire Tension</i> (C)	0,0078	3	0,0026	199,361	3,01
<i>Wire Feed Rate</i> (D)	0,00075	2	0,000375	28,754	3,40
Interaksi C dan D	0,000215	6	0,0000358	2,747	2,51
Galat	0,000313	24	0,0000313		
Total	0,00908	35	0,00304		

Dari tabel 4.3 diatas, dapat diperoleh kesimpulan:

- I. $F_C \text{ hitung} > F_C \text{ tabel}$ maka H_0^1 ditolak dan H_1^1 diterima. ini berarti bahwa variasi *Wire tension* berpengaruh terhadap penyimpangan berupa *corner error* hasil pemotongan *wire EDM* pada baja paduan ASSAB 618.
- II. $F_D \text{ hitung} > F_D \text{ tabel}$ maka H_0^2 ditolak dan H_1^2 diterima, ini berarti bahwa variasi *Wire feed rate* berpengaruh terhadap penyimpangan berupa *corner error* hasil pemotongan *wire EDM* pada baja paduan ASSAB 618.
- III. $F_{CD} \text{ hitung} > F_{CD} \text{ tabel}$ Maka H_0^3 ditolak dan H_1^3 diterima, ini berarti bahwa interaksi antara *Wire tension* dan *Wire feed rate* berpengaruh secara nyata terhadap penyimpangan berupa *corner error* hasil pemotongan *wire EDM* pada baja paduan ASSAB 618.

Dari kesimpulan diatas terlihat bahwa variasi *Wire tension* dan *Wire feed rate* (Faktor CD) mempunyai pengaruh yang nyata terhadap penyimpangan berupa *corner error* hasil pemotongan baja paduan ASSAB 618 menggunakan mesin *wire EDM* Mitshubishi BA-8 dengan tingkat keyakinan 95%.

4.2.2 Analisis Grafis

Dari data pada tabel 4.1 lalu dihitung rata-rata *corner error* pada tiap spesimen yang dijelaskan pada tabel 4.4 berikut:

Tabel 4.4 Rata – Rata *Corner Error*

		<i>Wire feed rate</i> (mm/s)		
		3	4	5
<i>Wire tension</i> (gram)	800	0,122	0,127	0,139
	900	0,109	0,111	0,113
	1000	0,101	0,103	0,107
	1100	0,080	0,089	0,095

4.2.2.1 Analisis Grafik Besar *Wire Tension* Terhadap *Corner Error*

Pada persamaan regresi pengaruh besar *wire tension* terhadap *corner error* dilakukan untuk masing-masing *wire feed rate* yaitu 3 mm/s, 4 mm/s, dan 5 mm/s. Dari data-data yang diperoleh, maka persamaan regresi yang digunakan adalah regresi persamaan polinomial (non-linier).

Dari perhitungan data-data pada tabel 4.4 dengan bantuan *Microsoft Excel* maka diperoleh grafik dan persamaan regresi polinomial untuk pengaruh variasi *wire tension* terhadap *corner error* pada setiap *wire feed rate* sebagai berikut:

- Untuk *wire feed rate* 3 mm/s

$$Y = -0,037x^2 + 0,29x + 0,089$$

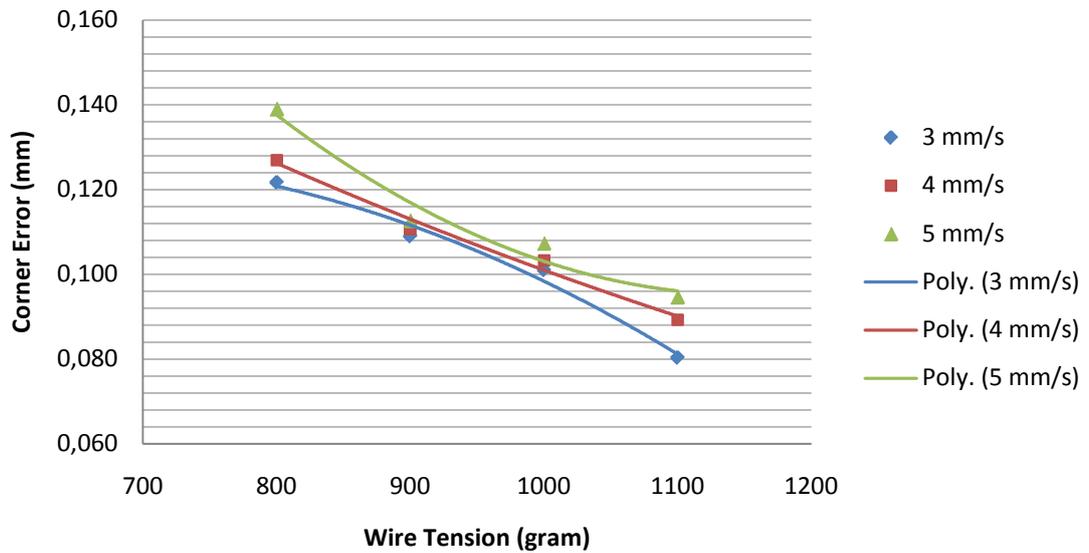
$$R^2 = 0,847$$
- Untuk *wire feed rate* 4 mm/s

$$Y = -0,054x^2 + 0,184x + 0,161$$

$$R^2 = 0,994$$
- Untuk *wire feed rate* 5 mm/s

$$Y = -0,123X^2 + 0,705X - 0,167$$

$$R^2 = 0,965$$



Gambar 4.2 Grafik pengaruh *wire tension* terhadap *corner error* pada setiap *wire feed rate*

4.2.2.2 Analisa Grafik Besar *Wire Feed Rate* Terhadap *Corner Error*

Pada persamaan regresi pengaruh besar *wire feed rate* terhadap *corner error* dilakukan untuk masing-masing besar penarikan kawat yaitu 800 gram, 900 gram, 1000 gram, dan 1100 gram. Dari data-data yang diperoleh, maka persamaan regresi yang digunakan adalah regresi polinomial.

