

**PENGARUH TEMPERATUR *TEMPERING*
TERHADAP KEKUATAN IMPAK
BAJA JIS G3101 SS400**

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh :

IQBAL FARID

NIM. 0810620068 - 62

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2012

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH TEMPERATUR *TEMPERING*
TERHADAP KEKUATAN IMPAK
BAJA JIS G3101 SS400**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh :

**IQBAL FARID
NIM. 0810620068-62**

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

**Putu Hadi Setvarini, ST., MT
NIP. 19770806 200312 2 001**

**Femiana Gapsari M.F., ST., MT
NIP. 19820704 200812 2 002**

**PENGARUH TEMPERATUR TEMPERING
TERHADAP KEKUATAN IMPAK
BAJA JIS G3101 SS400**

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun Oleh :

IQBAL FARID

NIM. 0810620068 – 62

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 1 Agustus 2012

Skripsi I

Skripsi II

Ir. Djoko Sutikno, M.Eng.
NIP. 19541009 198303 1 002

Dr.Eng. Denny Widhiyanuriyaman, ST., MT.
NIP. 19750113 200012 1 001

Komprehensif

Dr.Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT.
NIP. 19720817 200002 1 001

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Mesin

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

KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah, penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, berkah dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi dengan judul **“Pengaruh Temperatur *Tempering* terhadap Kekuatan Impak Baja JIS G3101 SS400”**, yang diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan akademik memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Pada kesempatan ini Penulis tidak lupa mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Kedua orang tua tercinta yaitu ayah Moh. Hamzah dan ibu Siti Mukhoyyaroh yang telah memberi segalanya yang terbaik untuk penulis.
2. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT., selaku ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
3. Bapak Dr. Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng., selaku sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
4. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, MSc. selaku ketua Kelompok Konsentrasi Teknik Produksi Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
5. Ibu Putu Hadi Setyarini, ST., MT. selaku Pembimbing I, yang telah banyak memberikan kritik dan saran yang konstruktif sehingga sangat penting dalam penulisan skripsi ini.
6. Ibu Femiana Gapsari M.F., ST., MT. selaku pembimbing II yang telah banyak memberikan bimbingan dan saran yang sangat membantu dalam penulisan skripsi ini.
7. Bapak Sugiarto ST., MT. selaku dosen pembimbing akademis saya yang tidak pernah lelah memberikan bimbingan, nasehat dan motivasinya selama saya menuntut ilmu di Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
8. Seluruh staf pengajar dan administrasi Jurusan Teknik Mesin.
9. Keluarga Besar Laboratorium Pengujian Bahan, bapak Suhastomo, serta rekan-rekan asisten mas Indrawan, mas Yunan, mbak Ika, Heny, Andi, Reza, Fitri, Adyatma, Zanuarsah, Sulis, Ivan, serta Jhenta atas segala bantuan, dukungan dan semangat yang diberikan.

10. Seluruh Keluarga Besar Mahasiswa Mesin Universitas Brawijaya khususnya EMPEROR (angkatan 2008) dan *Ghost* HMM yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu karena telah secara langsung maupun tidak langsung ikut membantu dalam menyelesaikan skripsi ini.
11. Seluruh keluargaku yaitu mbak Lis, mas Arda, dek Faiz, dek Hamda, dan dek Aydin telah banyak membantu dan memberi dorongan dalam segala hal.
12. Teman-teman seperjuanganku yaitu Clief, Usman, Isabima, Osye, Andhika Tukul, Lukman, Lisdiyanto, Sucianto, Dadang, Harun, Bagas, Dimas Eka, Ariyo, Very, Rizky Prawira, Aji, Rhievo, Andika Kutang, serta Syaiful Amri yang selalu hadir untuk membantu dan menghiburku.
13. Semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Akhir kata, penulis mengharapkan skripsi ini dapat memberikan manfaat yang positif pada pembaca. Semoga memunculkan ide-ide baru, saran dan kritik yang membangun untuk kedepannya.

Malang, Agustus 2012

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	viii
RINGKASAN	ix
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	4
2.2 Baja.....	4
2.2.1 Baja.....	4
2.2.2 Klasifikasi Baja Berdasarkan Komposisi Karbon	5
2.2.3 Baja Karbon Rendah <i>Grade</i> JIS G3101 SS400.....	6
2.3 Perlakuan Panas	6
2.3.1 Perlakuan Panas	6
2.3.2 <i>Hardening</i>	11
2.3.3 <i>Tempering</i>	11
2.3.4 Pembentukan Martensit Temper.....	13
2.3.5 Pemulihan, Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir	13
2.4 Kekuatan Impak.....	15
2.4.1 Kekuatan Impak.....	15
2.4.2 Pengujian Impak	15
2.4.3 Temperatur Transisi Sifat Ulet ke Getas	19

2.4.4 Kegetasan Temper	21
2.4.5 Patahan Hasil Pengujian Impak	21
2.5 Struktur Mikro Material.....	22
2.5.1 Struktur Mikro Material.....	22
2.5.2 Pengaruh Ukuran Butiran terhadap Material	23
2.5.3 Mekanisme Penguatan pada Material Logam.....	23
2.5.4 Pengujian Struktur Mikro	25
2.6 Hipotesa.....	26

III. METODE PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian.....	27
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian.....	27
3.3 Variabel Penelitian.....	27
3.3.1 Variabel Bebas.....	27
3.3.2 Variabel Terikat.....	27
3.3.3 Variabel Terkontrol.....	27
3.4 Alat dan Bahan Penelitian	28
3.4.1 Alat Penelitian	28
3.4.2 Bahan Penelitian.....	32
3.5 Prosedur Penelitian	34
3.6 Diagram Alir Penelitian.....	36

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengujian Kekuatan Impak.....	37
4.2 Pembahasan	39

V. KESIMPULAN DAN SARAN

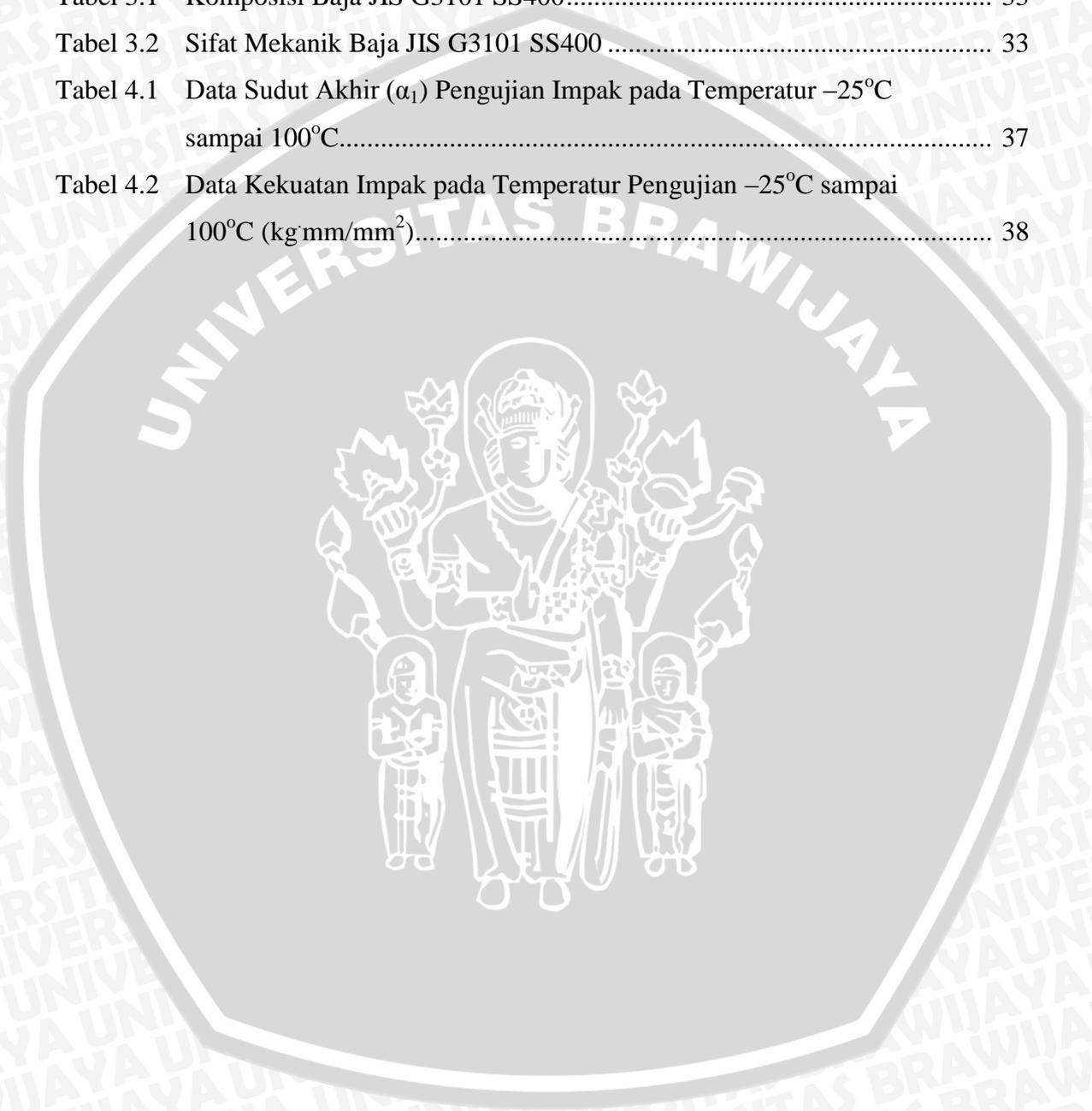
5.1 Kesimpulan.....	45
5.2 Saran	45

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

NO	JUDUL	HALAMAN
Tabel 3.1	Komposisi Baja JIS G3101 SS400.....	33
Tabel 3.2	Sifat Mekanik Baja JIS G3101 SS400	33
Tabel 4.1	Data Sudut Akhir (α_1) Pengujian Impak pada Temperatur -25°C sampai 100°C	37
Tabel 4.2	Data Kekuatan Impak pada Temperatur Pengujian -25°C sampai 100°C ($\text{kg}\cdot\text{mm}/\text{mm}^2$).....	38



DAFTAR GAMBAR

NO	JUDUL	HALAMAN
Gambar 2.1	Diagram Fasa Fe–Fe ₃ C.....	8
Gambar 2.2	Pergerakan Pertumbuhan Butir.....	14
Gambar 2.3	Batas Butir.....	15
Gambar 2.4	Ilustrasi Skematis Pengujian Impak <i>Charpy</i>	18
Gambar 2.5	Berbagai Kriteria Temperatur Transisi yang Diperoleh dari Pengujian Kekuatan Impak.....	19
Gambar 2.6	Kurva Temperatur Transisi dari Dua Baja, Menunjukkan Kegagalan Tergantung pada Hasil Temperatur Kamar.....	20
Gambar 2.7	Mekanisme Penguatan pada Logam dalam Skala Mikroskopik, Seperti Adanya Presipitat, Atom Interstisi dan Substitusi (Larutan Padat), serta Penguatan Batas Butir.....	24
Gambar 2.8	Batas Butir Sebagai <i>Barrier</i> dalam Menghalangi Pergerakan Dislokasi (Searah <i>Slip Plane</i>).....	24
Gambar 2.9	Efek dari Ukuran Butir Ferit terhadap Kekuatan Luluh dan Temperatur Impak.....	25
Gambar 3.1	<i>Charpy Impact Testing Machine</i>	28
Gambar 3.2	<i>Infrared Thermometer</i>	29
Gambar 3.3	<i>Micro Vickers Hardness Tester</i>	29
Gambar 3.4	<i>Centrifugal Sand Paper Machine</i>	30
Gambar 3.5	<i>Power Hack Saw</i>	30
Gambar 3.6	<i>Furnace</i>	31
Gambar 3.7	Kulkas.....	31
Gambar 3.8	Mikroskop Logam.....	32
Gambar 3.9	Dimensi Spesimen Sesuai Standar ASTM E–23.....	33
Gambar 3.10	Diagram Alir Penelitian.....	36
Gambar 4.1	Hubungan antara Temperatur <i>Tempering</i> terhadap Kekuatan Impak pada Temperatur antara –25°C sampai 100°C.....	39
Gambar 4.2	Foto Mikro Spesimen Tanpa Perlakuan Panas.....	40
Gambar 4.3	Foto Mikro Spesimen <i>Tempering</i> dengan Temperatur 200°C.....	40

Gambar 4.4	Foto Mikro Spesimen <i>Tempering</i> dengan Temperatur 300°C.....	41
Gambar 4.5	Foto Mikro Spesimen <i>Tempering</i> dengan Temperatur 400°C.....	42
Gambar 4.6	Foto Makro Patahan Spesimen <i>Tempering</i> dengan Temperatur 300°C (Temperatur Pengujian Impak 27°C)	43
Gambar 4.7	Foto Makro Patahan Spesimen <i>Tempering</i> dengan Temperatur 300°C (Temperatur Pengujian Impak 100°C)	43
Gambar 4.8	Foto Makro Patahan Spesimen <i>Tempering</i> dengan Temperatur 300°C (Temperatur Pengujian Impak -25°C)	44



DAFTAR LAMPIRAN

NO	JUDUL
Lampiran 1	Surat Keterangan dan Hasil Penelitian
Lampiran 2	Foto Makro Patahan Spesimen Hasil Pengujian Impak
Lampiran 3	Sertifikat Baja JIS G3101 SS400



RINGKASAN

Iqbal Farid, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Agustus 2012, *Pengaruh Temperatur Tempering terhadap Kekuatan Impak Baja JIS G3101 SS400*, Dosen Pembimbing: Putu Hadi Setyarini dan Femiana Gapsari M.F.

Salah satu usaha yang dapat dilakukan untuk memperbaiki sifat mekanik suatu produk adalah dengan melakukan perlakuan panas pada material tersebut. Proses perlakuan panas itu sendiri merupakan salah satu bagian dari proses produksi. Perlakuan panas merupakan proses kombinasi antara pemanasan dan pendinginan terhadap logam atau paduan dalam keadaan padat dalam jangka waktu tertentu yang dimaksudkan untuk memperoleh sifat-sifat tertentu pada logam atau paduan. Pembentukan sifat-sifat inilah yang sangat diperlukan untuk memperoleh material bahan industri yang betul-betul sesuai dengan kebutuhan dan fungsinya. Salah satu proses perlakuan panas yang banyak digunakan di industri adalah proses *tempering*. Apabila proses ini dilakukan maka keuletan dapat ditingkatkan namun kekerasan dan kekuatannya menurun.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur *tempering* terhadap kekuatan impak Baja JIS G3101 SS400. Spesimen yang digunakan adalah Baja JIS G3101 SS400 yang merupakan bahan dasar pembuatan lambung kapal. Pertama-tama melakukan proses *hardening* kemudian melakukan proses *tempering*, spesimen dimasukkan ke dalam *furnace* dan dilakukan pemanasan pada temperatur yang bervariasi (200°C, 300°C, dan 400°C). Setelah itu, melakukan pengujian impak dengan temperatur pengujian -25°C, 0°C, 27°C, 63°C, dan 100°C kemudian dilakukan pengambilan foto makro, foto mikro dari spesimen tanpa perlakuan panas maupun spesimen dengan perlakuan panas.

