

Pengaruh Variasi Temperatur Terhadap Ketangguhan Impact Baja Karbon Rendah Menggunakan Pengujian Charpy

Adelia Naomi Titi Marsaulina Hutabarat^{1*}, Suhardiman², Agnes Arum Budiana³
Program Studi D4-Teknik Mesin Produksi dan Perawatan, Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bengkalis,
Bengkalis, Indonesia¹²³

*Email Korespondensi: adelianaomi358@gmail.com¹; suhardimanpolbeng@gmail.com²; agnes@polbeng.ac.id

ARTICLE INFO

Article History:

Submitted 23-Juli-2026

Received 27-Juli-2026

Published 28-juli-2026

Keywords:

Low-carbon steel;
impact energy;
Charpy impact test;
temperature variation;
impact toughness;

Kata Kunci:

Baja karbon rendah
Energi impact
Uji impact Charpy
Variasi temperatur
Ketangguhan impact

ABSTRACT

Low-carbon steel is one of the most widely used engineering materials due to its excellent ductility, good weldability, and ease of fabrication for various industrial applications. However, variations in operating temperature can significantly affect its ability to absorb impact energy, resulting in changes in its mechanical behavior and fracture characteristics. This study aimed to analyze the effect of temperature variation on the impact toughness of low-carbon steel using the Charpy impact test. An experimental research design was employed using low-carbon steel containing 0.159% carbon, as determined by chemical composition analysis. Charpy impact testing was conducted at seven temperature levels: -50°C , -30°C , -10°C , 0°C , 10°C , 30°C , and 50°C . Data were analyzed descriptively by calculating the absorbed impact energy and impact toughness based on the effective cross-sectional area of the specimens. The results showed that increasing temperature significantly improved both absorbed impact energy and impact toughness, with impact energy increasing from 21.28 J at -50°C to 65.27 J at 50°C and impact toughness increasing from 0.387 J/mm² to 1.187 J/mm². These findings indicate that higher temperatures enhance the plastic deformation capability of low-carbon steel, while lower temperatures promote brittle fracture. The novelty of this study lies in providing comprehensive experimental data on the relationship between temperatures ranging from -50°C to 50°C and the impact toughness of low-carbon steel containing 0.159% carbon, providing valuable information for material selection under various service temperature conditions.

ABSTRAK

Baja karbon rendah merupakan salah satu material teknik yang paling banyak digunakan karena memiliki keuletan yang baik, kemampuan las yang tinggi, serta mudah diproses dalam berbagai aplikasi manufaktur dan konstruksi. Meskipun demikian, perubahan temperatur operasi dapat memengaruhi kemampuan material dalam menyerap energi impact sehingga mengubah

perilaku mekanik dan mode patahnya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur terhadap ketangguhan impact baja karbon rendah menggunakan metode uji impact Charpy. Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental dengan menggunakan baja karbon rendah berkadar karbon 0,159% yang diuji pada tujuh variasi temperatur, yaitu -50°C , -30°C , -10°C , 0°C , 10°C , 30°C , dan 50°C . Data dianalisis secara deskriptif kuantitatif melalui perhitungan energi impact dan ketangguhan impact berdasarkan hasil pengujian Charpy. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur meningkatkan energi impact dari 21,28 J menjadi 65,27 J dan ketangguhan impact dari 0,387 J/mm² menjadi 1,187 J/mm², yang mengindikasikan peningkatan kemampuan deformasi plastis serta penurunan kecenderungan patah getas. Penelitian ini menyimpulkan bahwa temperatur berpengaruh signifikan terhadap perilaku mekanik dinamis baja karbon rendah. Kebaruan penelitian ini terletak pada penyajian karakteristik hubungan variasi temperatur -50°C hingga 50°C terhadap energi impact dan ketangguhan impact baja karbon rendah berkadar karbon 0,159% sebagai dasar pemilihan material untuk aplikasi teknik pada berbagai kondisi temperatur.

PENDAHULUAN

Baja karbon rendah merupakan salah satu material logam yang paling banyak digunakan dalam berbagai bidang teknik karena memiliki keseimbangan yang baik antara kekuatan, keuletan, kemudahan pembentukan, kemampuan pengelasan, dan biaya produksi yang relatif rendah. Material ini diaplikasikan secara luas pada konstruksi bangunan, industri otomotif, perkapalan, perpipaan, manufaktur, serta berbagai komponen mesin yang bekerja di bawah pembebanan statis maupun dinamis. Kandungan karbon yang relatif rendah, yaitu kurang dari 0,30%, menghasilkan struktur mikro yang didominasi oleh ferit dan perlit sehingga baja karbon rendah memiliki sifat ulet dan mampu mengalami deformasi plastis sebelum mengalami kegagalan. Karakteristik tersebut menjadikan baja karbon rendah sebagai salah satu material yang banyak dipilih dalam berbagai aplikasi rekayasa.