Dari perhitungan data-data pada tabel 4.4 dengan bantuan *Microsoft Excel* maka diperoleh grafik dan persamaan regresi polinomial untuk pengaruh variasi *wire feed rate* terhadap *corner error* pada setiap *wire tension* sebagai berikut:

- Untuk *wire tension* 800 gram

$$Y = -0.037x^2 + 0.29x + 0.089$$

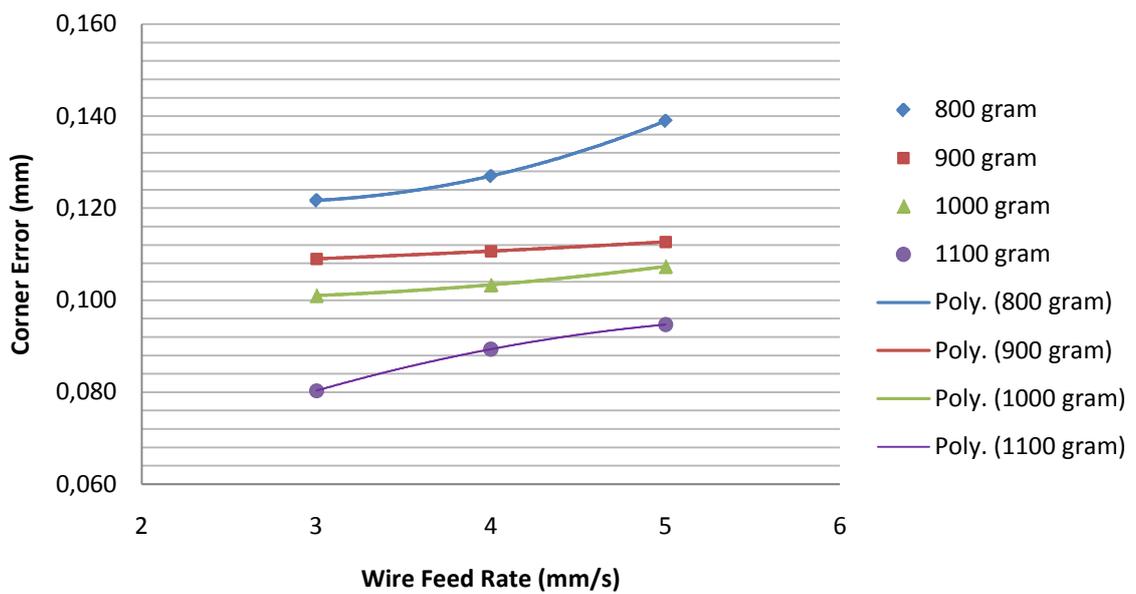
$$R^2 = 0.847$$

- Untuk *wire tension* 900 gram

$$Y = -0.054x^2 + 0.184x + 0.161$$

$$R^2 = 0.994$$

- Untuk *wire tension* 1000 gram
 $Y = -0.123X^2 + 0.705X - 0.167$
 $R^2 = 0.965$
- Untuk *wire tension* 1100 gram
 $Y = -0,001X^2 + 0,021X + 0,031$
 $R^2 = 0,9356$



Gambar 4.3 Grafik Hubungan Besar *Wire Feed Rate* Terhadap *Corner Error* pada setiap *wire tension*

4.3 Pembahasan

Dari hasil analisis varian klasifikasi dua arah yang dapat dilihat pada tabel 4.3 dapat diketahui bahwa besar *wire tension*, *wire feed rate*, serta interaksi antara besar *wire tension* dan *wire feed rate* berpengaruh nyata terhadap *corner error* pada proses permesinan dengan *wire EDM* dengan tingkat keyakinan 95%. Hal ini dapat dilihat dari perbandingan nilai F_{hitung} dari faktor C (*wire tension*) dan F_{hitung} dari faktor D (*wire feed rate*) lebih besar dari F_{tabel} , dimana F_{hitung} (faktor C) = 199,361 dan F_{hitung} (Faktor D) = 28,754 sedangkan F_{tabel} (Faktor C) = 3,01 dan F_{tabel} (Faktor D) = 3,40. Demikian juga dengan interaksi antara kedua faktor tersebut anatara *wire tension* dan *wire feed rate*, dimana interaksi kedua faktor tersebut berpengaruh terhadap besar *corner error* yang terbentuk. Hal ini terbukti dari hasil pengolahan data pada tabel 4.3, dimana harga F_{hitung} untuk interaksi keduanya mempunyai

harga yang lebih besar dari pada F_{tabel} , dimana F_{hitung} (faktor CD) = 2,747 sedangkan F_{tabel} (Faktor CD) = 2,51.

4.3.1 Analisis Pengaruh Besar *Wire Tension* Terhadap *Corner Error*

Pada gambar 4.2 dapat dilihat grafik hubungan besar *wire tension* terhadap *corner error* pada setiap *wire feed rate*. Pada grafik tersebut terlihat bahwa untuk semua variasi *wire tension* mulai dari 800 gram, 900 gram, 1000 gram, sampai dengan 1100 gram. *Corner error* yang terjadi pada proses pemotongan dengan *Wire EDM* mengalami penurunan seiring dengan peningkatan *wire tension*. Kondisi penurunan *corner error* yang seiring dengan peningkatan *wire tension* tampak terjadi pada setiap penggunaan *wire feed rate*, yaitu 3 mm/s, 4 mm/s, dan 5 mm/s.

Penurunan *corner error* yang seiring dengan peningkatan besar *wire tension* ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

Pada saat proses permesinan menggunakan *Wire EDM* untuk memotong benda kerja yang memiliki bentuk profil sudut, diperlukan kekakuan kawat elektroda yang tinggi. Kekakuan kawat elektroda sendiri tergantung pada besar *wire tension* yang diterapkan pada kawat elektroda. Dengan kekakuan kawat elektroda yang tinggi maka getaran yang timbul akibat berdefleksinya kawat elektroda akan dapat dikurangi. Sebab apabila *wire tension* semakin rendah, maka kawat elektroda akan dengan mudah berdefleksi sehingga getaran dari kawat elektroda akan semakin besar dan akan menyebabkan terjadinya penyimpangan yang mempengaruhi akurasi dari proses pemotongan dengan *wire EDM*. Kawat elektroda yang berdefleksi akibat nilai *wire tension* yang rendah akan memperbesar *gap* dan menyebabkan tertinggalnya kawat elektroda dari *wire guide* atau yang disebut dengan *wire lag*. Dengan terjadinya *wire lag* maka kawat akan memiliki kecenderungan untuk memotong lebih kearah dalam. Dari fenomena tersebut akhirnya terbentuklah *corner error*.

Salah satu penyebab timbulnya getaran dari kawat elektroda adalah proses *flushing* pada saat proses pemotongan benda kerja berlangsung. Proses *flushing* pada *Wire EDM* dilakukan dengan cara penyemprotan fluida dielektrik ke dalam celah antara kawat elektroda dan benda kerja untuk membawa logam yang terlepas dari benda kerja. Proses

penyemprotan fluida ini tidak dapat secara tepat melewati celah antara kawat elektroda dan benda kerja, fluida yang disemprotkan akan membentur kawat elektroda juga benda kerja sehingga akan menyebabkan getaran pada kawat elektroda dan menyebabkan *corner error*.