Hasil dari penelitian ini adalah temperatur *tempering* berpengaruh terhadap kekuatan impak Baja JIS G3101 SS400. Semakin tinggi temperatur *tempering*, maka kekuatan impak semakin tinggi pada temperatur pengujian -25°C sampai 100°C yaitu 150,463 kg·mm/mm² sampai 166,098 kg·mm/mm² yang dicapai dengan proses *tempering* dengan temperatur 400°C.

Kata kunci: Temperatur, *Tempering*, Kekuatan Impak

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi di berbagai bidang dewasa ini terjadi dengan sedemikian pesat dan sejalan dengan semakin meningkatnya kebutuhan hidup manusia yang dari waktu ke waktu menuntut peningkatan baik dalam kualitas maupun kuantitas. Kebutuhan manusia yang tidak terbatas terus memacu para ilmuwan dan teknokrat untuk melahirkan teknologi baru yang semakin canggih dan dapat menjawab tantangan tersebut. Demikian pula dengan teknologi dalam bidang teknik mesin yang mengalami perkembangan cukup pesat. Berbagai rekayasa telah diciptakan untuk menghadapi tantangan kebutuhan manusia yang berkaitan dengan sentuhan mekanik. Aspek penting dalam bidang rekayasa mekanik (*mechanical engineering*) adalah pada penekanan di bidang manufaktur material karena suatu alat ataupun komponen harus terbuat dari material yang memiliki sifat (*property*) dan ciri (*characteristic*) yang spesifik dan memiliki kontribusi yang tinggi dalam optimasi suatu produksi (Suherman, 1987: 1).

Pemilihan material yang tepat untuk suatu alat merupakan keharusan yang tidak dapat dihindari karena merupakan salah satu prosedur spesifikasi desain dari sistem manufaktur. Pemilihan bahan yang kurang tepat akan berujung pada rendahnya efisiensi, gangguan pemakaian, rendahnya usia pakai (*life time*), serta kegagalan (*failure*). Selain itu yang perlu dipertimbangkan adalah temperatur di mana material atau mesin itu digunakan. Karena kondisi material bisa berbeda-beda atau berubah-ubah sesuai dengan lingkungan pemakaian dari material tersebut sehingga akan mempengaruhi sifat mekanik dan bisa berujung pada kemungkinan buruk di atas juga (Suherman, 1987: 38).

Usaha yang dapat dilakukan untuk memperbaiki sifat mekanik suatu produk adalah dengan melakukan perlakuan panas pada material tersebut. Proses perlakuan panas itu sendiri merupakan salah satu bagian dari proses produksi. Perlakuan panas merupakan proses kombinasi antara pemanasan dan pendinginan terhadap logam atau paduan dalam keadaan padat dalam jangka waktu tertentu yang dimaksudkan untuk memperoleh sifat-sifat tertentu pada logam atau paduan.

Pembentukan sifat-sifat inilah yang sangat diperlukan untuk memperoleh material bahan industri yang betul-betul sesuai dengan kebutuhan dan fungsinya (Pramuko Ilmu Purbo, 2009: 1).

Setelah mengalami proses perlakuan panas, material dipakai pada kondisi kerja yang berbeda-beda. Perbedaan temperatur pemakaian akan berpengaruh terhadap ketangguhan dari suatu material. Ketangguhan ditentukan juga oleh sifat getas dan ulet dari suatu material. Dalam kehidupan nyata, peristiwa patah getas dinilai lebih berbahaya daripada patah ulet karena terjadi secara tiba-tiba tanpa ada deformasi plastis terlebih dahulu sehingga tidak tampak gejala-gejala material tersebut akan patah. Patah getas menjadi permasalahan pada besi dan baja dalam tahun 1930-an ketika jembatan-jembatan rusak di berbagai tempat di Negara Eropa. Ketika pipa minyak gas alam rusak di AS antara tahun 1940-1943 ketika kapal-kapal perang patah dan tenggelam di AS. Selain itu banyak contoh diperoleh mengenai permasalahan tersebut di berbagai tempat terutama di daerah yang memiliki musim dingin, padahal konstruksi tersebut terbuat dari logam yang biasanya dikenal cukup ulet, salah satunya adalah baja karbon rendah (Surdia dan Shinroku, 1999: 26).

Sifat mekanik material ditentukan oleh antara lain analisa patahan getas-ulet dan ketangguhan. Ketangguhan suatu material dicari dengan melakukan pengujian impak. Kekuatan impak (*impact strength*) adalah ketahanan material terhadap pukulan (*impact*) secara tiba-tiba. Kekuatan ini dinyatakan dengan banyaknya energi yang diperlukan untuk mematahkan batang uji. Dalam pemilihan bahan, seringkali bukan hanya besarnya kekuatan impak yang perlu diperhatikan, tetapi juga kisaran besarnya temperatur transisinya untuk mengetahui perubahan sifat dari ulet menjadi getas dari material (Suherman, 1987: 37). Apabila kisaran temperatur transisi dari sifat getas ke ulet besar maka akan menunjukkan bahwa material tersebut dapat digunakan pada *range* temperatur yang lebih luas dengan batas atas dan batas bawah dari temperatur transisinya. Misalnya kapal yang digunakan pada temperatur lingkungan yang berubah-ubah, bisa mencapai temperatur rendah saat malam hari, musim hujan, musim dingin, apalagi saat berada di daerah kutub, selain itu kapal juga digunakan pada temperatur tinggi saat siang yang terik dan musim panas.

Berdasarkan uraian di atas maka penelitian ini akan mengamati dan mengkaji pengaruh temperatur *tempering* terhadap kekuatan impact Baja JIS G3101 SS400. Dari penelitian ini diharapkan dapat diketahui efektivitas proses *tempering* pada Baja JIS G3101 SS400.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun permasalahan dalam penelitian ini yaitu bagaimana pengaruh temperatur *tempering* terhadap kekuatan impact Baja JIS G3101 SS400?

1.3 Batasan Masalah

Agar permasalahan tidak terlalu luas, maka dalam tulisan ini perlu adanya batasan masalah yaitu sebagai berikut:

1. Baja JIS G3101 SS400 diproses *hardening* dengan temperatur pemanasan 825°C, *holding time* 30 menit, dan pendinginan menggunakan air hingga mencapai temperatur 27°C sebelum diproses *tempering*.

1.4 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur *tempering* terhadap kekuatan impact Baja JIS G3101 SS400.

1.5 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menambah wawasan penulis secara khusus maupun pembaca secara umum mengenai proses *tempering*.
2. Memberikan masukan yang bermanfaat bagi industri pemroduksi logam dalam peningkatan kualitas logam, khususnya pada proses *tempering*.
3. Sebagai dasar ataupun literatur yang dapat dimanfaatkan untuk penelitian selanjutnya.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Wahyudi dan Setiawan (2010), melakukan penelitian yang berjudul “Studi Pengaruh Temperatur *Tempering* terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja AISI 4140” dengan temperatur 200°C, 300°C, dan 400°C serta *holding time* 30 menit kemudian didinginkan di udara terbuka didapatkan bahwa semakin tinggi temperatur *tempering* maka kekuatan impak semakin meningkat.

Yudiono (2006), melakukan penelitian yang berjudul “Pengaruh Temperatur Pemanasan terhadap Kekuatan Tarik Material Baja Karbon C1045 Akibat *Tempering*” dengan temperatur *hardening* 825°C *holding time* 30 menit dan media pendinginan air, sedangkan variasi temperatur *tempering* yaitu 275°C, 425°C, dan 600°C masing–masing *holding time* 30 menit. Hasil penelitiannya adalah semakin tinggi temperatur *tempering* maka kekuatan tarik dan kekerasan semakin menurun, sebaliknya keuletannya semakin meningkat.

2.2 Baja

2.2.1 Baja

Baja merupakan logam paduan di mana unsur besi (Fe) sebagai unsur dasar dan unsur karbon (C) sebagai paduan utamanya. Kandungan karbon dalam baja berkisar antara 0,008–2%, untuk baja yang memiliki kandungan karbon antara 0,008–0,8% maka disebut dengan baja hipoeutektoid sedangkan yang memiliki kandungan karbon 0,8–2% disebut dengan baja hipereutektoid. Dalam proses pembuatan baja akan terdapat unsur–unsur lain selain karbon yang akan tertinggal di dalam baja tersebut dan sulit untuk dihilangkan yaitu mangan (Mn), silikon (Si), chrom (Cr), vanadium (V), molibdenum (Mb), dan unsur lainnya. Dalam hal aplikasi baja merupakan bagian terpenting dalam kehidupan manusia dan dalam perkembangan teknologi yang sudah ada sampai saat ini baja memiliki peranan terpenting dalam mendukung hal tersebut. Untuk mendukung kehidupan manusia misalnya, alat–alat rumah tangga, perkantoran, perbengkelan dan alat–alat kosmetik yang biasa kita gunakan pasti akan bersentuhan dengan baja. Serta

untuk mendukung perkembangan teknologi industri baja berperan dalam hal infrastruktur bangunan dan alat-alat berat yang digunakan. Selain itu baja juga mengalami perkembangan yang cukup signifikan, bahkan dalam hal perkembangan teknologi di dunia kesehatan baja berperan dalam membantu pasien-pasien yang mengalami patah tulang guna membantu menyambungkan kembali tulang yang patah tersebut. Kandungan karbon dalam baja akan menentukan sifat mekanik yang dimiliki oleh baja tersebut khususnya dalam hal kekerasan dan kuat tarik. Adapun sifat mekanik baja pada umumnya memiliki level kuat tarik menengah dengan nilai kuat tarik berkisar antara (200–300 MPa atau 30–40 ksi) serta dengan ketangguhan yang baik untuk menghasilkan kekuatan melebihi 1400 MPa (200 ksi) serta nilai *fracture toughness* sebesar 110 MPa (ASM *International*, 2002).

2.2.2 Klasifikasi Baja Berdasarkan Komposisi Karbon

Menurut kandungan karbonnya (C), baja dapat dibedakan menjadi 3 macam antara lain (Karuniawan, 2007: 16):

1. Baja karbon rendah

Baja karbon rendah merupakan bukan baja yang keras karena kadar karbonnya tidak cukup untuk membentuk struktur martensit. Baja karbon rendah yaitu kurang dari 0,3%, sering disebut juga baja ringan (*mild steel*). Baja ini dapat dijadikan mur, baut, ulir skrup, dan lain-lain. Baja jenis karbon rendah mempunyai sifat tidak terlalu keras, cukup kuat, ulet, mudah dibentuk dan ditempa, tetapi karena kurangnya kadar karbon maka tidak dapat disepuh keras.

2. Baja karbon sedang

Baja karbon sedang merupakan baja dengan kandungan karbon 0,3–0,6%, cukup keras dibandingkan dengan baja karbon rendah. Baja ini memungkinkan untuk dikeraskan sebagian dengan perlakuan panas yang sesuai. Baja karbon sedang digunakan untuk roda gigi, poros engkol, ragam, dan sebagainya.

3. Baja karbon tinggi

Baja karbon tinggi mempunyai kandungan karbon 0,6–1,5%, baja ini sangat keras namun keuletannya rendah, biasanya digunakan untuk alat potong seperti gergaji, pahat, kikir dan lain sebagainya. Karena baja karbon tinggi sangat keras, maka jika digunakan untuk produksi harus dikerjakan dalam keadaan panas.

2.2.3 Baja Karbon Rendah *Grade JIS G3101 SS400*

Baja ini merupakan produk dari baja pengerolan panas yang berupa pelat dan lembaran. Baja karbon rendah jenis ini berdasarkan standard *Japanese Industrial Standards (JIS)*. Baja dengan *grade G3101* ini termasuk ke dalam jenis baja karbon rendah dengan kadar karbon tidak lebih dari 0,18%. Serta paduan-paduan lain berupa mangan (Mn), silikon (Si), posfor (P), sulfur (S), dan yang lain, yang total paduan tersebut adalah tidak lebih dari 1% (*Anonymous 5: 13*).

2.3 Perlakuan Panas

2.3.1 Perlakuan Panas

Perlakuan panas merupakan proses kombinasi antara pemanasan dan pendinginan terhadap logam atau paduan dalam keadaan padat dalam jangka waktu tertentu yang dimaksudkan untuk memperoleh sifat-sifat tertentu pada logam atau paduan. Pembentukan sifat-sifat inilah yang sangat diperlukan untuk memperoleh material bahan industri yang betul-betul sesuai dengan kebutuhan dan fungsinya (Purbo, 2009: 1).

Prinsip perlakuan panas ini pada dasarnya sangat sederhana, yaitu logam dipanaskan dengan laju pemanasan tertentu hingga mencapai temperatur tertentu dan kemudian ditahan pada temperatur tersebut dengan waktu tertentu serta akhirnya didinginkan dengan laju pendinginan tertentu pula. Adapun prinsip proses perlakuan panas yaitu:

1. Laju pemanasan, di mana material dipanaskan sampai temperatur austenit.

Adapun syarat-syarat pemanasan yaitu:

- Pemanasan yang dilakukan tidak merubah bentuk komponen (tetap dalam keadaan solid).

- Berdasarkan kandungan karbon, temperatur austenisasi dibagi atas:
 - Untuk baja hipoeutektoid : $T = A_3 \pm 50-100^\circ\text{C}$
 - Untuk baja hipereutektoid : $T = A_{cm} \pm 50-100^\circ\text{C}$
- 2. Penahanan waktu (*holding time*), di mana setelah material mencapai temperatur austenit kemudian dilakukan penahan waktu pada temperatur tertentu untuk menyeragamkan struktur mikro.
- 3. Laju pendinginan, di mana media pendingin yang digunakan yaitu: oli, air, tungku, dan udara terbuka.

Sifat mekanik tidak hanya tergantung pada komposisi kimia suatu paduan, tetapi juga tergantung pada struktur mikronya. Suatu paduan dengan komposisi kimia yang sama dapat memiliki struktur mikro yang berbeda, dan sifat mekaniknya akan berbeda. Struktur mikro tergantung pada proses pengerjaan yang dialami, terutama proses perlakuan panas yang diterima selama proses pengerjaan.

Secara umum perlakuan panas diklasifikasikan dalam 2 jenis:

- a. *Near Equilibrium* (mendekati kesetimbangan)

Tujuan dari perlakuan panas *near equilibrium* adalah untuk:

- a. Melunakkan struktur kristal
- b. Menghaluskan butir
- c. Menghilangkan tegangan dalam
- d. Memperbaiki *machineability*.

Jenis dari perlakuan panas *near equilibrium*, misalnya:

- *Full annealing*
- *Stress relieving annealing*
- *Process annealing*
- *Spheroidizing*
- *Normalizing*
- *Homogenizing*.

- b. *Non Equilibrium* (tidak setimbang)

Tujuan dari perlakuan panas *non equilibrium* adalah untuk mendapatkan kekerasan dan kekuatan yang lebih tinggi.