Salah satu sifat mekanik penting yang harus diperhatikan adalah ketangguhan impact (*impact toughness*), yaitu kemampuan material menyerap energi sebelum mengalami patah akibat pembebanan kejut. Pengujian yang paling banyak digunakan untuk mengevaluasi sifat ini adalah Charpy V-notch sebagaimana diatur dalam standar **ASTM E23**. Pengujian tersebut memberikan informasi mengenai energi yang diserap material selama proses patah sehingga dapat digunakan untuk mengevaluasi perilaku material pada berbagai temperatur.

Pada komponen teknik, kegagalan material tidak hanya disebabkan oleh pembebanan statis, tetapi juga oleh pembebanan dinamis berupa benturan atau beban kejut (*impact loading*). Oleh karena itu, kemampuan material dalam menyerap energi benturan menjadi salah satu parameter penting yang harus diperhatikan. Parameter tersebut dikenal sebagai ketangguhan impact (*impact toughness*), yaitu kemampuan material menyerap energi sebelum mengalami

patah. Semakin tinggi nilai ketangguhan impact, semakin besar kemampuan material menahan inisiasi dan propagasi retak sehingga risiko kegagalan mendadak dapat diminimalkan. Evaluasi ketangguhan impact menjadi sangat penting terutama pada komponen yang beroperasi pada kondisi temperatur yang bervariasi.

Temperatur merupakan salah satu faktor yang sangat memengaruhi perilaku mekanik baja karbon. Pada temperatur rendah, mobilitas dislokasi dalam struktur kristal menurun sehingga deformasi plastis menjadi terbatas dan material cenderung mengalami patah getas (*brittle fracture*). Sebaliknya, peningkatan temperatur meningkatkan mobilitas dislokasi sehingga deformasi plastis berlangsung lebih besar sebelum terjadi patah. Kondisi ini menyebabkan energi benturan yang mampu diserap material meningkat seiring bertambahnya temperatur. Perubahan perilaku tersebut dikenal sebagai fenomena *ductile-to-brittle transition*, yaitu perubahan sifat material dari kondisi getas menuju kondisi yang lebih ulet akibat perubahan temperatur.

Penelitian lain menunjukkan bahwa energi impact hasil pengujian Charpy meningkat seiring kenaikan temperatur pengujian. Sebaliknya, pada temperatur rendah terjadi penurunan kemampuan deformasi plastis sehingga energi impact berkurang secara signifikan. Fenomena tersebut sesuai dengan perilaku khas baja berstruktur BCC yang mengalami transisi dari patah ulet menjadi patah getas ketika temperatur menurun. Capula-Colindres dkk. (2024) juga melaporkan bahwa temperatur berpengaruh terhadap nilai energi serap dan temperatur transisi pada baja pipa API 5L X52. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Xiong et al. (2025) pada berbagai jenis baja struktural, di mana peningkatan temperatur secara konsisten meningkatkan energi impact. Meskipun material yang diteliti berbeda, mekanisme peningkatan ketangguhan akibat kenaikan temperatur menunjukkan kecenderungan yang serupa.

Pengujian Charpy merupakan metode yang paling banyak digunakan untuk mengevaluasi ketangguhan impact suatu material karena mampu memberikan informasi mengenai energi yang diserap spesimen selama proses pembebanan kejut hingga terjadi patah. Selain menghasilkan nilai energi impact, pengujian *Charpy* juga dapat digunakan untuk menganalisis kecenderungan temperatur transisi ulet-getas berdasarkan perubahan energi serapan dan karakteristik permukaan patahan. Oleh karena itu, metode ini banyak diterapkan dalam penelitian maupun pengendalian kualitas material di berbagai industri.

Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa temperatur memiliki pengaruh yang signifikan terhadap ketangguhan impact berbagai jenis baja. Secara umum, peningkatan temperatur menyebabkan kenaikan energi impact akibat meningkatnya deformasi plastis, sedangkan penurunan temperatur mengakibatkan penurunan energi serapan dan meningkatkan kecenderungan terjadinya patah getas. Namun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu lebih banyak membahas baja paduan atau baja yang telah mengalami perlakuan panas. Penelitian mengenai pengaruh variasi temperatur terhadap ketangguhan impact baja karbon rendah tanpa perlakuan panas masih relatif terbatas, khususnya pada rentang temperatur yang mendekati kondisi operasi aktual.

Struktur mikro baja karbon rendah didominasi oleh ferit dan perlit. Ferit memberikan sifat lunak dan ulet, sedangkan perlit meningkatkan kekuatan dan kekerasan. Proporsi kedua fase tersebut sangat menentukan ketangguhan impact material. Penambahan unsur paduan tertentu maupun perubahan temperatur transformasi juga dapat mengubah ukuran butir ferit dan jarak lamela perlit sehingga memengaruhi ketangguhan material.