Oleh karena itu pada gambar 4.2 terlihat bahwa dengan parameter *wire tension* 800 gram, 900 gram, 1000 gram, hingga 1100 gram memiliki kecenderungan *corner error* yang menurun seiring peningkatan *wire tension* yang diterapkan pada kawat elektroda.

Pada *wire tension* 800 gram kekakuan kawat elektroda lebih kecil dari variasi *wire tension* yang lain, karena tegangan yang dialami kawat elektroda lebih kecil daripada variasi *wire tension* yang lainnya. Dengan semakin kecilnya tingkat kekakuan yang dialami kawat elektroda maka kawat elektroda akan dengan mudah berdefleksi sehingga simpangan yang dialami kawat elektroda pada saat terjadinya getaran akan semakin besar. Hal tersebut yang menyebabkan selain *gap* yang lebih besar, juga mengakibatkan kawat tertinggal dari *wire guide* sehingga *corner error* semakin besar. Hal yang sebaliknya terjadi pada *wire tension* 1100 gram, dimana peningkatan nilai *wire tension* pada kawat elektroda menyebabkan kawat elektroda semakin kaku, sehingga kawat elektroda tidak mudah berdefleksi dan penyimpangan yang terjadi akibat getaran dari kawat elektroda dan *wire lag* akan semakin kecil, *corner error* yang terjadipun semakin kecil.

4.3.2 Analisa Pengaruh *Wire Feed Rate* Terhadap *Corner Error*

Pada gambar 4.3 dapat dilihat grafik hubungan besar *wire feed rate* terhadap *corner error*. Pada grafik tersebut terlihat bahwa untuk semua variasi *wire feed rate* dimulai dari 3 mm/s, 4 mm/s, dan 5 mm/s, *corner error* yang terjadi pada proses *wire EDM* meningkat seiring dengan peningkatan besar *wire feed rate*. Kondisi meningkatnya *corner error* yang seiring dengan peningkatan *wire feed rate* tampak terjadi pada setiap penggunaan *wire tension* pada kawat elektroda yaitu, 800 gram, 900 gram, 1000 gram, dan 1100 gram.

Meningkatnya *corner error* seiring dengan kenaikan *wire feed rate* yang digunakan ini disebabkan oleh semakin tinggi nilai *wire feed rate*

maka jarak (*gap*) antara elektrode kawat dan benda kerja akan semakin sempit. Dengan semakin sempitnya jarak antara elektrode kawat dan benda kerja ini maka percikan akan semakin mudah terjadi dan energi percikan yang ditimbulkan akan semakin tinggi. Dengan semakin tingginya energi percikan ini maka pengerosian benda kerja oleh percikan kawat akan semakin tinggi. Sehingga akan terjadi kesalahan pemotongan dikarenakan pengerosian yang lebih besar dari pengerosian yang seharusnya dan terbentuklah *corner error*.

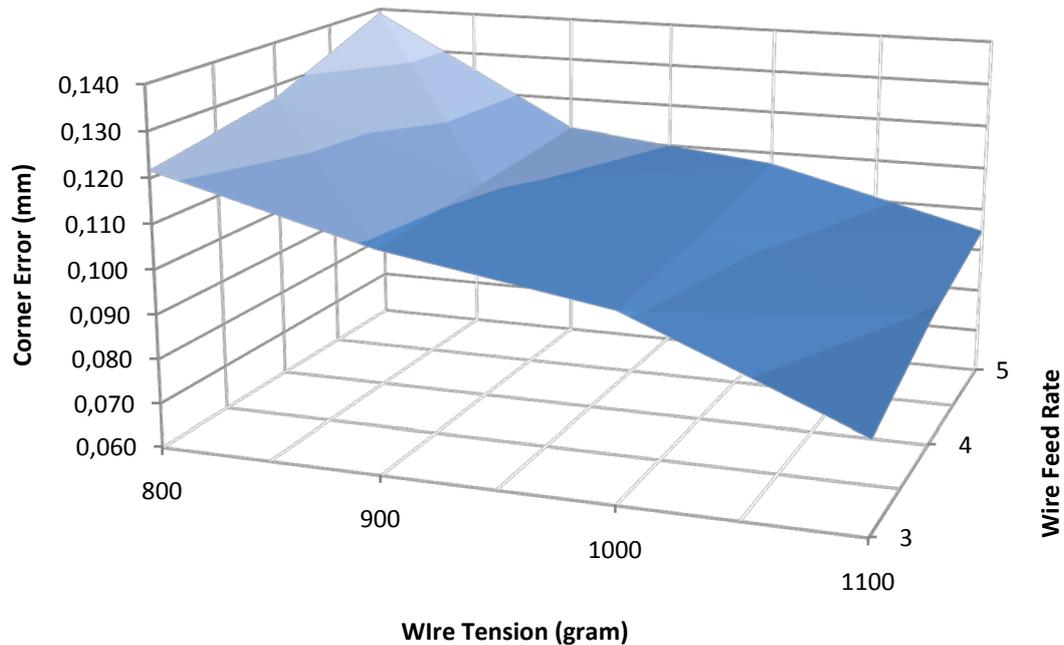
Peningkatan *wire feed rate* juga menyebabkan terjadinya *wire lag* yaitu ketidakselarasan gerak antara *wire guide* dan gerakan aktual kawat elektroda. Ketidakselarasan gerak ini disebabkan pada saat pemotongan kawat elektrode akan tetap fleksibel meskipun telah diberi tegangan dan secara fisik tidak bersentuhan dengan benda kerja. Ini memungkinkan terjadinya lengkungan pada kawat saat proses pemotongan berlangsung. Pada saat lengkungan ini terjadi maka kawat elektroda tidak akan berjalan memotong sesuai dengan jalur yang telah ditentukan, sehingga menyebabkan kesalahan pemotongan berupa *corner error*.

Pada pemotongan benda kerja dengan profil sudut peningkatan *wire feed rate* juga akan mengakibatkan kesetimbangan gaya pemotongan yang terganggu saat perubahan arah pemakanan akan semakin besar, sehingga kawat elektroda akan terkena resultan dari perubahan gaya tersebut dan akan berdefleksi kearah ujung dari profil sudut benda kerja, dan menyebabkan terpotongnya bagian ujung dari profil sudut benda kerja yang membentuk *corner error*.