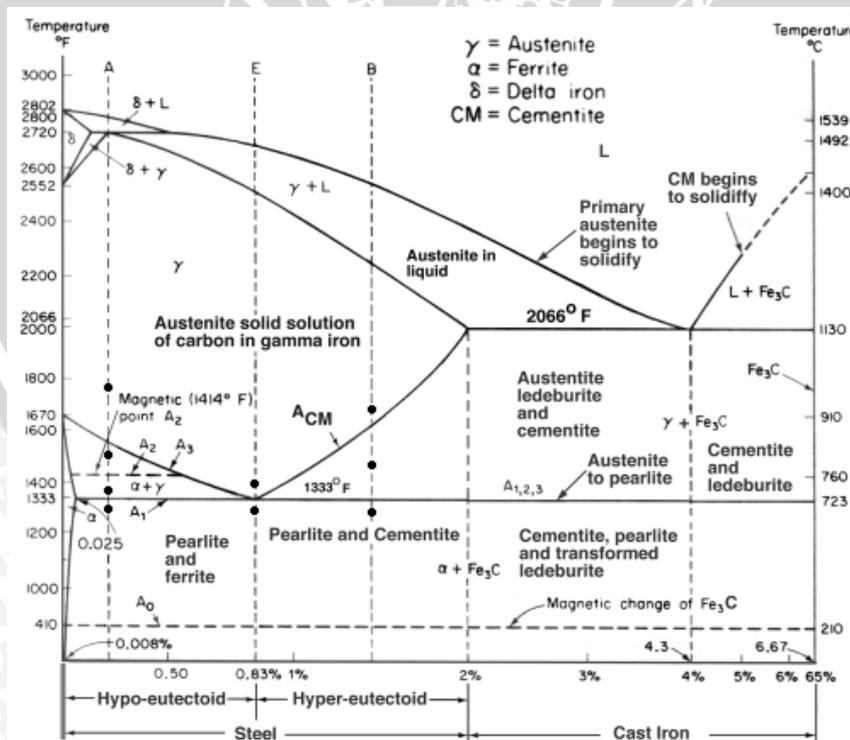
Jenis dari perlakuan panas *non equilibrium*, misalnya:

- *Hardening*
- *Martempering*
- *Austempering*
- *Surface hardening (Carburizing, Nitriding, Cyaniding, Flame hardening, Induction hardening)*

Pada proses pembuatannya, komposisi kimia yang dibutuhkan diperoleh ketika baja dalam bentuk fasa cair pada temperatur yang tinggi.

Pada saat proses pendinginan dari temperatur lelehnya, baja mulai berubah menjadi fasa padat pada temperatur 1350°C, pada fasa inilah berlangsung perubahan struktur mikro. Perubahan struktur mikro dapat juga dilakukan dengan jalan perlakuan panas.

Bila proses pendinginan dilakukan secara perlahan, maka akan dapat dicapai tiap jenis struktur mikro yang seimbang sesuai dengan komposisi kimia dan temperatur baja. Perubahan struktur mikro pada berbagai temperatur dan kadar karbon dapat dilihat pada gambar 2.1 berikut ini.



Gambar 2.1 Diagram Fasa Fe-Fe₃C
 Sumber: Pollack (1988: 140)

Dari diagram di atas dapat kita lihat bahwa pada proses pendinginan perubahan-perubahan pada struktur kristal dan struktur mikro sangat bergantung pada komposisi kimia.

- Pada kandungan karbon mencapai 6,67% terbentuk struktur mikro dinamakan sementit Fe_3C (dapat dilihat pada garis vertikal paling kanan).
- Sifat-sifat sementit: sangat keras dan sangat getas
- Pada sisi kiri diagram di mana pada kandungan karbon yang sangat rendah, pada temperatur kamar terbentuk struktur mikro ferit.
- Pada baja dengan kadar karbon 0,83%, struktur mikro yang terbentuk adalah perlit, kondisi temperatur dan kadar karbon ini dinamakan titik eutektoid.
- Pada baja dengan kandungan karbon rendah sampai dengan titik eutektoid, struktur mikro yang terbentuk adalah campuran antara ferit dan perlit.
- Pada baja dengan kandungan titik eutektoid sampai dengan 6,67%, struktur mikro yang terbentuk adalah campuran antara perlit dan sementit.
- Pada saat pendinginan dari temperatur leleh baja dengan kadar karbon rendah, akan terbentuk struktur mikro ferit delta lalu menjadi struktur mikro austenit.
- Pada baja dengan kadar karbon yang lebih tinggi, temperatur leleh turun dengan naiknya kadar karbon, peralihan bentuk langsung dari leleh menjadi austenit.

Penekanan terletak pada struktur mikro, garis-garis dan kandungan karbon.

a. Kandungan karbon (C)

0,008% adalah batas kelarutan maksimum karbon pada ferit pada temperatur kamar.

0,025% adalah batas kelarutan maksimum karbon pada ferit pada temperatur 723°C .

0,83% adalah titik eutektoid.

2% adalah batas kelarutan karbon pada besi gama pada temperatur 1130°C

4,3% adalah titik eutektik.

0,1% adalah batas kelarutan karbon pada besi delta pada temperatur 1493°C.

b. Garis–garis

Garis *Liquidus* adalah garis yang menunjukkan awal dari proses pendinginan (pembekuan).

Garis *Solidus* adalah garis yang menunjukkan akhir dari proses pembekuan (pendinginan).

Garis *Solvus* adalah garis yang menunjukkan batas antara fasa padat dengan fasa padat atau *solid solution* dengan *solid solution*.

Garis A_{cm} adalah garis kelarutan karbon pada besi gama (austenit).

Garis A_3 adalah garis temperatur di mana terjadi perubahan ferit menjadi austenit (gama) pada pemanasan.

Garis A_1 adalah garis temperatur di mana terjadi perubahan austenit (gama) menjadi ferit pada pendinginan.

Garis A_0 adalah garis temperatur di mana terjadi transformasi magnetik pada sementit.

Garis A_2 adalah garis temperatur di mana terjadi transformasi magnetik pada ferit.

c. Struktur mikro

Ferit adalah suatu komposisi logam yang mempunyai batas maksimum kelarutan karbon 0,025%C pada temperatur 723°C, struktur kristalnya BCC (*Body Center Cubic*) dan pada temperatur kamar mempunyai batas kelarutan karbon 0,008%C.

Austenit adalah suatu larutan padat yang mempunyai batas maksimum kelarutan karbon 2%C pada temperatur 1130°C, struktur kristalnya FCC (*Face Center Cubic*).

Sementit adalah suatu senyawa yang terdiri dari unsur Fe dan C dengan perbandingan tertentu (mempunyai rumus empiris) dan struktur kristalnya ortorombik.

Lediburit adalah campuran eutektik antara besi gama dengan sementit yang dibentuk pada temperatur 1130°C dengan kandungan karbon 4,3%C.

Perlit adalah campuran eutektoid antara ferit dengan sementit yang dibentuk pada temperatur 723°C dengan kandungan karbon 0,83%C.

2.3.2 *Hardening*

Hardening adalah perlakuan panas terhadap baja dengan sasaran meningkatkan kekerasan alami baja. Perlakuan panas menuntut pemanasan benda kerja menuju temperatur pengerasan di daerah atau di atas daerah kritis dan pendinginan secara cepat dengan kecepatan pendinginan kritis.

Akibat penyejukan dingin dari daerah temperatur pengerasan ini dicapai suatu keadaan paksa bagi struktur baja yang membentuk kekerasan. Oleh karena itu, proses pengerasan ini disebut juga pengerasan kejut atau pencelupan langsung kekerasan yang tercapai pada kecepatan pendinginan kritis ini diiringi kerapuhan yang besar dan tegangan pengejut.

Pada setiap operasi perlakuan panas, laju pemanasan merupakan faktor yang penting. Panas merambat dari luar ke dalam dengan kecepatan tertentu bila pemanasan terlalu cepat, bagian luar akan jauh lebih panas dari bagian dalam, oleh karena itu kekerasan di bagian dalam benda akan lebih rendah daripada di bagian luar, dan ada nilai batas tertentu. Namun, air garam atau air akan menurunkan temperatur permukaan dengan cepat, yang diikuti dengan penurunan temperatur di dalam benda tersebut sehingga diperoleh lapisan keras dengan ketebalan tertentu (Wahyudi, 2009: 31–32).

2.3.3 *Tempering*

Baja yang telah dikeraskan dengan *hardening* bersifat rapuh (*brittle*) dan tidak cocok untuk digunakan, melalui proses *tempering* kekerasan dan kerapuhan dapat diturunkan sampai memenuhi persyaratan penggunaan. Kekerasan turun, kekuatan tarik akan turun pula sedang keuletan dan ketangguhan baja akan meningkat. Meskipun proses ini menghasilkan baja yang lebih lunak, proses ini berbeda dengan proses *annealing* karena di sini sifat–sifat fisis dapat dikendalikan dengan cermat.

Perlakuan untuk menghilangkan tegangan dalam dan menguatkan baja dari kerapuhan disebut dengan *tempering*. *Tempering* didefinisikan sebagai proses

pemanasan logam setelah dikeraskan pada temperatur *tempering* (di bawah temperatur kritis), yang dilanjutkan dengan proses pendinginan (Yudiono, 2006: 2).

Proses *tempering* adalah proses pemanasan kembali baja yang dikeraskan. Apabila proses ini dilakukan maka keuletan dapat ditingkatkan namun kekerasan dan kekuatannya menurun. Pada sebagian baja struktur, proses *tempering* dimaksudkan untuk memperoleh kombinasi antara kekuatan, keuletan, dan ketangguhan yang tinggi sehingga dengan demikian baja yang telah mengalami proses pengerasan kemudian dilanjutkan dengan proses *tempering* akan menjadikan baja lebih bermanfaat karena adanya struktur yang lebih stabil (Sukrawan: 7).

Baja yang telah mengalami perlakuan panas ini apabila dibandingkan kekuatannya maka akan mempunyai temperatur transisi yang rendah dan mempunyai keuletan yang baik pada temperatur rendah (*Anonymous 1*: 6).

Prosesnya adalah memanaskan kembali berkisar antara temperatur 150–650°C dan didinginkan secara perlahan–lahan tergantung sifat akhir baja tersebut, menurut tujuannya proses *tempering* dibedakan sebagai berikut (Karuniawan, 2007: 29):

1. *Tempering* pada temperatur rendah (150–300°C)

Tempering pada temperatur rendah tidak akan menghasilkan penurunan kekerasan yang berarti. *Tempering* ini hanya untuk mengurangi tegangan–tegangan kerut dan kerapuhan dari baja, biasanya untuk alat–alat potong, mata bor, dan sebagainya.

2. *Tempering* pada temperatur menengah (300–550°C)

Tempering pada temperatur sedang bertujuan untuk menambah keuletan dan kekerasannya sedikit berkurang. Proses ini digunakan pada alat–alat kerja yang mengalami beban berat, misalnya palu, pahat, pegas.

3. *Tempering* pada temperatur tinggi (550–650°C)

Tempering temperatur tinggi bertujuan memberikan daya keuletan yang besar dan sekaligus kekerasannya menjadi agak rendah misalnya pada roda gigi, poros batang penggerak dan sebagainya.

repository.ub.ac.id

Semakin tinggi temperatur penemperan dan semakin lama didiamkan pada temperatur ini (lama penemperan) semakin banyak terbentuk martensit, kekerasan akan lebih rendah, keuletan akan bertambah, dan tegangan berkurang (Sukrawan: 7).

2.3.4 Pembentukan Martensit Temper

Proses penemperan yang dilakukan pada baja akan memberikan kesempatan bagi atom–atom karbon yang larut untuk berdifusi membentuk struktur yang lebih stabil. Dengan terjadi proses difusi tersebut, maka *tetragonalitas* dari martensit akan terus berkurang mendekati kubus. Selama proses penemperan, martensit akan mengalami beberapa tahapan reaksi dalam keadaan padat menjadi martensit temper. Proses yang terjadi struktur mikro martensit temper adalah:

1. *Segregasi* dari atom–atom karbon
2. Pengendapan karbida–karbida
3. Dekomposisi dari austenit sisa
4. Pemulihan dan rekristalisasi

Reaksi–reaksi di atas terjadi tidak pada temperatur dan waktu yang sama namun satu dengan lainnya saling bergantian sehingga struktur mikro martensit temper yang dihasilkan sangat kompleks (Muslim, 2008: 17–18).

2.3.5 Pemulihan, Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir

a. Pemulihan (*Recovery*)

Pemulihan didefinisikan sebagai perbaikan sifat fisik logam hasil pengerjaan dingin tanpa ada perubahan apapun yang dapat dilihat dalam struktur mikro. Dalam pemulihan diperlukan adanya aktivasi termal, karena mekanismenya melibatkan pergerakan kekosongan (lawan dari pergerakan atom) dan pergerakan dislokasi. Pada tahap ini dislokasi bergerak relatif teratur, sehingga pada proses ini sifat mekanik seperti kekuatan dan kuat tarik relatif tidak berubah.

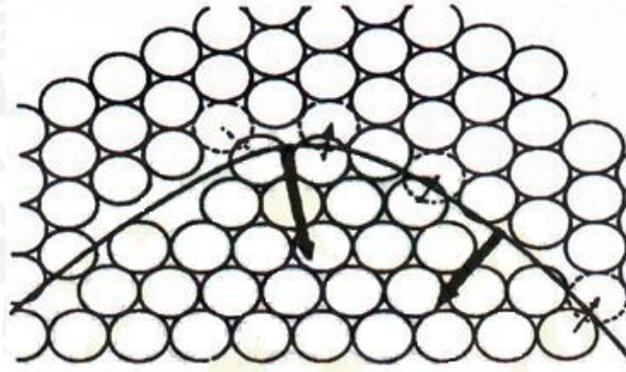
b. Rekristalisasi (*Recrystallization*)

Rekristalisasi adalah proses pergantian struktur mikro hasil pengerjaan dingin oleh kumpulan butir baru bebas regangan. Rekristalisasi merupakan reorientasi sub butiran yang memiliki batas butir bersudut kecil (*low angle grain boundary*) hasil poligonisasi menjadi butiran yang lebih besar dengan batas butir bersudut tinggi (*high angle grain boundary*). Kisi-kisi yang terdeformasi digantikan sepenuhnya oleh kisi baru bebas regangan melalui proses nukleasi (pengintian) dan pertumbuhan butir. Pada tahap ini kekuatan dan kekerasan mulai berkurang sedangkan keuletan dan ketangguhan mulai bertambah (*Anonymous 5: 25*).

c. Pertumbuhan Butir (*Grain Growth*)

Pertumbuhan butir merupakan gejala anil yang berlangsung dengan baik, batas butir menjadi lurus, butir yang kecil menyusut dan yang lebih besar tumbuh. Pertumbuhan butir adalah faktor terpenting yang mengendalikan proses pada tegangan batas butir. Besar butir rata-rata dalam baja lama kelamaan akan bertambah besar bila temperatur menghasilkan pergerakan atom yang cukup berarti. Gaya pendorong untuk pertumbuhan kristal ialah energi yang dilepaskan sewaktu atom bergerak melintasi batas butir dari arah butir dengan permukaan cembung ke permukaan butir cekung. Atom rata-rata terkordinir dengan sejumlah atom tetangga yang lebih banyak pada jarak atom antar keseimbangan, hasilnya batas butir akan bergerak ke pusat garis lengkung.