Krauss (2015) menjelaskan bahwa ukuran butir yang lebih halus meningkatkan ketahanan terhadap propagasi retak sehingga energi impact cenderung meningkat. Lee et al. (2016) juga menegaskan bahwa penambahan unsur tertentu dan pengendalian temperatur transformasi dapat mengubah jarak lamela perlit dan ukuran butir ferit, yang secara langsung memengaruhi ketangguhan impact baja karbon rendah. Dengan demikian, hubungan antara temperatur dan struktur mikro menjadi faktor utama dalam menentukan ketangguhan baja karbon rendah.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur terhadap energi impact dan ketangguhan impact baja karbon rendah menggunakan metode pengujian Charpy. Kebaruan penelitian ini terletak pada analisis hubungan antara variasi temperatur, energi impact, ketangguhan impact, serta karakteristik patahan baja karbon rendah tanpa perlakuan panas dalam satu pembahasan yang terintegrasi. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi ilmiah mengenai perilaku mekanik baja karbon rendah pada berbagai kondisi temperatur serta menjadi referensi dalam pemilihan material untuk aplikasi teknik.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur terhadap ketangguhan impact baja karbon rendah menggunakan metode pengujian Charpy. Penelitian dilaksanakan melalui beberapa tahapan, yaitu pengujian komposisi kimia material, pembuatan spesimen, pemberian variasi temperatur, pengujian impact, perhitungan energi impact dan ketangguhan impact, serta analisis hasil pengujian.

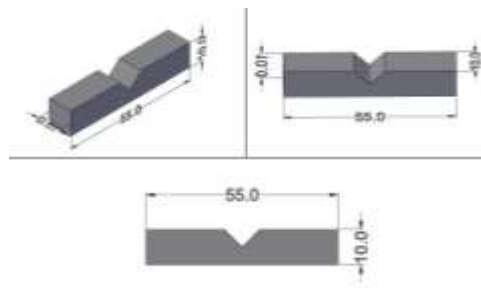
Material yang digunakan pada penelitian ini adalah baja karbon rendah. Berdasarkan hasil pengujian komposisi kimia menggunakan Optical Emission Spectrometer (OES), material memiliki kandungan karbon sebesar 0,159% sehingga termasuk dalam kelompok baja karbon rendah sesuai klasifikasi baja karbon. Selain unsur karbon, material didominasi oleh unsur besi (Fe) sebesar 99,1%, sedangkan unsur lainnya seperti Mn, Si, Cr, Ni, Cu, P, dan S berada dalam kadar yang relatif kecil.

Spesimen pengujian dibuat sesuai standar ASTM E23 dengan takikan berbentuk V (*V-notch*). Keseluruhan spesimen dibuat dengan dimensi yang sama sehingga variasi hasil pengujian hanya dipengaruhi oleh temperatur pengujian. Sebelum dilakukan pengujian impact, spesimen dikondisikan pada tujuh variasi temperatur, yaitu -50°C , -30°C , -10°C , 0°C , 10°C , 30°C , dan 50°C . Setelah temperatur spesimen mencapai kondisi yang diinginkan, pengujian

segera dilakukan menggunakan mesin uji impact Charpy untuk meminimalkan perubahan temperatur selama proses pengujian.



Gambar 1. spesimen pengujian
(sumber:penulis,2026)



Gambar 2. ukuran spesimen
(sumber:penulis,2026)

Pengujian dilakukan dengan melepaskan pendulum dari ketinggian awal sehingga menumbuk spesimen hingga mengalami patah. Energi impact diperoleh dari selisih energi potensial pendulum sebelum dan sesudah tumbukan. Selanjutnya, ketangguhan impact dihitung berdasarkan perbandingan antara energi impact dengan luas penampang efektif spesimen.

Energi impact dihitung menggunakan persamaan:

$$E = Ep_1 - Ep_2$$

dengan:

Ep_1 = Energi potensial awal (Joule)

Ep_2 = Energi potensial akhir (Joule)

Selanjutnya ketangguhan impact dihitung menggunakan persamaan:

$$HI = \frac{E}{A}$$

dengan:

HI = Ketangguhan impact (J/mm^2 atau J/cm^2)

A = Luas penampang di bawah takikan

Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif kuantitatif melalui penyajian tabel dan grafik hubungan temperatur terhadap energi impact maupun ketangguhan impact. Selanjutnya dilakukan pembahasan mengenai mekanisme perubahan sifat mekanik material berdasarkan teori deformasi plastis, propagasi retak, serta fenomena transisi ulet-getas.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui kandungan unsur penyusun material yang digunakan pada penelitian. Hasil pengujian menunjukkan bahwa material memiliki kandungan karbon sebesar 0,159%, sehingga berdasarkan klasifikasi baja karbon material tersebut termasuk ke dalam kelompok baja karbon rendah. Unsur besi (Fe) merupakan unsur dominan dengan persentase sebesar 99,1%, sedangkan unsur paduan lainnya seperti Mn, Si, Cr, Ni, Cu, P, dan S berada dalam jumlah yang relatif kecil.