Pada gambar 4.3 terlihat bahwa parameter *wire feed rate* 3 mm/s, 4 mm/s, hingga 5 mm/s memiliki kecenderungan *corner error* yang meningkat seiring dengan peningkatan *wire feed rate* saat proses pemotongan dengan *wire EDM*. Penyebab kecenderungan *corner error* yang meningkat seperti yang sudah dijelaskan diatas, yaitu semakin sempitnya jarak antara kawat elektroda dengan benda kerja, *wire lag*, dan meningkatnya ketidak setimbangan gaya akibat perubahan arah pemakanan.

4.3.3 Analisa Pengaruh Interaksi Antara Besar Wire Tension dan Wire Feed Rate Terhadap Corner Error

Dari data pada tabel 4.4 dapat dilihat hubungan antara parameter yang digunakan, yaitu variasi besar *wire tension* dan *wire feed rate* terhadap penyimpangan berupa *corner error* yang dapat dilihat dalam grafik berikut.



Gambar 4.4 Grafik Interaksi Besar *Wire Tension* dan *Wire Feed Rate* terhadap *Corner Error*

Pada grafik gambar 4.4 dapat dilihat bahwa pada *wire tension* yang rendah, yaitu 800 gram dan *wire feed rate* 5 mm/s akan dihasilkan *corner error* yang paling besar, sebesar 0,139 mm. Hal ini dikarenakan *wire tension* yang rendah akan mengakibatkan defleksi dari kawat elektroda akan semakin besar, sehingga saat kawat elektroda melakukan gerak makan sebesar 5 mm/s, *wire lag* yang terjadi akan semakin besar dan mengakibatkan *corner error* yang terjadi juga semakin membesar. Seiring dengan ditingkatkannya hingga *wire tension* 1100 gram dengan *wire feed rate* yang sama, *corner error* yang dihasilkan menjadi semakin kecil yaitu sebesar 0,095 mm. Hal ini dikarenakan kawat elektroda yang semakin kaku mengakibatkan defleksi dari kawat elektroda akan semakin semakin

mengecil, sehingga saat kawat elektroda melakukan gerak makan *wire lag* yang terjadi akan semakin kecil. Peningkatan *wire tension* sekaligus mengurangi *corner error* yang juga dihasilkan oleh perubahan arah gerak makan dari kawat elektroda. Defleksi dari kawat elektroda yang disebabkan oleh gaya yang dihasilkan dari perubahan arah pemakanan ke arah sudut profil benda kerja menjadi kecil sehingga *corner error* yang terjadi juga semakin kecil.

Pada *wire feed rate* 4 mm/s terlihat interkasi yang sama dengan *wire feed rate* 5 mm/s yaitu peningkatan *wire tension* yang digunakan untuk proses pemotongan akan menurunkan penyimpangan berupa *corner error*, pada *wire feed rate* 4 mm/s terbentuk *corner error* sebesar 0,127 mm pada *wire tension* 800 gram dan 0,089 mm pada *wire tension* 1100 gram. Penyebab menurunnya *corner error* pada *wire feed rate* 4 mm/s sama halnya seperti pada *wire feed rate* 5 mm/s yaitu peningkatan *wire tension* yang menyebabkan defleksi dari kawat semakin kecil sehingga kawat akan semakin kaku dan nilai *wire lag* yang terjadi akan semakin kecil sehingga penyimpangan berupa *corner error* akan berkurang. Defleksi dari gaya perubahan arah pemakanan yang terjadi juga akan semakin kecil seiring meningkatnya *wire tension* sehingga *corner error* akan semakin kecil.

Pada *wire feed rate* 3 mm/s terbentuk *corner error* sebesar 1,22 mm pada *wire tension* 800 gram dan berkurang hingga 0,08 mm pada *wire tension* 1100 gram. Berkurangnya *corner error* disebabkan oleh hal yang sama seperti pada *wire feed rate* 4 mm/s dan 5 mm/s yaitu semakin kakunya kawat elektroda oleh meningkatnya *wire tension* sehingga defleksi kawat berkurang. Pada *wire feed rate* 3 mm/s *corner error* yang juga akibat defleksi kawat karena perubahan arah pemakanannya kecil karena nilai *wire feed rate* yang kecil sehingga saat diberlakukan *wire tension* sebesar 1100 gram *corner error* yang terbentuk sedikit hanya 0,08 mm.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dan pembahasan pada bab sebelumnya dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. *Wire tension* berpengaruh terhadap penyimpangan berupa *corner error* hasil pemotongan *wire EDM* pada baja paduan ASSAB 618. Berdasarkan hasil penelitian, peningkatan *wire tension* dapat mengurangi *corner error* pada hasil pemotongan dengan *Wire EDM*. *Wire feed rate* berpengaruh terhadap penyimpangan berupa *corner error* hasil pemotongan *wire EDM* pada baja paduan ASSAB 618. Peningkatan *wire feed rate* akan menyebabkan *corner error* hasil pemotongan *wire EDM* yang terbentuk akan semakin tinggi.
2. Interaksi antara *wire tension* dan *wire feed rate* berpengaruh secara nyata terhadap penyimpangan berupa *corner error* hasil pemotongan *wire EDM* pada baja paduan ASSAB 618. Peningkatan *wire feed rate* akan menghasilkan *corner error* yang semakin besar, tetapi dengan peningkatan *wire tension* dapat mengurangi *corner error* yang dihasilkan. Pada *wire tension* yang tinggi, yaitu 1100 gram dan *wire feed rate* 5 mm/s akan dihasilkan penyimpangan ketegaklurusan yang rendah, sebesar 0.095 mm dan *corner error* paling rendah sebesar 0,08 mm dengan *wire tension* 1100 dan *wire feed rate* 3 mm/s. Untuk mengurangi *corner error* yang terbentuk, saat meningkatkan *wire feed rate* pada proses permesinan *wire EDM* sebaiknya diikuti dengan meningkatkan *wire tension*