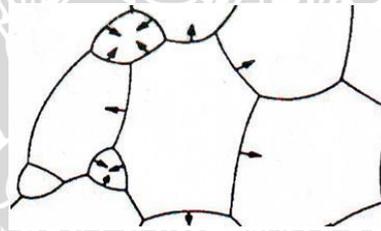
Laju pertumbuhan tergantung sekali pada temperatur. Kenaikan temperatur berakibat meningkatnya energi getaran termal dan butiran yang kecil menuju butiran besar lebih cepat. Penurunan temperatur akan menghambat pergerakan batas butir, dapat dilihat dari gambar 2.2.



Gambar 2.2 Pergerakan Pertumbuhan Butir
Sumber: Harahap (2008: 25)

Bentuk butir dalam bahan yang padat biasanya diatur oleh adanya butiran-butiran lain di sekitarnya. Dalam setiap butir, semua sel teratur dalam satu arah dan satu pola tertentu.

Pada batas butir, antara dua butir yang berdekatan terdapat daerah transisi yang tidak searah dengan pola dalam kedua butiran tadi sebagaimana yang terlihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Batas Butir
Sumber: Harahap (2008: 25)

Ketidakteraturan orientasi antara butiran yang berdekatan menghasilkan tumbukan atom sepanjang batas butir (gambar 2.3) memiliki energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang terdapat di dalam butir. Bahan dengan butiran yang lebih halus lebih kuat daripada baja dengan butiran yang kasar (Harahap, 2008: 24–26).

2.4 Kekuatan Impak

2.4.1 Kekuatan Impak

Kekuatan impak (*impact strength*) adalah ketahanan material terhadap pukulan (impak) secara tiba-tiba. Kekuatan ini dinyatakan dengan banyaknya

energi yang diperlukan untuk mematahkan batang uji. Jadi, kekuatan impak sebenarnya adalah ketangguhan juga (Suherman, 1987: 37). Suatu bahan ulet dengan kekuatan yang sama dengan bahan rapuh akan memerlukan energi perpatahan yang lebih besar dan mempunyai sifat tangguh yang lebih baik. Penurunan ketangguhan dapat berakibat fatal, oleh karena itu ketangguhan perlu diukur atau dikuantitaskan secara konvensional, hal tersebut dilakukan dengan pengujian impak/benturan secara tiba-tiba.

2.4.2 Pengujian Impak

Percobaan pukul takik paling sering digunakan dalam pengujian impak. Hasil percobaan pukul takik biasanya tidak dapat langsung digunakan sebagai pemecahan masalah perencanaan, tetapi hanya dapat digunakan untuk membandingkan sifat ketangguhan suatu bahan dengan bahan yang lain. Hal ini karena banyak faktor yang mempengaruhi kekuatan impak yang tidak dapat dicari hubungan antara kondisi pengujian dengan kondisi pemakaian. Demikian juga hanya dengan keadaan tegangan tiga sumbu yang dipengaruhi oleh bentuk dan ukuran takik. Bentuk dan ukuran spesimen semua ini akan menyebabkan kekuatan impak yang berbeda bila faktor tersebut berbeda. Karena itu untuk pengujian pukul takik ini bentuk dan ukuran spesimen serta bentuk dan ukuran takikan harus benar-benar sama, barulah hasil pengujian dapat dibandingkan satu sama lain (Suherman, 1987: 37).

Segera setelah spesimen diletakkan, kemudian bandul dilepaskan sehingga pendulum akan melayang (jatuh akibat gaya gravitasi). Pendulum ini akan memukul spesimen yang diletakkan semula dengan energi yang sama. Energi pendulum akan diserap oleh spesimen yang dapat menyebabkan spesimen patah tanpa deformasi (getas) ataupun spesimen tidak sampai putus yang berarti spesimen mempunyai sifat keuletan yang tinggi.

Permukaan patah membantu untuk menentukan kekuatan impak dalam hubungannya dengan temperatur transisi bahan. Daerah transisi yaitu daerah di mana terjadi perubahan patahan ulet ke patahan getas. Bentuk perpatahan dapat dilihat langsung dengan mata telanjang atau dapat pula dengan bantuan mikroskop logam.

Uji impak adalah pengujian dengan menggunakan pembebanan yang cepat (*rapid loading*). Pengujian impak merupakan suatu pengujian yang mengukur ketahanan bahan terhadap beban kejut. Inilah yang membedakan pengujian impak dengan pengujian tarik dan kekerasan di mana dilakukan pembebanan secara statis. Pengujian impak merupakan suatu upaya untuk mensimulasikan kondisi operasi material yang sering ditemui dalam kehidupan.

Sifat keuletan suatu logam dapat diketahui dari pengujian tarik dan pengujian impak, tetapi dalam kondisi beban yang berbeda. Beban pada pengujian impak adalah secara tiba-tiba (*dinamis*), sedangkan pada pengujian tarik menggunakan beban statis. Dari hasil pengujian tarik dapat disimpulkan perkiraan dari hasil pengujian impak. Tetapi dari pengujian impak dapat diketahui sifat ketangguhan logam dan harga impak untuk temperatur yang berbeda-beda, mulai dari temperatur yang sangat rendah sampai temperatur yang tinggi. Sedangkan pada percobaan tarik, temperatur kerja adalah temperatur kamar.

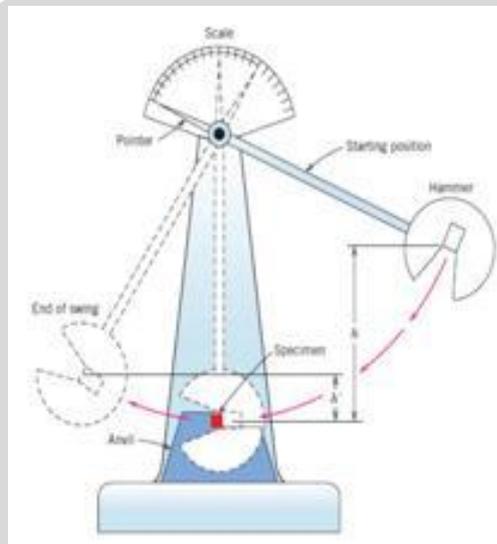
Spesimen diletakkan pada tumpuan dalam posisi mendatar dan bagian yang bertakik diberi beban impak dari ayunan bandul. Spesimen *Izod* mempunyai penampang lintang bujur sangkar atau lingkaran dengan takik V di dekat ujung yang dijepit. Metode *Izod* umumnya dilakukan hanya pada temperatur ruang dan ditujukan untuk material-material yang didesain untuk berfungsi sebagai *cantilever*.

Spesimen *Charpy* mempunyai luas penampang lintang bujur sangkar dan mengandung takik V, dengan jari-jari dasar takik 0,25 mm dan kedalaman takik 2 mm. Takik (*notch*) dalam spesimen standar ditujukan sebagai suatu konsentrasi tegangan (*stress concentration*) sehingga perpatahan diharapkan akan terjadi di bagian tersebut. Spesimen diletakkan pada tumpuan dalam posisi mendatar dan bagian yang tidak bertakik diberi beban impak dengan ayunan pendulum. Spesimen akan melengkung dan patah pada laju regangan yang tinggi. Serangkaian uji *Charpy* pada suatu material umumnya dilakukan pada berbagai temperatur sebagai upaya untuk mengetahui temperatur transisi.

Pengujian impak yang dilakukan pada penelitian ini sesuai dengan standar ASTM E-23 untuk metode *Charpy*. Pengujian yang dilakukan dengan metode *Charpy* akan menghasilkan harga impak yang lebih valid dibandingkan bila

dilakukan dengan metode *Izod*, karena energi yang diserap penyangga tidak terlalu besar sehingga tidak banyak mempengaruhi harga impact.

Prinsip pengujian impact ini adalah menghitung energi yang diberikan beban dan menghitung energi yang diserap oleh spesimen. Saat beban dinaikkan pada ketinggian tertentu (lihat gambar 2.4) sehingga beban memiliki energi potensial, kemudian saat pendulum dilepaskan maka energi potensial pendulum berkurang dan menjadi energi kinetik, dan saat menumbuk spesimen maka energi kinetik mencapai maksimum. Energi ini nantinya sebagian diserap oleh spesimen untuk mematahkan spesimen dan sebagian hilang karena adanya gesekan. Besarnya kerugian ini bisa diamati dari sudut yang terbentuk pada skala dari jarum saat proses *Dry Run Test*.



Gambar 2.4 Ilustrasi Skematis Pengujian Impact *Charpy*
Sumber: *Anonymous 4 (57)*

Sedangkan untuk mendapatkan nilai kekuatan impact diperlukan persamaan-persamaan yang digunakan untuk menghitungnya, di antara persamaan tersebut adalah sebagai berikut.

- Energi yang dibutuhkan secara ideal

$$\begin{aligned} A_0 &= m g h_1 - m g h_2 \\ &= G (h_1 - h_2) \\ &= G R [\text{Cos} (90^\circ - \alpha_1^\circ) - \text{Cos} \beta^\circ] \quad (2 - 1) \text{ (Setiadji, 2007: 28)} \end{aligned}$$

- Kerugian energi pada alat

$$F = G R [\text{Cos} (90^\circ - \alpha_0^\circ) - \text{Cos} \beta^\circ] \quad (2 - 2) \text{ (Setiadji, 2007: 28)}$$

- Energi aktual yang diperlukan

$$A = A_0 - F \quad (2 - 3) \text{ (Setiadji, 2007: 28)}$$

- Energi yang diperlukan untuk mematahkan spesimen setiap satuan luas

$$A_k = A / F_0 \quad (2 - 4) \text{ (Setiadji, 2007: 28)}$$

Keterangan:

R = Radius lintasan pendulum (mm)

G = Berat pendulum (kg)

F_0 = Luas penampang spesimen (mm^2)

β = Sudut awal

α_0 = Sudut *dry run*

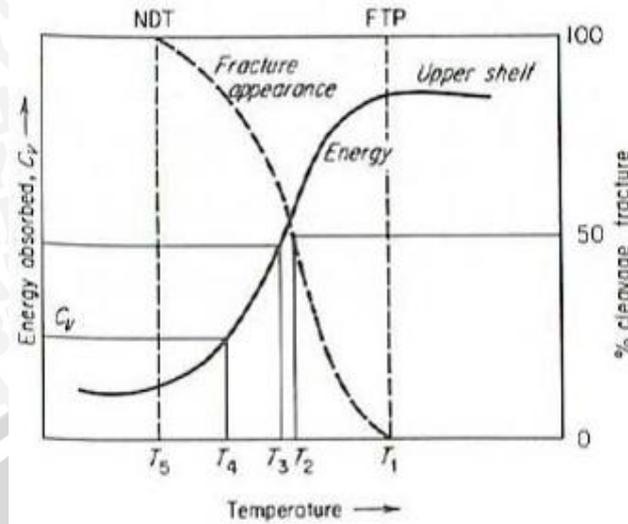
α_1 = Sudut akhir

2.4.3 Temperatur Transisi Sifat Ulet ke Getas

Selain kekuatan impak, hal yang dapat dihasilkan dari pengujian impak adalah temperatur transisi bahan. Temperatur transisi adalah temperatur yang menunjukkan transisi perubahan jenis perpatahan suatu bahan bila diuji pada temperatur yang berbeda-beda dapat dilihat pada gambar 2.5. Pada pengujian dengan temperatur yang berbeda-beda maka akan terlihat bahwa pada temperatur tinggi material akan bersifat ulet (*ductile*) sedangkan pada temperatur rendah material akan bersifat rapuh atau getas (*brittle*).

Suatu pengujian impak akan lebih bermakna bila dilakukan pada suatu daerah temperatur pengujian, sehingga dapat dipelajari bagaimana pengaruh temperatur terhadap pola perpatahan suatu bahan dan juga dapat ditentukan temperatur transisi. Perlu diketahui kekuatan impak cenderung menurun dengan turunnya temperatur, dengan demikian suatu bahan yang pada temperatur yang relatif tinggi masih bersifat ulet, pada suatu temperatur tertentu yang lebih rendah mulai berubah menjadi getas (Suherman, 1987: 38).

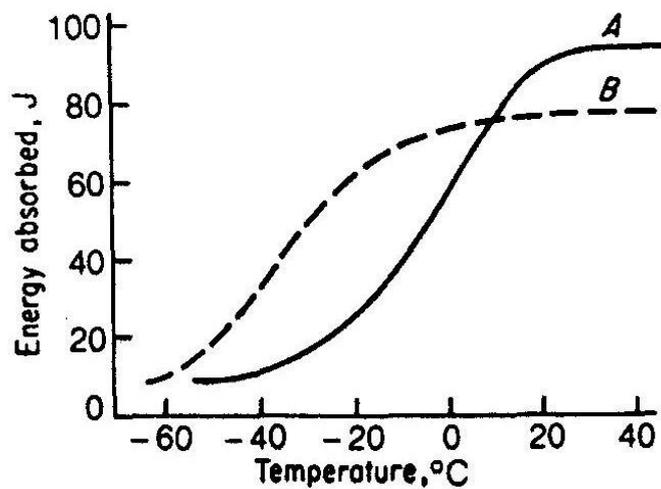
Dari serangkaian pengujian yang dilakukan pada berbagai temperatur dibuat suatu grafik kekuatan impak–temperatur, atau grafik % *cleavage fracture–temperature*. Dari grafik tersebut dapat ditentukan temperatur transisi. Bentuk grafik kekuatan impak–temperatur dan cara menentukan temperatur transisi dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Berbagai Kriteria Temperatur Transisi yang Diperoleh dari Pengujian Kekuatan Impak

Sumber: Suherman (1987: 38)

Dalam hal ini lebih disukai bahan yang mempunyai temperatur transisi lebih rendah, walaupun kekuatan impak maksimalnya lebih rendah. Seperti terlihat pada gambar 2.6 baja B memiliki kekuatan impak lebih rendah tetapi lebih disukai karena temperatur transisinya lebih rendah. Hal ini dikarenakan bila baja B mengalami penurunan temperatur kerja, kekuatannya masih belum banyak menurun, sedangkan baja A bila mengalami penurunan temperatur kerja maka kekuatannya sudah sangat berkurang, cenderung terjadi patah getas yang memungkinkan dapat berakibat fatal.



Gambar 2.6 Kurva Temperatur Transisi dari Dua Baja, Menunjukkan Kegagalan Tergantung pada Hasil Temperatur Kamar

Sumber: Suherman (1987: 39)

Fenomena ini berkaitan dengan vibrasi atom–atom bahan pada temperatur yang berbeda di mana pada temperatur kamar vibrasi itu berada dalam kondisi kesetimbangan dan selanjutnya akan menjadi tinggi bila temperatur dinaikkan (ingatlah bahwa energi panas merupakan suatu *driving force* terhadap pergerakan partikel atom bahan).

Vibrasi atom inilah yang berperan sebagai suatu penghalang (*obstacle*) terhadap pergerakan dislokasi pada saat terjadi deformasi kejut/impak dari luar. Dengan semakin tinggi vibrasi itu maka pergerakan dislokasi menjadi relatif mudah sehingga dibutuhkan energi yang lebih besar untuk mematahkan spesimen. Sebaliknya pada temperatur di bawah 0°C, vibrasi atom relatif lemah sehingga pada saat bahan dideformasi pergerakan dislokasi menjadi lebih sulit dan spesimen menjadi lebih mudah dipatahkan dengan energi yang relatif lebih rendah (*Anonymous 4: 59–60*).