Tabel 1. Hasil uji komposisi kimia baja karbon rendah

Uraian Pengujian	Metode Uji	Hasil
: Sifat Tampak		
- Sifat Tampak	JIS G1253 : 2002/ Amd1 : 2013	Baik, tidak cacat
: Komposisi Logam Dasar		
- Carbon (C) , % Berat	JIS G1253 : 2002/ Amd1 : 2013	0.159
- Silicon (Si) , % Berat	JIS G1253 : 2002/ Amd1 : 2013	0.137
- Mangan (Mn) , % Berat	JIS G1253 : 2002/ Amd1 : 2013	0.449
- Fosfor (P) , % Berat	JIS G1253 : 2002/ Amd1 : 2013	0.0099
- Sulfur (S) , % Berat	JIS G1253 : 2002/ Amd1 : 2013	0.0094
- Crom (Cr) , % Berat	JIS G1253 : 2002/ Amd1 : 2013	0.0305
-Molibdenium (Mo) , % Berat	JIS G1253 : 2002/ Amd1 : 2013	0.0293
-Nikel (Ni) , % Berat	JIS G1253 : 2002/ Amd1 : 2013	0.0221
-Alumunium (Al) , % Berat	JIS G1253 : 2002/ Amd1 : 2013	0.0280
-Cuprum (Cu) , % Berat	JIS G1253 : 2002/ Amd1 : 2013	0.0162
-Niobium (Nb) , % Berat	JIS G1253 : 2002/ Amd1 : 2013	0.00047
-Tungsten (W) , % Berat	JIS G1253 : 2002/ Amd1 : 2013	<0.00020

Uraian Pengujian	Metode Uji	Hasil
-Timbal (Pb) , % Berat	JIS G1253 : 2002/ Amd1 : 2013	<0.00020
-Antimon (Sb) , % Berat	JIS G1253 : 2002/ Amd1 : 2013	<0.00040
-Nitrogen (N) , % Berat	JIS G1253 : 2002/ Amd1 : 2013	0.0128
-Ferrum (Fe) , % Berat	JIS G1253 : 2002/ Amd1 : 2013	99.1
-Vanadium (V) , % Berat	JIS G1253 : 2002/ Amd1 : 2013	0.0020
-Boron (B) , % Berat	JIS G1253 : 2002/ Amd1 : 2013	<0.00010

(sumber: Lab.UPPKB2T,2026)

Kandungan karbon yang relatif rendah menyebabkan struktur mikro baja didominasi oleh fase ferit dan perlit. Struktur mikro tersebut memberikan sifat keuletan yang tinggi sehingga material mampu mengalami deformasi plastis sebelum mengalami kegagalan. Oleh karena itu, baja karbon rendah banyak digunakan pada komponen teknik yang membutuhkan kombinasi antara kekuatan, keuletan, serta kemudahan proses manufaktur.