5.2 Saran

Dari hasil penelitian ini dapat dilanjutkan pengujian dengan berbagai variasi yang lain dan diberikan saran sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh parameter proses permesinan *wire EDM* terhadap kepresisian geometri sudut yang berbeda.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh parameter *wire tension* dan *wire feed rate* terhadap kepresisian benda kerja dan waktu pengerjaan.
3. Format gambar spesimen sebaiknya berupa bmp.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 2011. EDM Wire Tutorial. USA: Makino Inc.
http://www.makino.com/about/article/2-1-2008/EDM_Wire_Tutorial, (diakses tanggal 17 Oktober 2011).
- Abdel, Hassan and Gawad El-Hofy. 2005. *Advanced Machining Processes*. New York : McGraw Hill International.
- Hsue, W.J. & Y.S. Liao. 1997. *Fundamental Geometry Analysis Of Wire Electrical Discharge Machining In Corner Cutting*. International Journal of Machine Tools & Manufacture.
- Jain, V.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.
- Lin CT, Chung IF, Huang SY. 2001. Improvement of machining accuracy by fuzzy logic at corner parts for wire-EDM. *Fuzzy Sets and Systems*.
- Mahapatra, S.S & Amar Patanaik. 2000. *Optimization Of Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) Process Using Taguchi Method*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology.
- Nugraha, Robertha Adi. 2011. *Pengaruh Wire Feed Rate Terhadap Kepresisian Geometri Profil Gigi Involute Pada Pembuatan Spur Gear Menggunakan Wire EDM*. Malang : Jurusan Mesin FT Unibraw 2011.
- 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>, (diakses tanggal 8 November 2011).
- Sommer, Carl & Steve Sommer, M.E. 2000. *Complete EDM Handbook*. Texas: Advance Publishing.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LAMPIRAN 1