2.4.4 Kegetasan Temper

Selama penemperan baja yang telah dikeraskan, terjadi pelunakan dan peningkatan keuletan. Pada penemperan di sekitar 200–300°C kekuatan impact turun dan dengan pendinginan yang perlahan–lahan setelah penemperan sekitar 500°C maka kekuatan impact sangat turun. Fenomena pertama disebut kegetasan temper pada temperatur rendah dan yang kedua dinamakan kegetasan temper pada temperatur tinggi. Kegetasan temper pada temperatur tinggi mempunyai banyak masalah karena menyangkut temperatur penemperan baja di mana baja memerlukan keuletan tinggi sedangkan banyak baja dipergunakan pada temperatur sekitar 500°C (*Anonymous 1: 10*).

2.4.5 Patahan Hasil Pengujian Impak

Perbedaan pada struktur bahan dapat menyebabkan perbedaan pada bentuk patahan hasil impact. Jenis patahan dapat terjadi dalam tiga bentuk yaitu (Miftakhuddin, 2006: 22):

1. Patahan getas

Patah getas disebabkan oleh tegangan normal dengan ciri–ciri antara lain: tidak berserat, permukaannya halus, mengkilap, dan tidak

terlihat adanya deformasi plastis. Hal tersebut disebabkan oleh kekuatan batas butir yang lebih kuat dari kekuatan butir sehingga jalur patahan membelah butir-butir pada spesimen tersebut.

2. Patahan ulet

Patah ulet disebabkan oleh tegangan geser dengan ciri-ciri antara lain: berserat, permukaannya kasar, gelap, dan terlihat sempit terjadi deformasi palstis. Hal tersebut terjadi disebabkan oleh kekuatan butir yang lebih kuat dari kekuatan batas butir sehingga jalur patahan terletak pada batas butir.

3. Patahan campuran

Patahan ini merupakan kombinasi dua jenis perpatahan di atas yaitu yang sebagian getas dan sebagian lagi ulet, patahan ini terjadi paling banyak terjadi.

Pengujian lain yang biasa dilakukan dalam pengujian impak *Charpy* adalah penelaahan permukaan perpatahan untuk menentukan jenis perpatahan (*fractografi*) yang terjadi yaitu melakukan foto makro dengan miskroskop logam kemudian mengamati permukaan patahannya.

2.5 Struktur Mikro Material

2.5.1 Struktur Mikro Material

Struktur mikro merupakan butiran-butiran suatu benda logam yang sangat kecil dan tidak dapat dilihat dengan mata telanjang, sehingga perlu menggunakan mikroskop optik atau mikroskop elektron untuk pemeriksaan butiran-butiran logam tersebut (*Anonymous 2: 3*).

Sifat-sifat fisik atau mekanik dari material tergantung dari struktur mikro material tersebut. Struktur mikro dalam logam (paduan) ditunjukkan dengan besar, bentuk dan orientasi butirnya, jumlah fasa, proporsi dan karakteristik di mana mereka tersusun atau terdistribusi.

Struktur mikro dari paduan tergantung dari beberapa faktor seperti: elemen paduan, konsentrasi, dan perlakuan panas yang diberikan. Pengujian struktur mikro atau mikrografi dilakukan dengan bantuan mikroskop dengan koefisien

pembesaran dan metode kerja yang bervariasi. Secara umum bekerja dengan refleksi pemecahan (sinar).

Struktur mikro dari logam dapat memberikan sebagian informasi yang mendukung sifat dari logam tersebut. Salah satu yang dapat dianalisis dari struktur mikro adalah ukuran butir dari logam. Di mana ukuran butir mempengaruhi ketangguhan logam (Harahap, 2008: 34).

Baja dengan butiran yang kasar memiliki sifat yang tangguh dan baja jenis ini lebih mudah untuk permesinan dan memiliki kemampuan pengerasan yang lebih baik. Sedangkan baja yang berbutir halus memiliki sifat yang kuat dan peka terhadap retak. Besar batas butir dapat dikendalikan melalui komposisi pada waktu proses pembuatan, akan tetapi setelah baja jadi, pengendalian dilakukan melalui proses perlakuan panas (Wahyudi, 2009: 44).

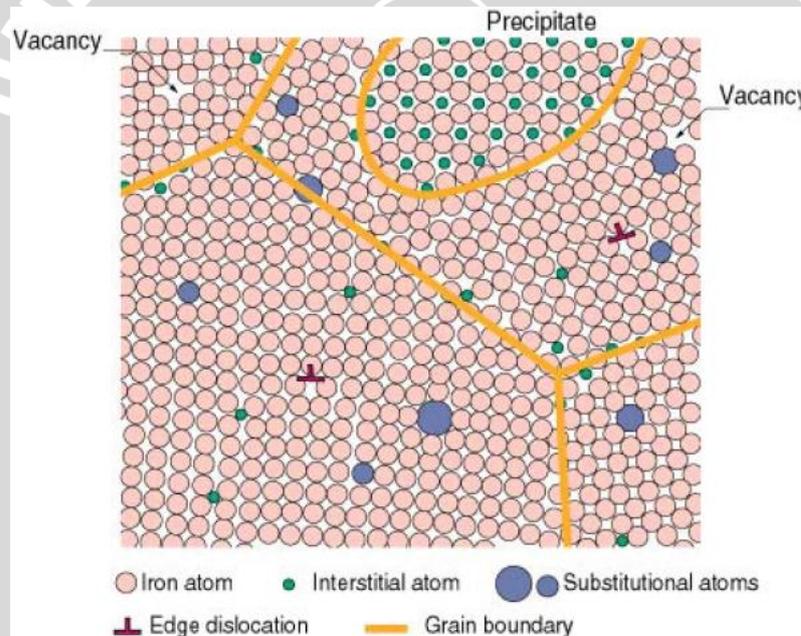
2.5.2 Pengaruh Ukuran Butiran terhadap Material Logam

Batas butir akan berfungsi sebagai penghalang terjadinya pergerakan dislokasi. Dari hal tersebut, jika semakin banyak batas butir maka pergerakan dislokasi akan semakin berkurang sehingga tingkat kekerasan suatu material akan semakin meningkat. Semakin keras logam maka logam tersebut akan semakin sulit untuk dibentuk, sehingga akan menjadi getas (*Anonymous 5: 18*).

Kekerasan merupakan sifat yang terkait erat dengan kekuatan dari material yakni merupakan ukuran kemampuan suatu material untuk tahan terhadap deformasi plastik seperti indentasi atau *scratch*. Salah satu mekanisme untuk meningkatkan nilai kekerasan adalah dengan mekanisme *grain size hardening* atau *grain boundary strengthening*. Semakin kecil ukuran butir berarti semakin banyak jumlah butir. Jumlah butir yang semakin banyak berarti area batas butir semakin luas sehingga semakin banyak terjadi mekanisme *pile up* atau penumpukan dislokasi pada batas butir akibatnya material menjadi semakin keras. Karena seperti kita ketahui, prinsip dasar untuk pengerasan material dengan menghambat Bergeraknya dislokasi (*Anonymous 3: 1*).

2.5.3 Mekanisme Penguatan pada Material Logam

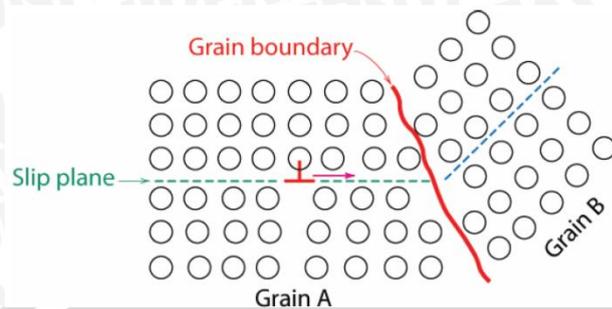
Mekanisme penguatan pada material logam merupakan hubungan antara pergerakan dislokasi dan sifat mekanik dari logam. Kemampuan suatu material logam untuk diubah secara plastis tergantung pada kemampuan dislokasi untuk dapat bergerak dan akan mengurangi pergerakan dislokasi, kekuatan mekanik dapat ditingkatkan, di mana disebabkan energi mekanik yang dibutuhkan untuk membuat deformasi plastis akan semakin besar. Sebaliknya apabila pergerakan dislokasi tidak ada yang menahan, logam akan lebih mudah untuk terdeformasi. Secara umum mekanisme penguatan yang digunakan pada material logam adalah melalui pengerasan regang, penguatan larutan padat, penguatan presipitasi, dan penguatan batas butir. Gambar 2.7 di bawah ini memperlihatkan mekanisme penguatan yang terjadi pada logam.



Gambar 2.7 Mekanisme Penguatan pada Logam dalam Skala Mikroskopik, Seperti Adanya Presipitat, Atom Interstisi dan Substitusi (Larutan Padat), serta Penguatan Batas Butir
Sumber: Norman (2010: 4)

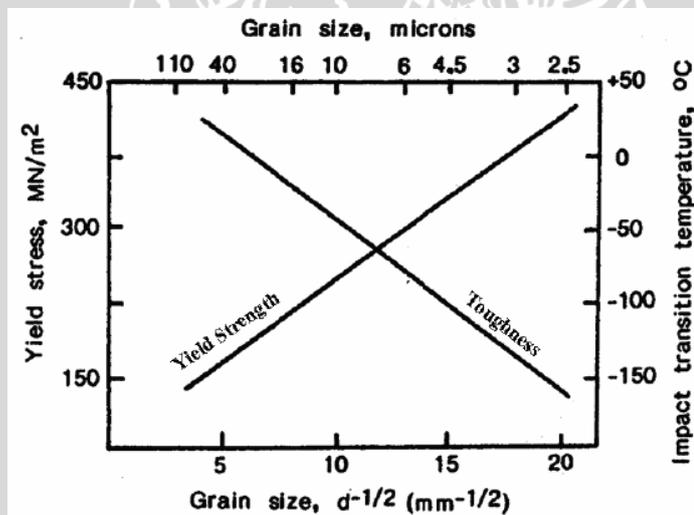
Penghalusan butir adalah salah satu cara yang efektif bagi penguatan yang dihasilkan dengan menghalangi pergerakan dislokasi di sekitar batas butir. Dengan mengecilnya ukuran dari butir akan meningkatkan batas butir per unit volume dan mengurangi garis edar bebas dari slip yang berkelanjutan. Pergerakan selanjutnya membutuhkan tegangan yang tinggi untuk membuka atau

menghasilkan suatu dislokasi baru pada butir berikutnya. Gambar 2.8 menunjukkan pengaruh dari batas butir terhadap pergerakan dislokasi.



Gambar 2.8 Batas Butir Sebagai *Barrier* dalam Menghalangi Pergerakan Dislokasi (Searah *Slip Plane*)
Sumber: Norman (2010: 5)

Pada baja, penghalusan butir adalah mekanisme penguatan yang paling diinginkan karena merupakan satu-satunya mekanisme penguatan yang dapat meningkatkan kekuatan dan menurunkan ketangguhan *Charpy*. Pada gambar 2.9 ditunjukkan pengaruh dari ukuran butir ferit pada baja terhadap kekuatan luluh (*yield strength*) dan temperatur impak.



Gambar 2.9 Efek dari Ukuran Butir Ferit terhadap Kekuatan Luluh dan Temperatur Impak
Sumber: Norman (2010: 5)

Seperti ditunjukkan pada gambar 2.9, pada logam polikristalin seperti pada baja, ukuran butir memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap sifat-sifat mekanik. Material logam dengan butir yang halus memiliki kemampuan menahan

pergerakan dislokasi lebih baik dibandingkan butir kasar (besar), dikarenakan butir halus memiliki area batas butir total yang lebih luas (Norman, 2010: 4–6).

2.5.4 Pengujian Struktur Mikro

Analisa struktur mikro digunakan untuk menentukan apakah parameter struktur berada dalam spesifikasi tertentu dan di dalam penelitian digunakan untuk menentukan perubahan–perubahan struktur mikro yang terjadi sebagai akibat komposisi atau perlakuan panas.

Analisa struktur mikro adalah suatu analisa mengenai struktur logam melalui pembesaran dengan menggunakan mikroskop khusus metalografi sehingga kita dapat mengetahui bentuk dan ukuran kristal logam, kerusakan logam akibat deformasi, proses perlakuan panas, dan perbedaan komposisi (Anonymous 2: 2).

2.6 Hipotesa

Semakin tinggi temperatur *tempering*, akan memudahkan atom–atom untuk bergerak yang mana akan memicu pertumbuhan butir yang mengakibatkan ukuran butir akan menjadi besar, sehingga material akan mudah mengalami slip dan membuat material semakin meningkat kekuatan impaknya.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen yang bertujuan mengamati dan mengkaji pengaruh temperatur *tempering* terhadap kekuatan impak Baja JIS G3101 SS400. Kajian literatur dari berbagai sumber baik dari buku, jurnal yang ada di perpustakaan, maupun dari internet juga dilakukan untuk menambah informasi yang diperlukan.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada 14 sampai 31 Mei 2012 yang bertempat di Laboratorium Pengujian Bahan, Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang, untuk melakukan pembuatan spesimen, proses *hardening*, *tempering*, pengujian impak, foto mikro dan foto makro.

3.3 Variabel Penelitian

3.3.1 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang besarnya ditentukan sebelum penelitian. Variabel bebas diubah-ubah untuk mendapatkan hubungan antara variabel bebas dengan variabel terikat. Dalam penelitian ini variabel bebas yang digunakan adalah temperatur *tempering* yaitu: 200°C, 300°C, dan 400°C.

3.3.2 Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang nilainya tergantung dari variabel bebas dan diketahui setelah penelitian dilakukan. Variabel terikat yang diamati dalam penelitian ini adalah kekuatan impak.

3.3.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang nilainya dijaga konstan selama penelitian, variabel yang dijaga konstan dalam penelitian ini adalah:

1. Proses *hardening* menggunakan temperatur pemanasan 825°C , *holding time* 30 menit, dan pendinginan menggunakan air hingga mencapai temperatur kamar.
2. Proses *tempering* menggunakan *holding time* 30 menit, dan pendinginan menggunakan udara hingga mencapai temperatur kamar.

3.4 Alat dan Bahan Penelitian

3.4.1 Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini:

1. *Charpy Impact Testing Machine*

Digunakan untuk pengujian impak.



Gambar 3.1 *Charpy Impact Testing Machine*

Spesifikasi:

- Berat Pendulum : 24 kg
- Panjang Batang : 60 cm

2. *Infrared Thermometer*

Digunakan untuk mengukur temperatur spesimen saat pengujian impak.



Gambar 3.2 *Infrared Thermometer*

Spesifikasi:

- Merk : Krisbow KW06-304
- Temperatur Pengoperasian : -50°C sampai 750°C
- Buatan : China

3. *Micro Vickers Hardness Tester*

Digunakan untuk pengujian foto mikro spesimen.