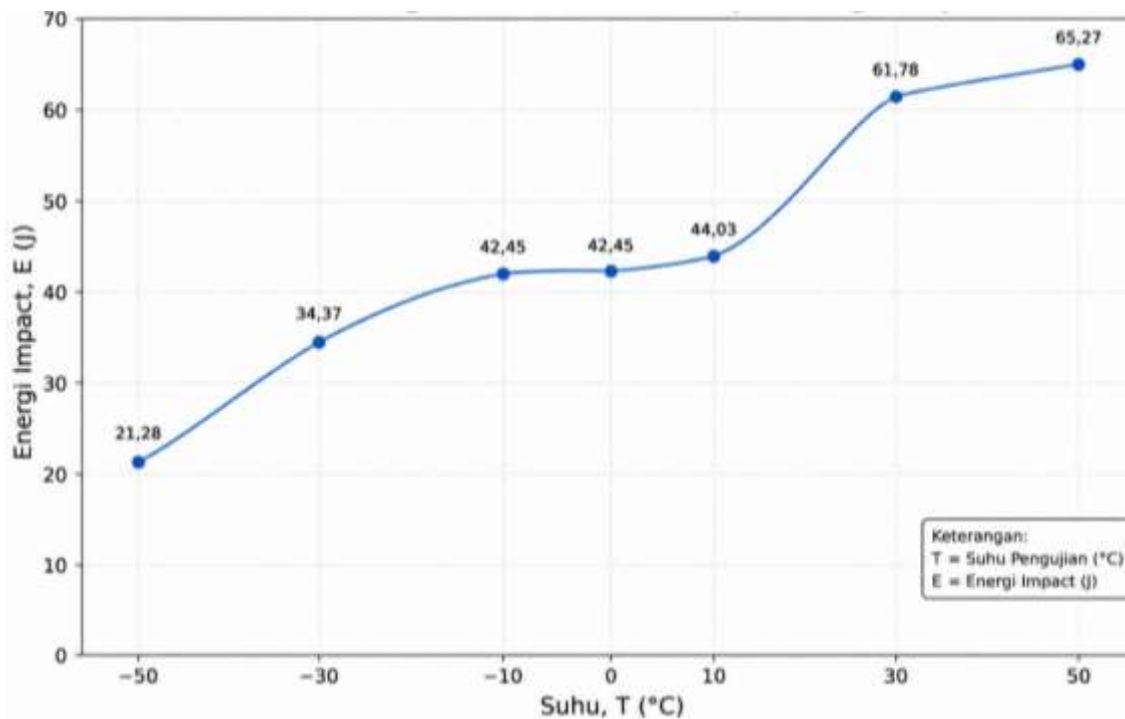
Hasil dan Pembahasan 1

Hasil pengujian menunjukkan bahwa temperatur memberikan pengaruh yang signifikan terhadap energi impact baja karbon rendah. Nilai energi impact meningkat secara bertahap seiring meningkatnya temperatur pengujian. Pada temperatur -50°C , energi impact yang diperoleh sebesar 21,28 J, kemudian meningkat menjadi 34,37 J pada temperatur -30°C , 42,45 J pada temperatur -10°C , 42,45 J pada temperatur 0°C , 44,03 J pada temperatur 10°C , 61,78 J pada temperatur 30°C , dan mencapai nilai tertinggi sebesar 65,27 J pada temperatur 50°C .

Tabel 2. Hasil pengujian energi impact

T	θ	α	L	M	t	b	A	E	HI
($^{\circ}\text{C}$)	($^{\circ}$)	($^{\circ}$)	(m)	(kg)	(mm)	(mm)	(mm^2)	(J)	(J/mm^2)
-50	130	101	0,6	8	5,5	10	55	21,28	0,387
-30	130	85	0,6	8	5,5	10	55	34,37	0,625
-10	130	75	0,6	8	5,5	10	55	42,45	0,772
0	130	75	0,6	8	5,5	10	55	42,45	0,772
10	130	73	0,6	8	5,5	10	55	44,03	0,801
30	130	48	0,6	8	5,5	10	55	61,78	1,123
50	130	42	0,6	8	5,5	10	55	65,27	1,187

(sumber: Penulis, 2026)



Gambar 3. Grafik Hubungan Variasi Temperatur terhadap Energi Impact
(sumber: penulis, 2026)

Peningkatan energi impact menunjukkan bahwa kenaikan temperatur meningkatkan kemampuan baja karbon rendah dalam menyerap energi benturan sebelum mengalami patah. Pada temperatur rendah, atom-atom dalam kisi kristal memiliki energi yang lebih rendah sehingga pergerakan dislokasi menjadi terbatas. Kondisi tersebut mengurangi kemampuan material mengalami deformasi plastis sehingga retak dapat merambat dengan lebih cepat dan material cenderung mengalami patah getas. Sebaliknya, pada temperatur yang lebih tinggi, mobilitas dislokasi meningkat sehingga deformasi plastis dapat berkembang sebelum retak merambat. Akibatnya, energi yang diperlukan untuk mematahkan spesimen menjadi lebih besar.

Hasil penelitian ini sejalan dengan berbagai penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa peningkatan temperatur mampu meningkatkan energi impact baja karbon melalui peningkatan deformasi plastis dan penurunan kecenderungan terjadinya patah getas (Li et al., 2025; Wu et al., 2021). Dengan demikian, temperatur merupakan salah satu parameter utama yang memengaruhi kemampuan baja karbon rendah dalam menyerap energi benturan.

1. Pengaruh Variasi Temperatur terhadap Ketangguhan Impact

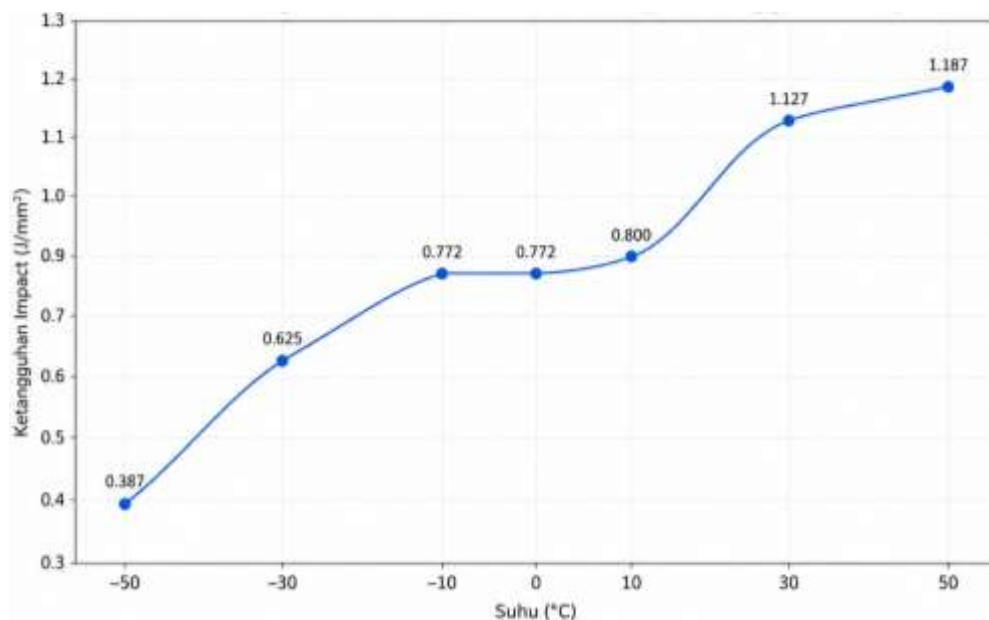
Ketangguhan impact dihitung berdasarkan perbandingan antara energi impact dengan luas penampang efektif spesimen. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai ketangguhan impact mengalami peningkatan yang sejalan dengan kenaikan temperatur.