Pengukuran *Corner Error* Pada Tiap Spesimen

Skala 1 : 10

Wire Tension 800 gram & *Wire Feed Rate* 3 mm/s

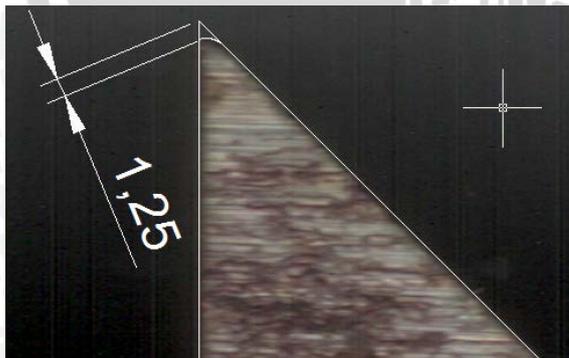
Spesimen 1.1



Spesimen 1.2

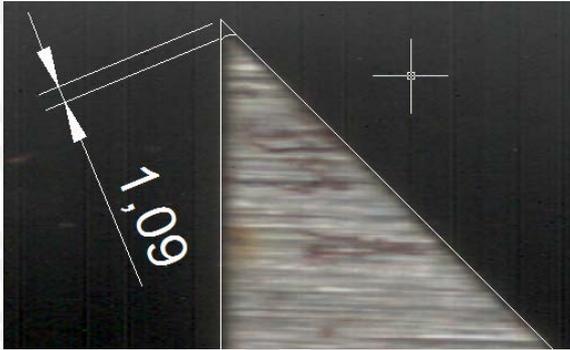


Spesimen 1.3

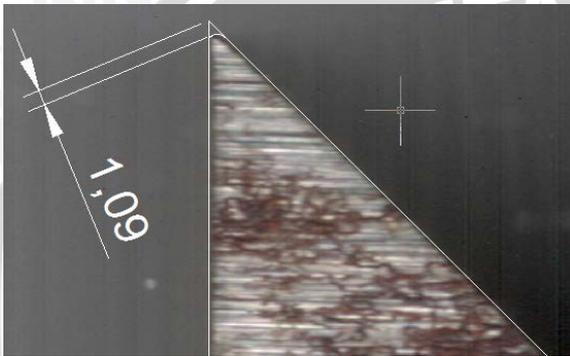


Wire Tension 900 gram & Wire Feed Rate 3 mm/s

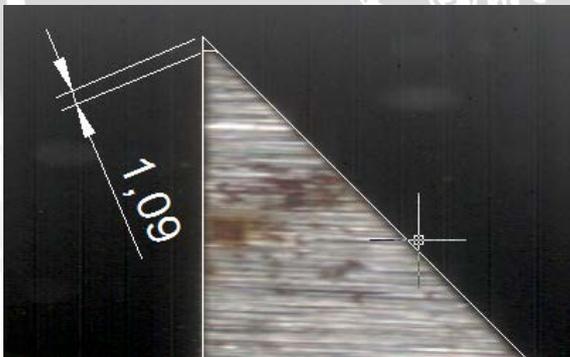
Spesimen 2.1



Spesimen 2.2

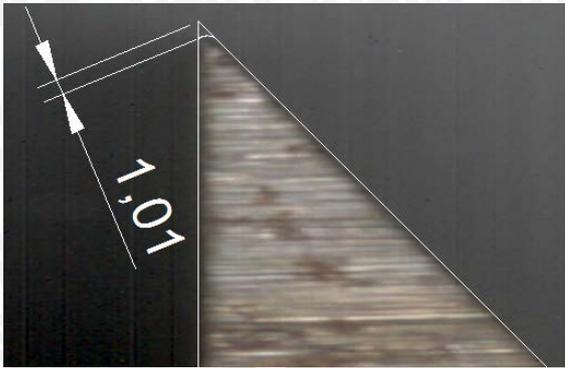


Spesimen 2.3

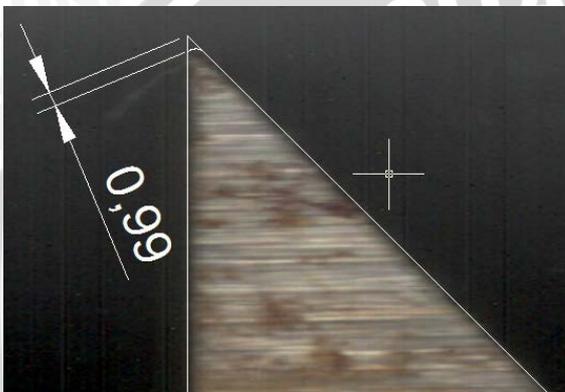


Wire Tension 1000 gram & Wire Feed Rate 3 mm/s

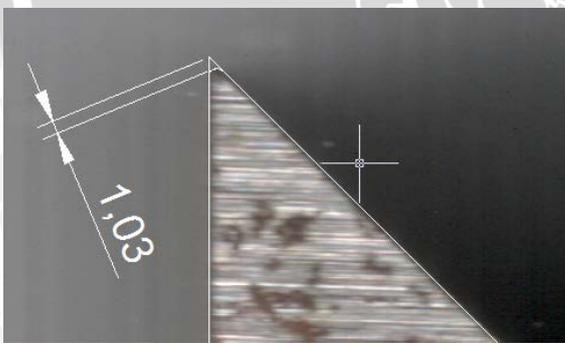
Spesimen 3.1



Spesimen 3.2

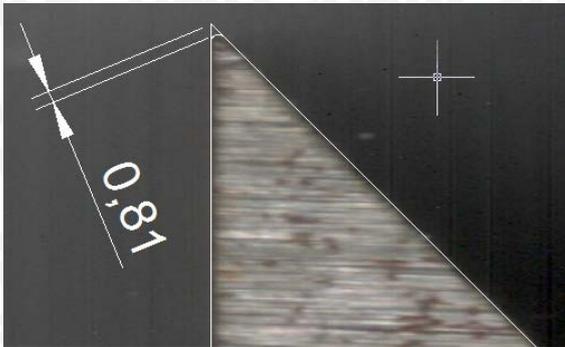


Spesimen 3.3

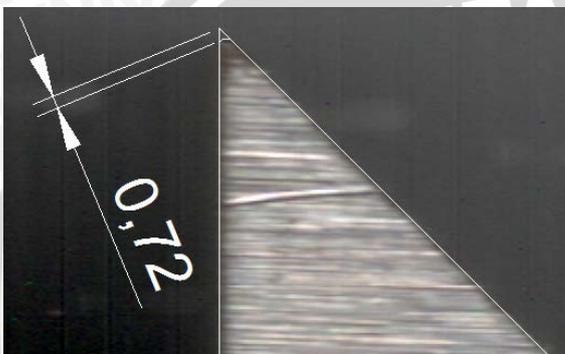


Wire Tension 1100 gram & Wire Feed Rate 3 mm/s

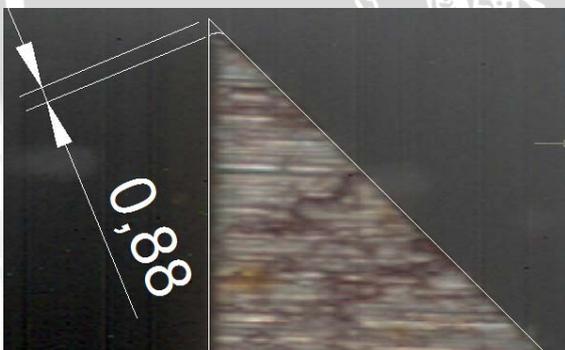
Spesimen 4.1



Spesimen 4.2

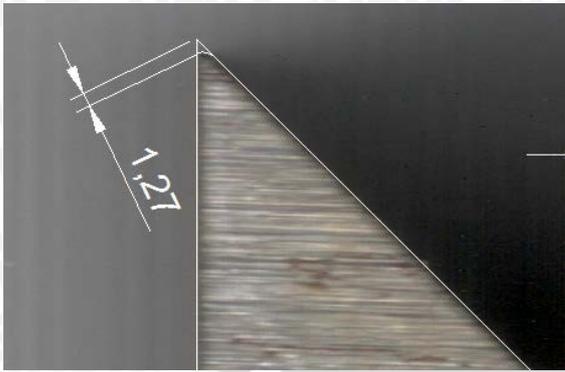


Spesimen 4.3

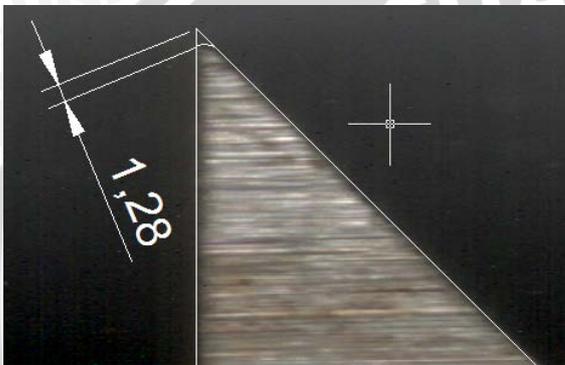


Wire Tension 800 gram & Wire Feed Rate 4 mm/s

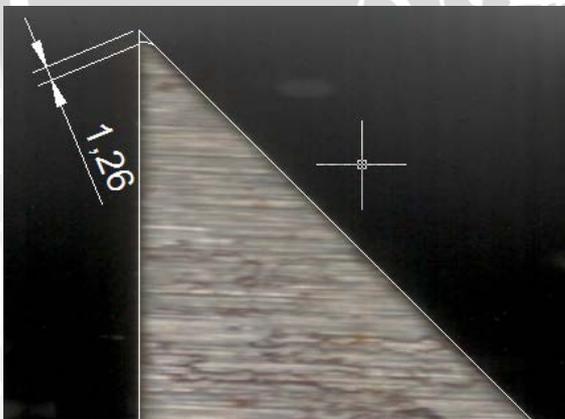
Spesimen 5.1



Spesimen 5.2

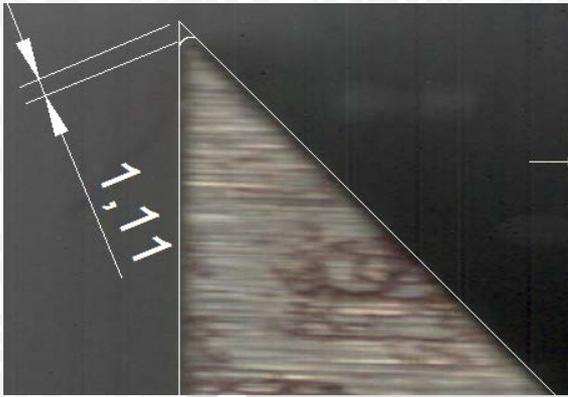


Spesimen 5.3

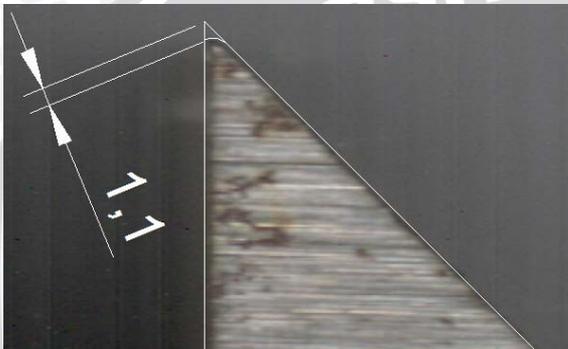


Wire Tension 900 gram & Wire Feed Rate 4 mm/s