Gambar 3.3 *Micro Vickers Hardness Tester*

Spesifikasi:

- Tipe : Digital Micro Vickers Hardness Tester TH712
- Buatan : China
- Pembesaran : 100 dan 400 kali

4. *Centrifugal Sand Paper Machine*

Digunakan untuk menghaluskan permukaan spesimen.



Gambar 3.4 *Centrifugal Sand Paper Machine*

Spesifikasi:

- Merk : Saphir
- Buatan : Jerman
- Diameter : 15 cm
- Putaran : 1200 rpm

5. *Power Hack Saw*

Digunakan untuk memotong spesimen.



Gambar 3.5 *Power Hack Saw*

Spesifikasi:

- Tipe : BSM 210 14240
- Produksi : Kast Maschinenbau GmbH–German

6. *Furnace*

Digunakan untuk proses pemanasan dan *holding*.



Gambar 3.6 *Furnace*

Spesifikasi:

- Merk : OFFENBAU HOFMAN
- Tipe : E/90
- Temperatur Maks. : 1.100° C
- Buatan : Austria
- Voltage/ Daya : 220 volt / 3,3 kW

7. *Kulkas*

Digunakan untuk mendinginkan spesimen.



Gambar 3.7 *Kulkas*

Spesifikasi:

- Merk : Samsung
- Tipe : SR 150

8. Mikroskop Logam

Digunakan untuk pengujian foto makro spesimen.



Gambar 3.8 Mikroskop Logam

Spesifikasi:

- Merk : Grünauer Fenn 40
- Buatan : Mikroskop Technik Rathenow, Germany
- Pembesaran : 1-10 kali

9. Kikir

Digunakan untuk membuat V notch pada spesimen.

10. Timer

Digunakan untuk mengitung *holding time*.

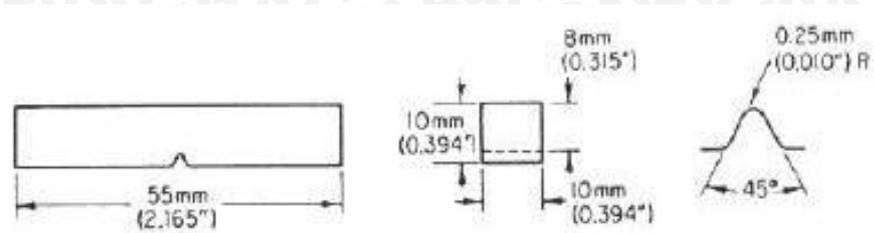
11. Bak

Digunakan untuk wadah air.

3.4.2 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan adalah sebagai berikut.

1. Spesimen dari Baja JIS G3101 SS400.



Gambar 3.9 Dimensi Spesimen Sesuai Standar ASTM E-23

Tabel 3.1 Komposisi Baja JIS G3101 SS400

Komposisi	Persentase (%)
Besi (Fe)	98,79
Karbon (C)	0,18
Silikon (Si)	0,18
Mangan (Mn)	0,81
Fosfor (P)	0,01
Sulfur (S)	0,01
Aluminium (Al)	0,03

Sumber: *Mill Certificate*, PT. Krakatau Steel

Tabel 3.2 Sifat Mekanik Baja JIS G3101 SS400

Kekuatan tarik	400–510 MPa
Kekuatan <i>yield</i>	205–245 MPa
Angka kekerasan <i>brinell</i>	160 HB

Sumber: *Mill Certificate*, PT. Krakatau Steel

2. Kertas Gosok 100 CC–CW

Digunakan untuk mengosok spesimen sebelum diproses *hardening*, *tempering*, diuji impak, dan foto mikro.

3. Air

Digunakan untuk pendinginan pada proses *hardening*.

3.5 Prosedur Penelitian

Langkah-langkah yang dilaksanakan dalam penelitian ini adalah:

1. Permukaan spesimen dibersihkan terlebih dahulu dari kerak dan kotoran.
2. Melakukan proses *hardening*.

Spesimen dimasukkan ke dalam *furnace* dan dilakukan pemanasan dengan temperatur 825°C, *holding time* 30 menit kemudian didinginkan menggunakan air hingga mencapai temperatur kamar.

3. Permukaan spesimen dibersihkan terlebih dahulu dari kerak dan kotoran.
4. Melakukan proses *tempering*.

Spesimen dimasukkan ke dalam *furnace* dan dilakukan pemanasan dengan temperatur yang bervariasi (200°C, 300°C, dan 400°C), *holding time* 30 menit kemudian didinginkan menggunakan udara hingga mencapai temperatur kamar.

5. Melakukan pengujian impak sesuai standar ASTM E-23.

a. Dilakukan *Dry Run Test* terlebih dahulu.

- Pendulum *Charpy Impact Testing Machine* diatur agar benar-benar menggantung bebas dalam keadaan diam.
- Lengan pengikat diturunkan dengan roda pemutar.
- Tombol pengunci ditekan selanjutnya jika kedudukan lengan pengikat sudah tepat terhadap pendulum, pengunci dapat dilepas tanpa menggeser kedudukan pendulum.
- Kedua jarum penunjuk diatur pada posisi vertikal.
- Pendulum beserta lengannya diangkat dengan roda pemutar sehingga jarum luar menunjukkan skala yang sesuai dengan kedudukan pendulum dalam posisi horizontal (90°).
- Dilakukan *Dry Run Test* untuk mengetahui energi yang diserap mesin karena kerugian mekanik. Dilakukan pencatatan sudut yang ditunjuk oleh jarum.

b. Dilakukan pengujian impak pada spesimen.

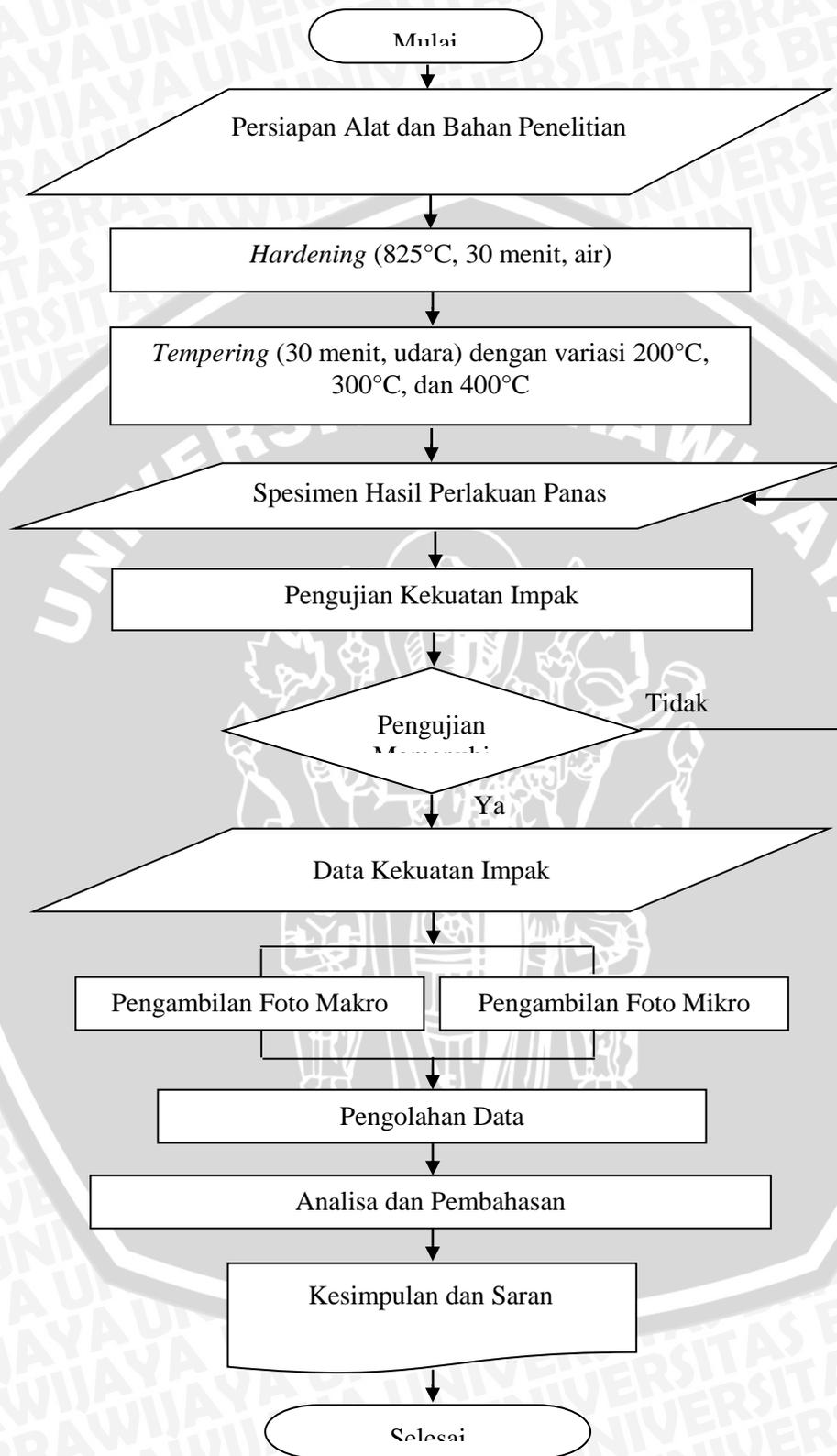
- Spesimen dikondisikan temperaturnya sesuai rencana. Saat pengujian, spesimen hasil perlakuan panas diuji pada

temperatur yang berbeda beda yaitu: -25°C , 0°C , 27°C , 63°C , dan 100°C .

- Spesimen diletakkan pada tempatnya sehingga bagian punggung takik tepat pada posisi jatuhnya pendulum.
 - Dilakukan pengujian pada spesimen seperti proses *Dry Run Test*.
6. Melakukan foto makro pada patahan spesimen hasil pengujian impact.
 - Permukaan spesimen dibersihkan terlebih dahulu dari kotoran dan kerak.
 - Dilakukan pengambilan foto makro dengan mikroskop logam dengan pembesaran 3 kali.
 7. Melakukan foto mikro struktur pada spesimen.
 - Permukaan spesimen yang akan dibersihkan terlebih dahulu dari kotoran kemudian dietsa.
 - Dilakukan pengambilan foto mikro struktur dengan *Mikro Vicker Hardness Tester* dengan pembesaran 400 kali.
 8. Melakukan pengolahan data hasil pengujian kekuatan impact.
 9. Melakukan analisa dan pembahasan dari data-data yang diperoleh.
 10. Membuat kesimpulan dari hasil penelitian.
 11. Selesai



3.6 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.10 Diagram Alir Penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengujian Kekuatan Impak

Dari pengujian impak pada temperatur -25°C sampai 100°C yang telah dilakukan, didapatkan sudut akhir (α_1) seperti pada tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 4.1 Data Sudut Akhir (α_1) Pengujian Impak pada Temperatur -25°C sampai 100°C

Variabel	Pengulangan	Temperatur Pengujian				
		-25°C	0°C	27°C	63°C	100°C
Tanpa Perlakuan	1	48^0	50^0	61^0	63^0	$65,5^0$
	2	49^0	52^0	59^0	60^0	$61,5^0$
	3	$48,5^0$	51^0	57^0	60^0	65^0
Tempering 200°C	1	$43,5^0$	42^0	50^0	54^0	$53,5^0$
	2	44^0	44^0	48^0	50^0	56^0
	3	40^0	49^0	50^0	52^0	$52,5^0$
Tempering 300°C	1	55^0	58^0	63^0	65^0	67^0
	2	$55,5^0$	55^0	65^0	67^0	66^0
	3	$51,5^0$	$59,5^0$	64^0	$67,5^0$	68^0
Tempering 400°C	1	68^0	66^0	80^0	82^0	83^0
	2	63^0	67^0	78^0	$82,5^0$	$82,5^0$
	3	64^0	$72,5^0$	$77,5^0$	83^0	$83,5^0$

Contoh perhitungan kekuatan impak untuk sudut akhir (α_1) = 48^0

1. Energi yang dibutuhkan secara ideal (A_0)

$$\begin{aligned}
 A_0 &= G R [\text{Cos } (90^0 - \alpha_1^0) - \text{Cos } \beta^0] \\
 &= 24 \times 600 [\text{Cos } (90^0 - 48^0) - \text{Cos } 90^0] \\
 &= 14400 [\text{Cos } 42^0 - \text{Cos } 90^0] \\
 &= 14400 [0,743 - 0] \\
 &= 10701,285 \text{ kg mm/mm}^2
 \end{aligned}$$

2. Kerugian energi pada alat (F)

$$\begin{aligned}
 F &= G R [\text{Cos } (90^0 - \alpha_0^0) - \text{Cos } \beta^0] \\
 &= 24 \times 600 [\text{Cos } (90^0 - 4^0) - \text{Cos } 90^0] \\
 &= 14400 [\text{Cos } 86^0 - \text{Cos } 90^0] \\
 &= 14400 [0,070 - 0]
 \end{aligned}$$

$$= 1004,493 \text{ kg}\cdot\text{mm}/\text{mm}^2$$

3. Energi aktual yang diperlukan (A)

$$\begin{aligned} A &= A_o - F \\ &= 10701,285 - 1004,493 \\ &= 9696,792 \text{ kg}\cdot\text{mm}/\text{mm}^2 \end{aligned}$$

4. Energi yang diperlukan untuk mematahkan spesimen setiap satuan luas

(A_K)

$$\begin{aligned} A_K &= \frac{A}{F_o} \\ &= \frac{9696,792}{80} \\ &= 121,210 \text{ kg}\cdot\text{mm}/\text{mm}^2 \end{aligned}$$

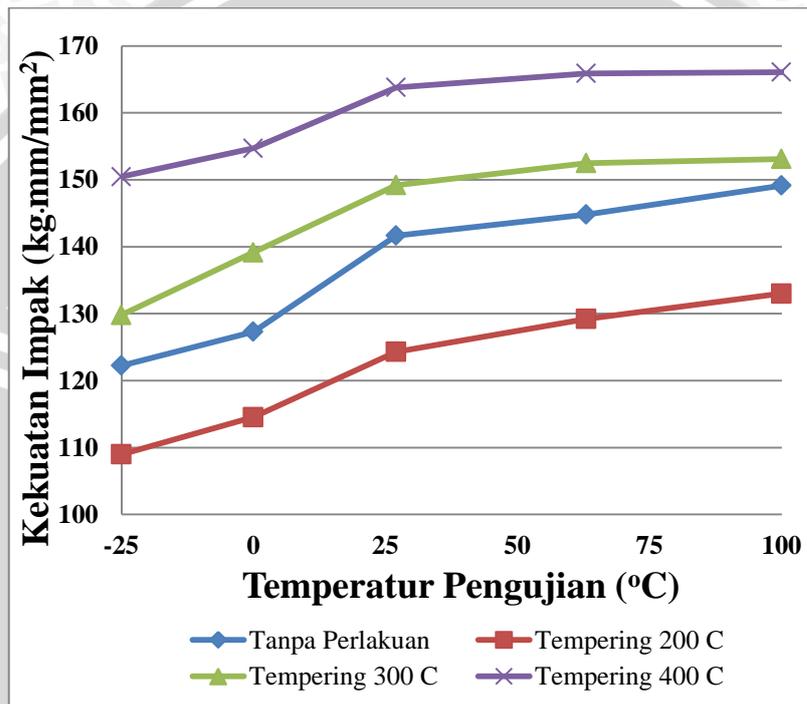
Semua sudut akhir (α_1) pengujian impact dihitung seperti contoh perhitungan di atas sehingga didapatkan kekuatan impact pada temperatur pengujian -25°C sampai 100°C yaitu pada tabel 4.2 di bawah ini.