Pada temperatur -50°C , ketangguhan impact sebesar $0,387 \text{ J/mm}^2$, kemudian meningkat menjadi $0,625 \text{ J/mm}^2$ pada -30°C , $0,772 \text{ J/mm}^2$ pada -10°C , $0,772 \text{ J/mm}^2$ pada 0°C , $0,801 \text{ J/mm}^2$ pada 10°C , $1,123 \text{ J/mm}^2$ pada 30°C , dan mencapai $1,187 \text{ J/mm}^2$ pada temperatur 50°C .

Tabel 3. Hasil perhitungan ketangguhan impact

Suhu($^{\circ}\text{C}$)	E (J)	A (mm^2)	HI (J/mm^2)
-50	21,28	55	0,387
-30	34,37	55	0,625
-10	42,45	55	0,772
0	42,45	55	0,772
10	44,03	55	0,801
30	61,78	55	1,123
50	65,27	55	1,187

(sumber: Penulis,2026)

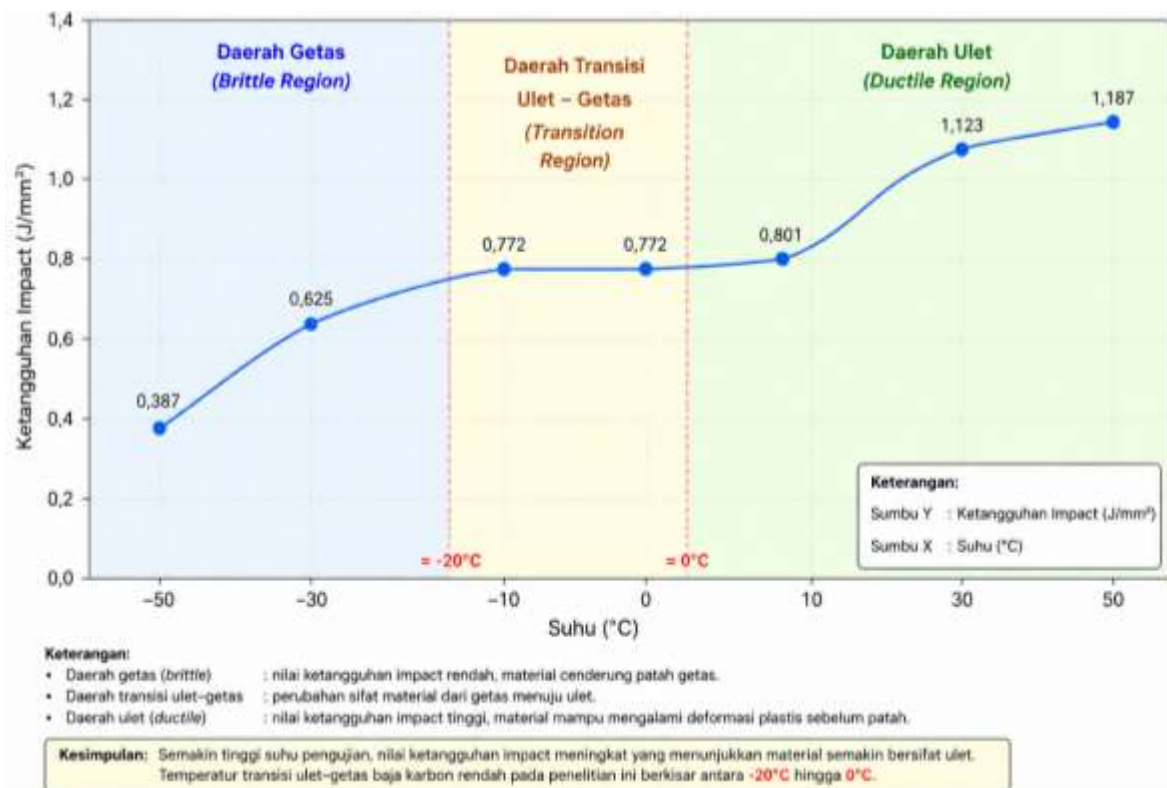


Gambar 4. Grafik Hubungan Variasi Temperatur terhadap Ketangguhan Impact

(sumber: penulis,2026)

Peningkatan ketangguhan impact menunjukkan bahwa kemampuan intrinsik material dalam menyerap energi benturan per satuan luas penampang meningkat seiring bertambahnya temperatur. Karena seluruh spesimen memiliki luas penampang efektif yang sama, pola perubahan ketangguhan impact mengikuti pola perubahan energi impact. Hal ini menunjukkan bahwa kenaikan temperatur memberikan kontribusi langsung terhadap peningkatan kemampuan material dalam menahan pembebanan dinamis.