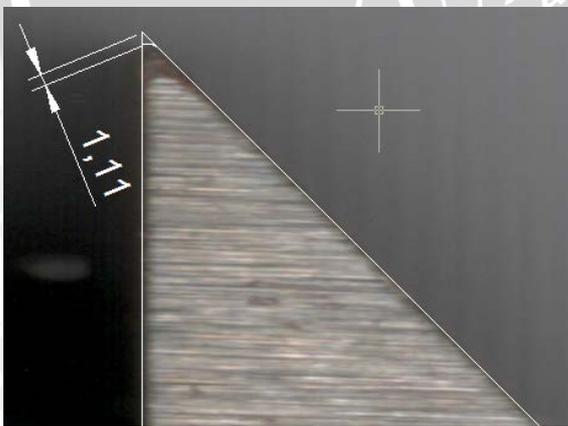
Spesimen 6.1



Spesimen 6.2

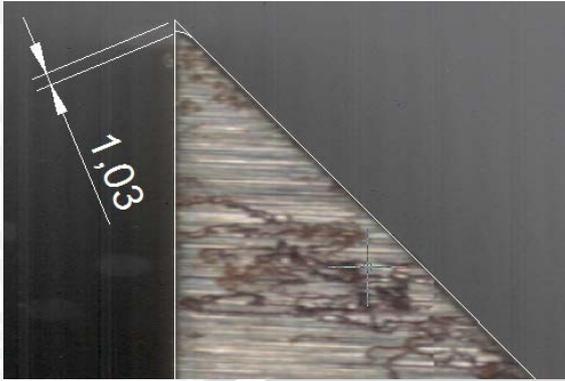


Spesimen 6.3

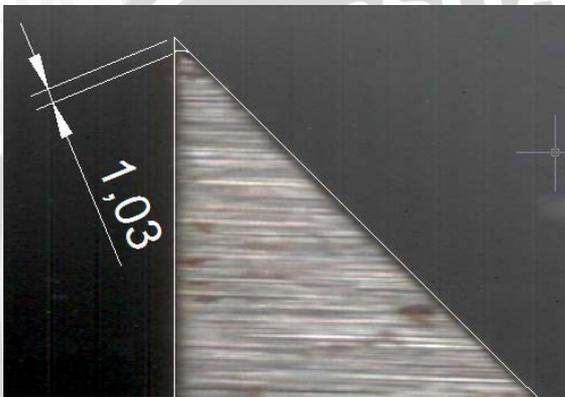


Wire Tension 1000 gram & Wire Feed Rate 4 mm/s

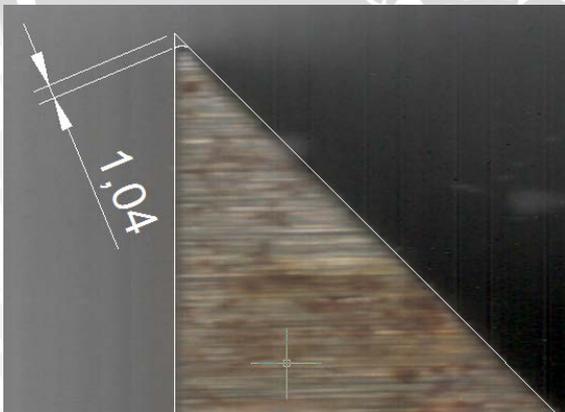
Spesimen 7.1



Spesimen 7.2

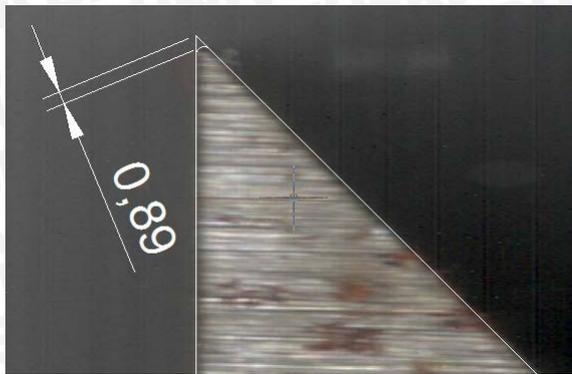


Spesimen 7.3

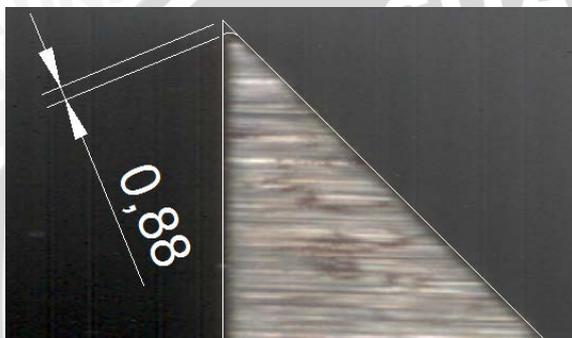


Wire Tension 1100 gram & Wire Feed Rate 4 mm/s

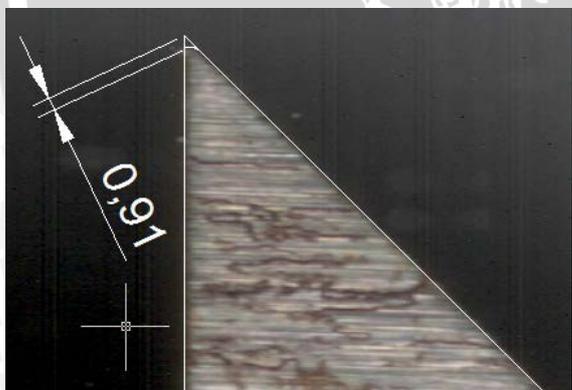
Spesimen 8.1



Spesimen 8.2



Spesimen 8.3



Wire Tension 800 gram & Wire Feed Rate 5 mm/s

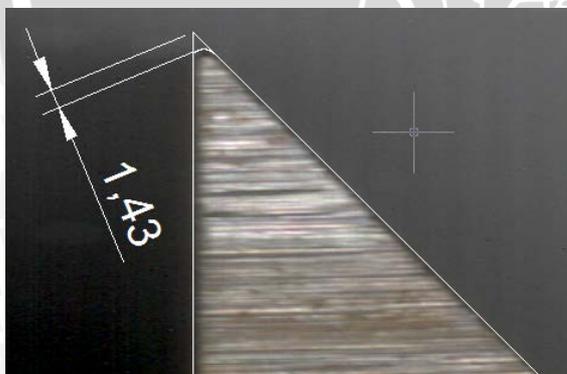
Spesimen 9.1



Spesimen 9.2

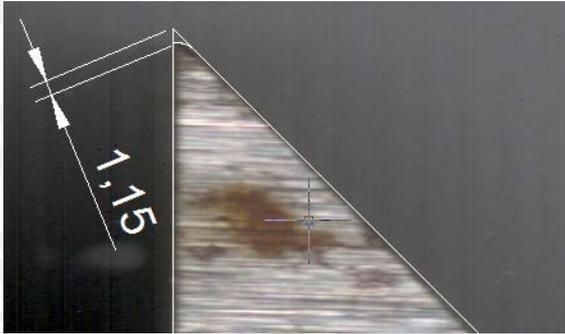


Spesimen 9.3

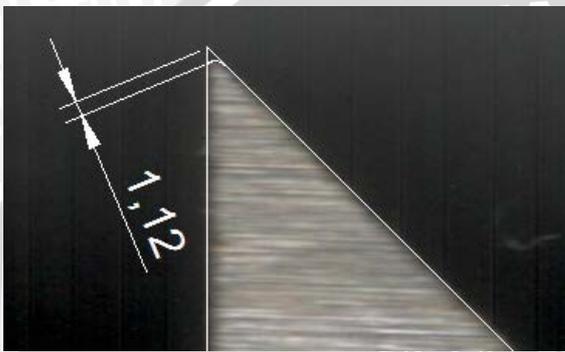


Wire Tension 900 gram & Wire Feed Rate 5 mm/s

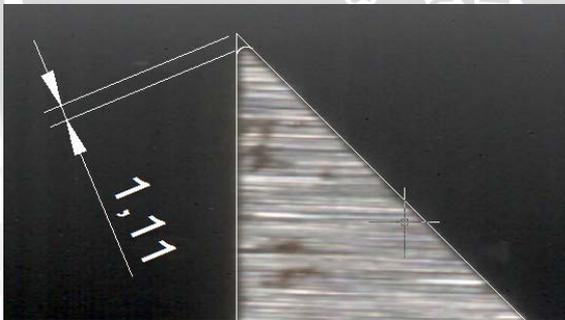
Spesimen 10.1



Spesimen 10.2

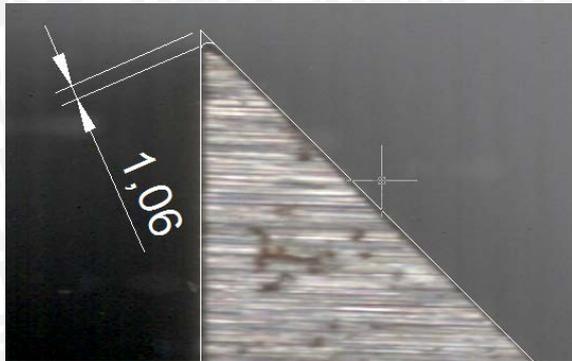


Spesimen 10.3

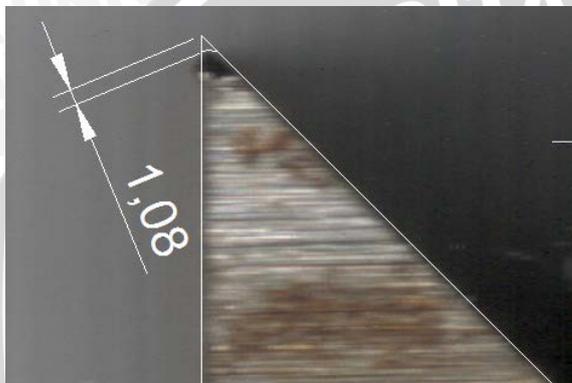


Wire Tension 1000 gram & Wire Feed Rate 5 mm/s

Spesimen 11.1



Spesimen 11.2

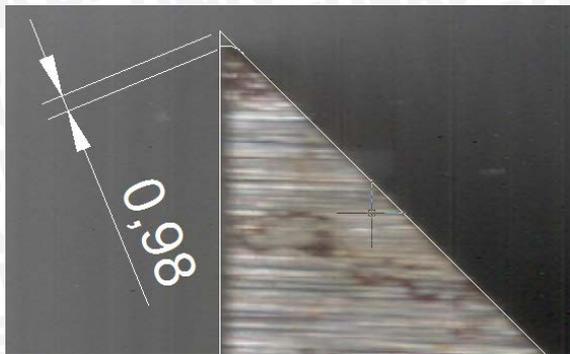


Spesimen 11.3

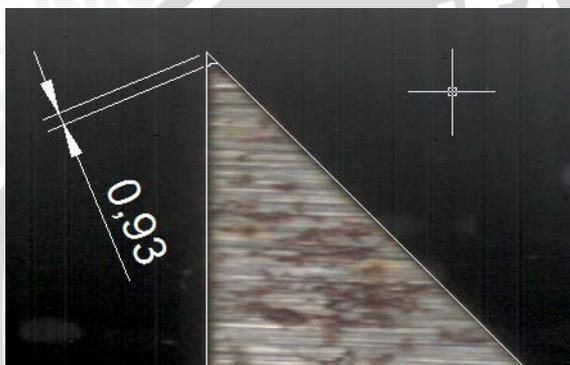


Wire Tension 1100 gram & Wire Feed Rate 5 mm/s

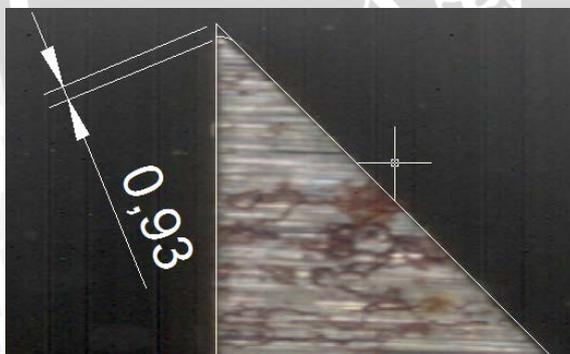