Tabel 4.2 Data Kekuatan Impact pada Temperatur Pengujian -25°C sampai 100°C ($\text{kg}\cdot\text{mm}/\text{mm}^2$)

Variabel	Pengulangan	Temperatur Pengujian				
		-25°C	0°C	27°C	63°C	100°C
Tanpa Perlakuan	1	121,210	125,332	144,875	147,825	151,237
	2	123,292	129,286	141,734	143,328	145,631
	3	122,256	127,330	138,405	143,328	150,579
	Rata-rata	122,252	127,316	141,671	144,827	149,149
Tempering 200°C	1	111,348	107,887	126,336	133,067	132,138
	2	112,482	112,482	121,210	125,332	136,671
	3	103,146	123,292	125,332	129,286	130,247
	Rata-rata	108,992	114,554	124,293	129,228	133,019
Tempering 300°C	1	125,332	140,092	147,825	150,579	153,135
	2	135,787	134,891	150,579	153,135	151,882
	3	128,313	142,537	149,227	153,742	154,337
	Rata-rata	129,811	139,174	149,210	152,485	153,118
Tempering 400°C	1	154,337	151,882	164,709	165,692	166,102
	2	147,825	153,135	163,510	165,904	165,904
	3	149,227	159,113	163,177	166,102	166,287
	Rata-rata	150,463	154,710	163,799	165,899	166,098

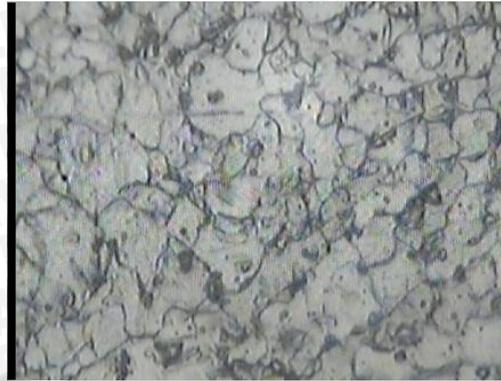
4.2 Pembahasan

Pada gambar 4.1 terlihat bahwa terjadi peningkatan kekuatan impak seiring dengan peningkatan temperatur *tempering*. Spesimen hasil *tempering* 200°C memiliki kekuatan impak paling rendah, selanjutnya spesimen tanpa perlakuan panas memiliki kekuatan impak yang lebih tinggi, spesimen hasil *tempering* 300°C berada di urutan ketiga, dan spesimen hasil *tempering* 400°C memiliki kekuatan impak paling tinggi.



Gambar 4.1 Hubungan antara Temperatur *Tempering* terhadap Kekuatan Impak pada Temperatur antara -25°C sampai 100°C

Spesimen tanpa perlakuan panas pada temperatur pengujian -25°C sampai 100°C memiliki kekuatan impak sebesar 122,252 kg·mm/mm² sampai 149,149 kg·mm/mm² spesimen ini (Baja JIS G3101 SS400) biasanya digunakan untuk pembuatan lambung kapal yang memang membutuhkan ketangguhan yang baik pada temperatur yang berbeda-beda. Ukuran butirannya dapat dilihat berdasarkan foto mikro strukturnya pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Foto Mikro Spesimen Tanpa Perlakuan Panas

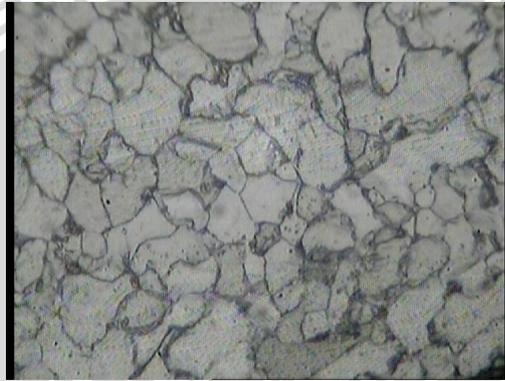
Proses *tempering* dengan temperatur pemanasan 200°C dan *holding time* 30 menit, kekuatan impaknya sebesar $108,992 \text{ kg}\cdot\text{mm}/\text{mm}^2$ sampai $133,019 \text{ kg}\cdot\text{mm}/\text{mm}^2$ pada temperatur pengujian -25°C sampai 100°C lebih rendah daripada kekuatan impak spesimen tanpa perlakuan panas. Hal ini disebabkan proses *tempering* dengan temperatur pemanasan 200°C masih di bawah temperatur rekristalisasi sehingga menyebabkan baja mulai melunak tapi tidak terjadi perubahan yang signifikan pada struktur mikronya dan tidak menghasilkan peningkatan kekuatan impak yang berarti. Hal ini terbukti juga dari perbandingan ukuran butirannya yang terbentuk, jika kita amati gambar 4.3 dibandingkan gambar 4.2 maka akan terlihat bahwa spesimen *tempering* dengan temperatur 200°C memiliki ukuran butir yang lebih kecil daripada spesimen tanpa perlakuan panas.



Gambar 4.3 Foto Mikro Spesimen *Tempering* dengan Temperatur 200°C

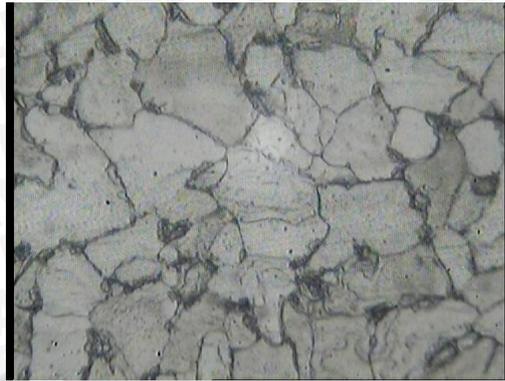
Proses *tempering* dengan temperatur pemanasan 300°C dan *holding time* 30 menit, kekuatan impaknya sebesar $129,811 \text{ kg}\cdot\text{mm}/\text{mm}^2$ sampai $153,118$

kg/mm/mm² pada temperatur pengujian -25°C sampai 100°C lebih tinggi daripada kekuatan impak spesimen tanpa perlakuan panas dan proses *tempering* dengan temperatur pemanasan 200°C. Hal ini disebabkan proses *tempering* dengan temperatur pemanasan 300°C sudah melewati sedikit dari temperatur rekristalisasi sehingga akan meningkatkan keuletannya hanya saja belum begitu signifikan. Hal ini terbukti juga dari perbandingan ukuran butirannya yang terbentuk, jika kita amati gambar 4.4 dibandingkan gambar 4.2 dan gambar 4.3 maka akan terlihat bahwa spesimen *tempering* dengan temperatur 300°C memiliki ukuran butir yang lebih besar daripada spesimen tanpa perlakuan panas dan spesimen *tempering* dengan temperatur 200°C.



Gambar 4.4 Foto Mikro Spesimen *Tempering* dengan Temperatur 300°C

Proses *tempering* dengan temperatur pemanasan 400°C dan *holding time* 30 menit, kekuatan impaknya sebesar 150,463 kg/mm/mm² sampai 166,098 kg/mm/mm² pada temperatur pengujian -25°C sampai 100°C lebih tinggi daripada kekuatan impak spesimen tanpa perlakuan panas maupun proses *tempering* dengan temperatur pemanasan 200°C dan 300°C. Hal ini disebabkan proses *tempering* dengan temperatur pemanasan 400°C sudah melewati temperatur rekristalisasi sehingga akan memberikan kekuatan impak yang lebih besar daripada yang lainnya tadi. Hal ini terbukti juga dari perbandingan ukuran butirannya yang terbentuk, jika kita amati gambar 4.5 dibandingkan gambar 4.2, gambar 4.3, dan gambar 4.4 maka akan terlihat bahwa spesimen *tempering* dengan temperatur 400°C memiliki ukuran butir yang lebih besar daripada spesimen tanpa perlakuan panas, spesimen *tempering* dengan temperatur 200°C, dan spesimen *tempering* dengan temperatur 300°C.



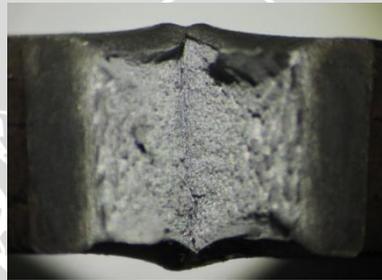
Gambar 4.5 Foto Mikro Spesimen *Tempering* dengan Temperatur 400°C

Adanya peningkatan kekuatan impak seiring dengan peningkatan temperatur *tempering* ini dikarenakan kenaikan temperatur akan meningkatkan energi termal sehingga memudahkan atom-atom untuk bergerak memicu pertumbuhan butir. Selanjutnya menyebabkan difusi atom yang terjadi akan relatif semakin cepat. Percepatan difusi atom terjadi melalui batas butir, dari butiran yang kecil menuju yang lebih besar lalu membentuk butiran yang lebih sempurna. Hal ini akan didukung pula oleh laju pendinginan yang lambat, misalkan saja pada proses *tempering* dengan temperatur pemanasan 200°C maka pendinginannya lebih cepat mencapai temperatur kamar daripada proses *tempering* dengan temperatur pemanasan yang lebih tinggi. Jadi, dengan temperatur pemanasan yang semakin tinggi maka sejumlah inti akan tumbuh lebih cepat dibandingkan dengan nuklea lainnya kemudian akan menghasilkan banyaknya butiran yang semakin besar sehingga material akan meningkatkan kekuatannya.

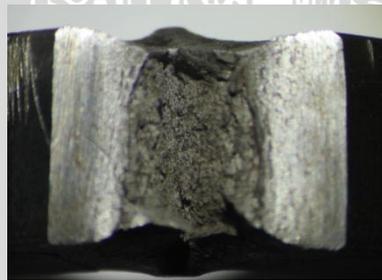
Selain itu, gambar 4.1 juga memperlihatkan bahwa semua grafik memiliki kecenderungan yang sama yaitu terjadi peningkatan kekuatan impak seiring dengan meningkatnya temperatur pengujian, urutan kekuatannya mulai yang terendah yaitu saat temperatur -25°C, 0°C, 27°C, 63°C, dan 100°C.

Hal ini terjadi karena energi termal berpengaruh terhadap ketangguhan spesimen. Jika energi termal semakin besar maka energi yang dimilikinya semakin besar juga. Yang menyebabkan pergerakan dislokasi menjadi relatif lebih mudah sehingga dibutuhkan energi yang lebih besar untuk mematahkan spesimen. Jika dibandingkan antara gambar 4.6 dengan gambar 4.7 maka terbukti dengan penampang patahan spesimen dengan temperatur pengujian 27°C yang robek lebar

dan berserabut kecil-kecil, berbeda dengan penampang patahan spesimen dengan temperatur pengujian 100°C yang robek lebih sempit dan berserabut lebih besar-besar. Sedangkan dengan temperatur pengujian yang semakin rendah maka berlaku hal yang sebaliknya yaitu temperatur yang semakin rendah menyebabkan energi termal semakin melemah sehingga pada saat spesimen terkena beban impact maka pergerakan dislokasi menjadi lebih sulit dan spesimen menjadi lebih mudah dipatahkan dengan energi yang lebih rendah. Terbukti dengan penampang patahan spesimen dengan temperatur pengujian -25°C yang patah menjadi 2 bagian dan berserabut lebih kecil-kecil jika dibandingkan dengan penampang patahan spesimen dengan temperatur pengujian 27°C (lihat gambar 4.6 dan gambar 4.8).



Gambar 4.6 Foto Makro Patahan Spesimen *Tempering* dengan Temperatur 300°C (Temperatur Pengujian Impact 27°C)



Gambar 4.7 Foto Makro Patahan Spesimen *Tempering* dengan Temperatur 300°C (Temperatur Pengujian Impact 100°C)



Gambar 4.8 Foto Makro Patahan Spesimen *Tempering* dengan Temperatur 300°C
(Temperatur Pengujian Impak -25°C)



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari pembahasan yang telah diuraikan pada bab sebelumnya, maka dapat diambil kesimpulan bahwa temperatur *tempering* berpengaruh terhadap kekuatan impact Baja JIS G3101 SS400. Semakin tinggi temperatur *tempering*, maka kekuatan impact semakin tinggi pada temperatur pengujian -25°C sampai 100°C yaitu $150,463 \text{ kg}\cdot\text{mm}/\text{mm}^2$ sampai $166,098 \text{ kg}\cdot\text{mm}/\text{mm}^2$ yang didapatkan dengan proses *tempering* temperatur pemanasan 400°C . Karena dengan peningkatan temperatur pemanasan pada proses *tempering* akan meningkatkan energi termal sehingga menghasilkan banyaknya butiran yang semakin besar dan akhirnya akan meningkatkan kekuatan impactnya.

Selain itu juga terjadi peningkatan kekuatan impact seiring dengan meningkatnya temperatur pengujian, urutan kekuatan impactnya mulai yang terendah yaitu saat temperatur -25°C , 0°C , 27°C , 63°C , dan 100°C . Hal ini ada pengaruhnya dengan temperatur pengujian. Hal ini terjadi karena energi termal berpengaruh terhadap ketangguhan spesimen. Jika energi termal semakin besar maka energi yang dimilikinya semakin besar juga. Yang menyebabkan pergerakan dislokasi menjadi relatif lebih mudah sehingga dibutuhkan energi yang lebih besar untuk mematahkan spesimen. Sedangkan dengan temperatur pengujian yang semakin rendah maka berlaku hal yang sebaliknya.