Hasil dan Pembahasan 2



Gambar 5. Grafik Transisi Ulet-Gelas (Ductile-to-Brittle Transition)

(sumber: penulis,2026)

Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi temperatur memberikan pengaruh yang nyata terhadap perubahan perilaku mekanik baja karbon rendah. Peningkatan energi impact dan ketangguhan impact pada setiap kenaikan temperatur mengindikasikan bahwa material mengalami perubahan sifat dari kondisi getas (*brittle*) menuju kondisi yang lebih ulet (*ductile*). Fenomena tersebut dikenal sebagai *ductile-to-brittle transition (DBTT)*, yaitu perubahan mekanisme patah akibat pengaruh temperatur.

Pada temperatur -50°C , spesimen hanya mampu menyerap energi sebesar 21,28 J dengan ketangguhan impact sebesar $0,387 \text{ J/mm}^2$. Nilai tersebut merupakan yang terendah dibandingkan temperatur lainnya, menunjukkan bahwa material berada pada kondisi yang relatif getas. Pada kondisi ini, energi termal atom menurun sehingga mobilitas dislokasi dalam struktur kristal menjadi terbatas. Akibatnya, deformasi plastis yang terjadi sebelum patah sangat kecil dan retak dapat merambat dengan cepat melalui bidang kristal, menghasilkan patahan yang bersifat getas.

Seiring meningkatnya temperatur hingga 50°C , energi impact meningkat menjadi 65,27 J dengan ketangguhan impact sebesar $1,187 \text{ J/mm}^2$. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa material mampu mengalami deformasi plastis yang lebih besar sebelum mengalami kegagalan. Bertambahnya energi termal menyebabkan dislokasi lebih mudah bergerak sehingga tegangan yang diterima material dapat didistribusikan secara lebih merata. Kondisi tersebut menghambat propagasi retak dan meningkatkan kemampuan material dalam menyerap energi benturan.

Berdasarkan grafik hubungan temperatur terhadap energi impact maupun ketangguhan impact, tidak terlihat adanya penurunan nilai pada rentang temperatur pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur yang diberikan, semakin besar pula kemampuan baja karbon rendah dalam menyerap energi benturan. Meskipun penelitian ini belum menentukan secara kuantitatif nilai *Ductile-to-Brittle Transition Temperature (DBTT)*, tren hasil pengujian menunjukkan bahwa baja karbon rendah mengalami kecenderungan transisi dari perilaku getas menuju perilaku ulet seiring meningkatnya temperatur.

Hasil penelitian ini sejalan dengan teori metalurgi yang menyatakan bahwa baja karbon memiliki kecenderungan mengalami peningkatan keuletan pada temperatur yang lebih tinggi akibat meningkatnya mobilitas dislokasi (Bhadeshia & Honeycombe, 2017; Krauss, 2015). Dengan demikian, temperatur menjadi salah satu parameter penting yang harus dipertimbangkan dalam pemilihan material untuk komponen yang bekerja pada lingkungan dengan variasi temperatur.

Analisis Karakteristik Patahan

Analisis karakteristik patahan dilakukan untuk mengetahui perubahan mekanisme kegagalan spesimen setelah dilakukan pengujian impact Charpy pada berbagai variasi temperatur. Perbedaan temperatur memberikan perubahan yang cukup jelas terhadap bentuk permukaan patahan, sehingga dapat digunakan sebagai indikator perubahan perilaku mekanik material.

Pada temperatur rendah, permukaan patahan cenderung tampak lebih rata, mengkilap, dan menunjukkan sedikit deformasi plastis. Karakteristik tersebut merupakan ciri khas **patah getas** (*brittle fracture*). Pada kondisi ini, retak berkembang dengan cepat tanpa didahului deformasi plastis yang signifikan sehingga energi yang diserap material relatif kecil. Hal ini sesuai dengan hasil pengujian yang menunjukkan nilai energi impact terendah pada temperatur -50°C .



Gambar 6. Patah Getas pada suhu -50°C
(sumber: penulis, 2026)

Sebaliknya, pada temperatur yang lebih tinggi permukaan patahan tampak lebih kasar, berserat, dan menunjukkan adanya deformasi plastis sebelum patah. Karakteristik tersebut mengindikasikan terjadinya **patah ulet** (*ductile fracture*). Sebelum mengalami kegagalan, material terlebih dahulu mengalami deformasi plastis sehingga mampu menyerap energi benturan yang lebih besar. Kondisi tersebut ditunjukkan oleh meningkatnya nilai energi impact dan ketangguhan impact pada temperatur 10°C , 30°C , hingga 50°C .