Spesimen 12.1



Spesimen 12.2



Spesimen 12.3





LAMPIRAN 2



CERTIFICATE

**No: 135 / 618 / 11**

Issuing date : 22 – 07 – 2011

Validity : One year upon date of issue

If attached with “ Surat Keterangan Material”

This is to certify that **ASSAB 618** we supply to **ITN Malang** is guaranteed to meet the specifications as mentioned below :

Typical Chemical Analysis :

C 0.37 – Si 0.3 – Mn 1.4 – Cr 2.0 – Ni 1.0 – Mo 0.2**Delivery condition :****Hardened & Tempered to approx. 290-330 HB**

Typical Microstructure :



Issued by,

*Susanti Dian Pertiwi***Technical Manager**

SURAT KETERANGAN MATERIAL**No DO : ASI / 0057 / VII / 2011**

Tanggal kirim : 22 – 07 – 2011

Dengan ini menerangkan bahwa material yang dikirim ke **ITN Malang** telah **memenuhi spesifikasi** sesuai dengan sertifikat material masing-masing yang berlaku yaitu :

MATERIAL	NOMOR SERTIFIKAT
ASSAB 618	135 / 618 / 11

Issued by,




Susanti Dian Pertiwi
Technical Manager



LAMPIRAN 3





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 : Shalahuddin S.P

NIM : 0710623005

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



Mengetahui,

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