5.2 Saran

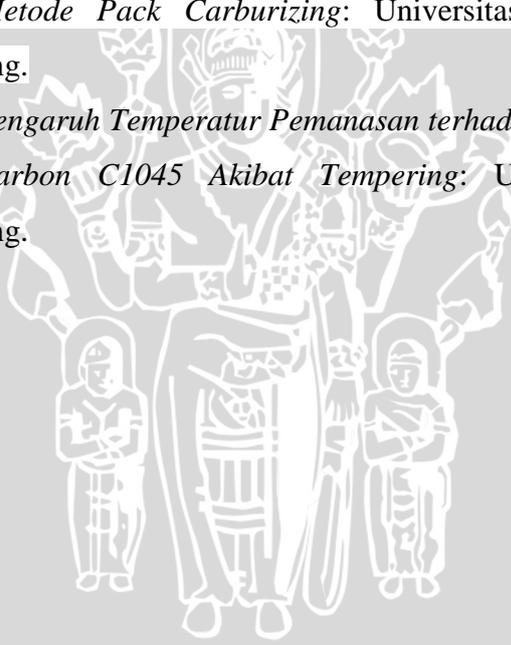
Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, peneliti menyarankan untuk penelitian selanjutnya yaitu:

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh proses *tempering* terhadap kekuatan impact dengan variabel yang lain, misalnya *holding time*.
2. Sebaiknya dilakukan penelitian proses *tempering* terhadap kekuatan impact pada temperatur pengujian yang lebih rendah atau lebih tinggi lagi.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonymous* 1. http://elearning.gunadarma.ac.id/docmodul/pengantar_teknologi_baja/bab1_besi_dan_baja.pdf (diakses tanggal 3 Mei 2012).
- Anonymous* 2. <http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/31045/4/Chapter%20II.pdf> (diakses 28 Juni 2012).
- Anonymous* 3. <http://www.scribd.com/doc/21704570/Pengaruh-Jumlah-Butir-Pada-Kekerasan-Material> (diakses 8 Juli 2012).
- Anonymous* 4. <http://www.scribd.com/doc/40071865/Bab-4-Sifat-Material> (diakses tanggal 3 Mei 2012).
- Anonymous* 5. <http://www.scribd.com/doc/45181633/BAB-II> (diakses tanggal 17 Juni 2012).
- ASM International. 2002.
- Harahap, Sundari Hariyati. 2008. *Penentuan Persentase Pembentukan Fasa Austenite pada Transformasi Bainit Baja Mangan (FeMn) dengan Validasi Microhardness dan Macrohardness pada Temperatur 500°C*: Universitas Sumatra Utara, Medan.
- Karuniawan, Ibnu. 2007. *Perbedaan Nilai Kekerasan pada Proses Double Hardening dengan Media Pendingin Air dan Oli SAE 20 pada Baja Karbon Rendah*: Universitas Negeri Semarang, Semarang.
- Muslim, Khairul. 2008. *Pengaruh Perlakuan Quench Temper dan Spheroidized Anneal terhadap Sifat Mekanis Baja Perkakas*: Universitas Indonesia, Depok.
- Miftakhuddin, Nur. 2006. *Pengaruh Temper dengan Quench Media Oli Mesran SAE 20W-50 terhadap Karakteristik Medium Carbon Steel*: Universitas Negeri Semarang, Semarang.
- Norman, Anton. 2010. *Pengendalian Struktur Austenit terhadap Nukleasi Ferit pada Proses Canai Panas Baja C-Mn*: Universitas Indonesia, Depok.
- Pollack, Herman. 1988. *Materials Science and Metallurgy*: Prentice-Hall, Inggris.
- Purbo, Pramuko Ilmu. 2009. *Peningkatan Kekakuan Pegas Daun dengan Cara Quenching*: Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta.

- Setiadi, Widya Mukti. 2007. *Perubahan Ketangguhan Bahan ST 40 yang Telah Mengalami Proses Double Hardening dengan Carburizing*: Universitas Negeri Semarang, Semarang.
- Suherman, Wahid. 1987. *Pengetahuan Bahan*: Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Surabaya.
- Sukrawan, Yusep. *Proses Pengerasan (Hardening)*.
- Surdia, Tata dan Shinroku, Saito. 1999. *Pengetahuan Bahan Teknik*: PT. Pradnya Paramita, Edisi Keempat, Jakarta.
- Wahyudi, Tedi dan Setiawan, Hendri. 2010. *Studi Pengaruh Temperatur Tempering terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja AISI 4140*: Universitas Bengkulu, Bengkulu.
- Wahyudi. 2009. *Analisa Pengaruh Waktu Tahan terhadap Baja Karbon Rendah ST 40 dengan Metode Pack Carburizing*: Universitas Muhammadiyah Semarang, Semarang.
- Yudiono, Heri. 2006. *Pengaruh Temperatur Pemanasan terhadap Kekuatan Tarik Material Baja Karbon C1045 Akibat Tempering*: Universitas Negeri Semarang, Semarang.



Lampiran 1. Surat Keterangan dan Hasil Penelitian



KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
FAKULTAS TEKNIK JURUSAN MESIN UNIVERSITAS BRAWIJAYA
LABORATORIUM PENGUJIAN BAHAN

Jl. Mayjen Haryono 167 Telp. 553286 Pes. 1214 Malang 65145

Nomor: 024/PT.13.FT.6.M/VII/2012

Yang bertanda tangan di bawah ini menerangkan dengan sesungguhnya bahwa mahasiswa:

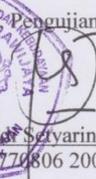
Nama : **Iqbal Farid**
Nim. : 0810620068-62
Instansi : Universitas Brawijaya
Program Studi : Teknik Mesin

Benar-benar telah melaksanakan penelitian / pengambilan data Pengujian Impak, Foto Mikro, dan Foto Makro di Laboratorium Pengujian Bahan Fakultas Teknik Jurusan Mesin Universitas Brawijaya Malang pada tanggal 28-31 Mei 2012, guna keperluan penyusunan skripsi dengan judul:

"Pengaruh Temperatur *Tempering* terhadap Kekuatan Impak Baja JIS G3101 SS400"

Demikian agar surat keterangan ini dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Malang, 23 Juli 2012

Ka. Lab. Pengujian Bahan

Lutfi Hadi Setyarini, ST. MT.
NIP. 197708062003122001





KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
 FAKULTAS TEKNIK JURUSAN MESIN UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LABORATORIUM PENGUJIAN BAHAN

Jl. Mayjen Haryono 167 Telp. 553286 Pes. 1214 Malang 65145

LEMBAR DATA HASIL PENGUJIAN IMPAK

Data Kekuatan Impak pada Temperatur Pengujian -25°C sampai 100°C (kg mm/mm²)

Variabel	Pengulangan	Temperatur Pengujian				
		-25°C	0°C	27°C	63°C	100°C
Tanpa Perlakuan	1	121,210	125,332	144,875	147,825	151,237
	2	123,292	129,286	141,734	143,328	145,631
	3	122,256	127,330	138,405	143,328	150,579
	Rata-rata	122,252	127,316	141,671	144,827	149,149
Tempering 200°C	1	111,348	107,887	126,336	133,067	132,138
	2	112,482	112,482	121,210	125,332	136,671
	3	103,146	123,292	125,332	129,286	130,247
	Rata-rata	108,992	114,554	124,293	129,228	133,019
Tempering 300°C	1	125,332	140,092	147,825	150,579	153,135
	2	135,787	134,891	150,579	153,135	151,882
	3	128,313	142,537	149,227	153,742	154,337
	Rata-rata	129,811	139,174	149,210	152,485	153,118
Tempering 400°C	1	154,337	151,882	164,709	165,692	166,102
	2	147,825	153,135	163,510	165,904	165,904
	3	149,227	159,113	163,177	166,102	166,287
	Rata-rata	150,463	154,710	163,799	165,899	166,098

Malang 23 Juli 2012

Ka. Lab. Pengujian Bahan

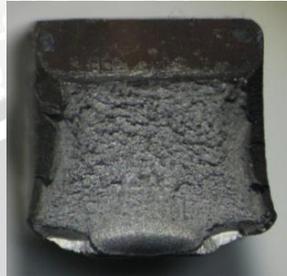


Putri Hadi Setyaning, ST. MT.
 NIP. 197708062003122001

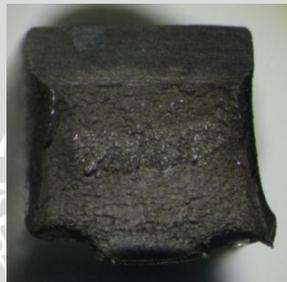


Lampiran 2. Foto Makro Patahan Spesimen Hasil Pengujian Impak

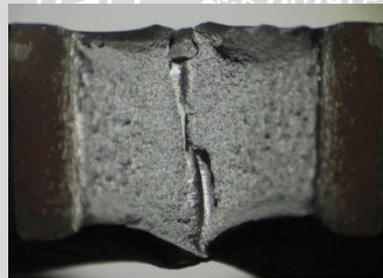
Skala 1 : 3



Spesimen Tanpa Perlakuan Panas (Temperatur Pengujian -25°C)



Spesimen Tanpa Perlakuan Panas (Temperatur Pengujian 0°C)



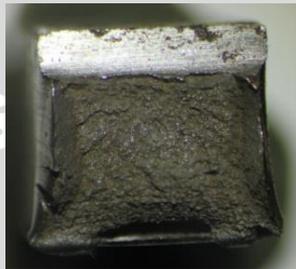
Spesimen Tanpa Perlakuan Panas (Temperatur Pengujian 27°C)



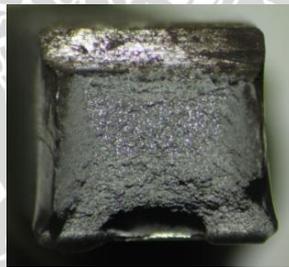
Spesimen Tanpa Perlakuan Panas (Temperatur Pengujian 63°C)



Spesimen Tanpa Perlakuan Panas (Temperatur Pengujian 100°C)



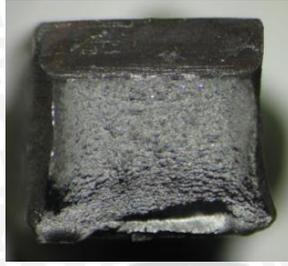
Spesimen *Tempering* dengan Temperatur 200°C (Temperatur Pengujian -25°C)



Spesimen *Tempering* dengan Temperatur 200°C (Temperatur Pengujian 0°C)



Spesimen *Tempering* dengan Temperatur 200°C (Temperatur Pengujian 27°C)



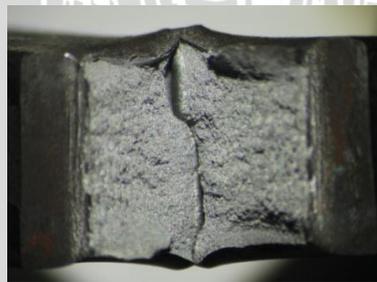
Spesimen *Tempering* dengan Temperatur 200°C (Temperatur Pengujian 63°C)



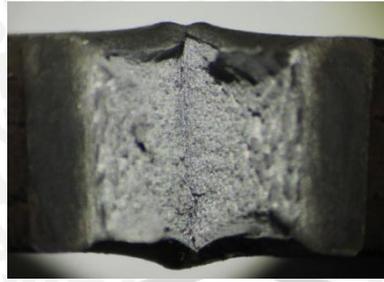
Spesimen *Tempering* dengan Temperatur 200°C (Temperatur Pengujian 100°C)



Spesimen *Tempering* dengan Temperatur 300°C (Temperatur Pengujian -25°C)



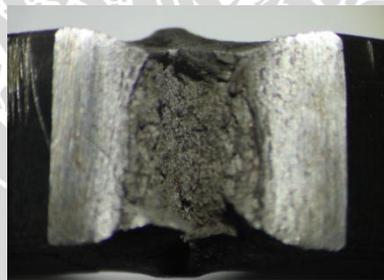
Spesimen *Tempering* dengan Temperatur 300°C (Temperatur Pengujian 0°C)



Spesimen *Tempering* dengan Temperatur 300°C (Temperatur Pengujian 27°C)



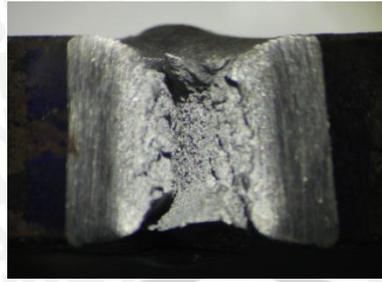
Spesimen *Tempering* dengan Temperatur 300°C (Temperatur Pengujian 63°C)



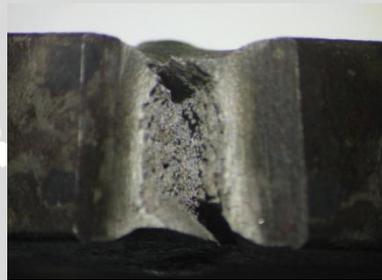
Spesimen *Tempering* dengan Temperatur 300°C (Temperatur Pengujian 100°C)



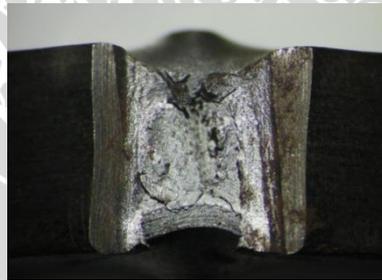
Spesimen *Tempering* dengan Temperatur 400°C (Temperatur Pengujian -25°C)



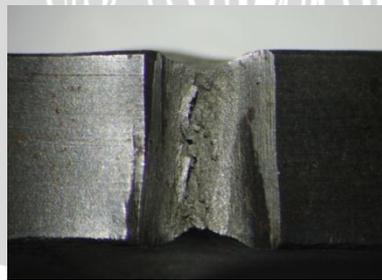
Spesimen *Tempering* dengan Temperatur 400°C (Temperatur Pengujian 0°C)



Spesimen *Tempering* dengan Temperatur 400°C (Temperatur Pengujian 27°C)



Spesimen *Tempering* dengan Temperatur 400°C (Temperatur Pengujian 63°C)



Spesimen *Tempering* dengan Temperatur 400°C (Temperatur Pengujian 100°C)

Lampiran 3. Sertifikat Baja JIS G3101 SS400

PT KRAKAWAU STEEL (PERSERO)

MILL CERTIFICATE

PURCHASER : KARYA BATA EKAMILITA PT.
KORPRI DUTA HARAPAN LINDAH BLOK.PP NO.25-27
KAPUK MURAH JAK - UT

COMMODITY : PRIME NEWLY PRODUCED HOT ROLLED
STEEL IN SHEET/PLATE MILL EDGE

SPECIFICATION : JIS G 3101 SS400

LC. NO. :
CERTIFICATE NO. : B 370230107312/MC/DM/1V/08
DATE : APRIL 07, 2008
LOT. NO. :
DELIVERY ORD. NO. :
SUPPLIER ORD. NO. :
ORDER NUMBER : 3702301

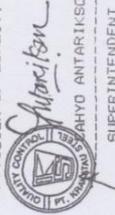
PAGE : 001 OF 001

HEAT NO.	SLAB NO.	COIL NO. AND PACKING NO.	TEST NO.	DIMENSION (MM) T X W X L	QTY (N)	CHEMICAL COMPOSITION X100 (%)						TENSILE TEST		BEND TEST	
						C	SI	MN	P	S	AL	YS (N/MM2)	TS (N/MM2)		
8873101	13001623116 01V	1623116 01V	16231161	10.00X1200X 2400	20	17.8	18.9	81.2	1.1	0.7	2.71	338	466	24	GOOD
"	"	1623116 02V	"	"	20	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	1623116 03V	"	"	20	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	1623116 04V	"	"	16	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	1623116 05V	"	"	16	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
7400901	54091621639 01V	16216391	16216391	12.00X1200X 2400	18	6.9	15.9	102.3	0.7	0.8	2.51	446	501	22	GOOD
"	"	1621639 02V	"	"	18	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	1621639 04V	"	"	18	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"

RS/HIS04/023, ISSUE NO : 03

WE HEREBY CERTIFY THAT DIMENSION, SHAPE AND APPEARANCE OF THE MATERIAL DESCRIBED HEREIN HAS BEEN SATISFACTORILY TESTED AND INSPECTED IN ACCORDANCE WITH THE REQUIREMENTS OF THE ABOVE SPECIFICATION

DIVISION OF QUALITY CONTROL



SUPERINTENDENT