Gambar 7. Patah Ulet pada suhu 50°C
(sumber: penulis, 2026)

Perubahan karakteristik patahan ini memperkuat hasil analisis kuantitatif yang diperoleh dari pengujian Charpy. Semakin tinggi temperatur pengujian, semakin besar kemampuan material dalam mengalami deformasi plastis sehingga kecenderungan patah getas berkurang. Dengan demikian, hasil pengamatan terhadap permukaan patahan mendukung hubungan antara temperatur dan peningkatan ketangguhan impact baja karbon rendah.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi temperatur tidak hanya memengaruhi besarnya energi yang diserap material, tetapi juga mengubah mekanisme kegagalan material selama proses pembebanan kejut. Oleh karena itu, temperatur menjadi salah

satu parameter penting yang perlu dipertimbangkan dalam perancangan komponen teknik yang beroperasi pada kondisi lingkungan dengan fluktuasi temperatur.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh variasi temperatur terhadap ketangguhan impact baja karbon rendah menggunakan metode pengujian Charpy, dapat disimpulkan bahwa variasi temperatur memberikan pengaruh yang signifikan terhadap energi impact dan ketangguhan impact baja karbon rendah. Peningkatan temperatur dari -50°C hingga 50°C menyebabkan energi impact meningkat dari 21,28 J menjadi 65,27 J, sedangkan ketangguhan impact meningkat dari $0,387 \text{ J/mm}^2$ menjadi $1,187 \text{ J/mm}^2$.

Peningkatan nilai tersebut menunjukkan bahwa temperatur yang lebih tinggi meningkatkan kemampuan deformasi plastis material sehingga baja karbon rendah mampu menyerap energi benturan yang lebih besar sebelum mengalami patah. Sebaliknya, pada temperatur rendah material menunjukkan kecenderungan mengalami patah getas akibat terbatasnya mobilitas dislokasi dan berkurangnya deformasi plastis.

Analisis karakteristik patahan menunjukkan bahwa permukaan patahan berubah dari dominan getas pada temperatur rendah menjadi lebih ulet pada temperatur tinggi. Hasil ini mengonfirmasi bahwa peningkatan temperatur berkontribusi terhadap perubahan perilaku mekanik baja karbon rendah dari kondisi getas menuju kondisi yang lebih ulet.

Penelitian ini memberikan informasi bahwa temperatur merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi ketangguhan impact baja karbon rendah. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi dalam pemilihan material dan perancangan komponen teknik yang bekerja pada kondisi pembebanan dinamis dengan variasi temperatur.

DAFTAR PUSTAKA

- Li, X., Zhang, Y., Wang, H., & Chen, Z. (2025). Effect of temperature on impact toughness of nuclear-grade low-carbon tubular steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*.
- Wang, Y., Liu, Z., Zhang, X., et al. (2021). Cryogenic impact toughness and fracture behavior of austenitic steels. *Communications Materials*, 2, Article 49.
- Xiong, Y., Li, H., Zhao, Q., et al. (2025). Effect of temperature on Charpy impact properties of structural steels. *Materials*, 18(12), 2845.
- ASM International. (2021). Recent developments in low-carbon steel characterization. *Advanced Materials Research*.
- Journal of Materials Research and Technology. (2023). Mechanical behavior of low carbon steel under different temperature conditions.
- ASM International. (2021). *ASM handbook: Volume 1: Properties and selection: Irons, steels, and high-performance alloys*. ASM International.

- ASTM International. (2023). *ASTM E23-23: Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E0023-23>
- Bhadeshia, H. K. D. H., & Honeycombe, R. W. K. (2017). *Steels: Microstructure and properties* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). John Wiley & Sons.
- Capula-Colindres, S., Terán, G. M., Velázquez, J. C., Angeles-Herrera, D., & Torres-Santillán, E. (2024). Charpy impact toughness and transition temperature for API 5L X52 seamless pipeline. *Strength of Materials*, 56(1), 136–143. <https://doi.org/10.1007/s11223-024-00635-7>
- Davis, J. R. (Ed.). (2001). *Tool materials*. ASM International.
- Dieter, G. E., & Bacon, D. (1986). *Mechanical metallurgy* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Krauss, G. (2015). *Steels: Processing, structure, and performance* (2nd ed.). ASM International.
- Lee, S.-I., Kang, J.-Y., & Hwang, B. (2016). Influence of Nb addition and transformation temperature on impact properties of low-carbon steels. *Korean Journal of Materials Research*, 26(11), 590–597. <https://doi.org/10.3740/MRSK.2016.26.11.590>
- Lucon, E., & Santoyo, R. (2017). Impact toughness modification of NIST low-energy Charpy verification specimens for testing at room temperature. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 122, Article 23. <https://doi.org/10.6028/jres.122.023>
- Meyers, M. A., & Chawla, K. K. (2009). *Mechanical behavior of materials* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Shin, S. Y., Hwang, B., Lee, S., Kim, Y. M., Lee, S., & Kim, N. J. (2007). Correlation of microstructure and Charpy impact properties in API X70 and X80 line-pipe steels. *Materials Science and Engineering: A*, 458(1–2), 281–289. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.012>
- Smith, W. F., & Hashemi, J. (2011). *Foundations of materials science and engineering* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Surdia, T., & Saito, S. (2019). *Pengetahuan bahan teknik*. Pradnya Paramita.
- Wu, S.-W., Yang, J., & Cao, G.-M. (2021). Prediction of the Charpy V-notch impact energy of low carbon steel using a shallow neural network and deep learning. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 28(8), 1309–1320. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2168-z>