

ANALISIS KEGAGALAN MATERIAL PATAHNYA COIL SPRING PADA TRACK ADJUSTER EXCAVATOR PC 78

Leo Adi Saputra¹, Nugroho Santoso¹✉, Lilik Dwi Setyana¹, Budi Basuki¹

¹ Departmen Teknik Mesin, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 55281, Indonesia
✉nugroho.santoso20@ugm.ac.id

Received 12 August 2024, Revised 11 February 2025, Accepted 17 February 2025

ABSTRAK

Salah satu komponen penting dari *undercarriage excavator* adalah *coil spring*, yang sering patah akibat kondisi medan kerja yang ekstrem, kurangnya perawatan rutin, dan cacat bahan. Patahnya *coil spring* ini sering terjadi pada unit *excavator* PC 78. Penanganan kasus ini membutuhkan jangka waktu yang tidak dapat ditentukan. Permasalahan tersebut dapat menyebabkan produktivitas dari *excavator* menurun dan tidak maksimal. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi penyebab patahan pada *coil spring*, mengevaluasi kekuatan mekanis serta menentukan jenis material yang digunakan. Metode yang digunakan meliputi pengujian komposisi kimia, struktur mikro, kekerasan, dan *impact*. Hasil pengamatan visual menunjukkan bahwa patahan *coil spring* disebabkan oleh kelelahan material, adanya inisiasi retakan, perambatan, hingga patahan akhir berupa *beachmark* dan striasi. Analisis komposisi kimia mengungkapkan dominasi unsur besi (Fe), karbon (C), kromium (Cr), dan Mangan (Mn), sehingga dapat diklasifikasikan sebagai baja AISI 51xx. Pengujian struktur mikro menunjukkan dominasi bainit yang berkontribusi terhadap kekerasan material. Pengujian kekerasan metode *vickers* menunjukkan nilai kekerasan yang tinggi, yang sesuai struktur mikro. Pengujian dampak yang dilakukan menunjukkan patahan spesimen cenderung ulet.

Kata Kunci: *Excavator*, *Coil spring*, kegagalan material

1. PENDAHULUAN

Excavator adalah alat berat yang multi fungsi, hanya dengan mengganti *attachment* pada *excavator*, *excavator* sudah dapat digunakan dengan fungsi yang berbeda dan dapat digunakan dalam berbagai bidang seperti pertambangan, infrastruktur bahkan perkebunan. *Excavator* dapat digunakan diberbagai medan kerja, bahkan medan kerja ekstrem dan berlumpur sekalipun. Komponen *excavator* terbagi menjadi tiga bagian utama yaitu *upperstructure*, *undercarriage*, dan *attachment*. Salah satu kerusakan yang sering terjadi dan membutuhkan

biaya tinggi dalam perbaikannya adalah kerusakan pada komponen *undercarriage excavator*. *Undercarriage excavator* merupakan komponen yang berfungsi untuk menopang beban kerja pada unit alat berat. Salah satu komponen *undercarriage* yang berperan penting dalam memberikan kenyamanan dan keselamatan terhadap operator alat berat adalah pegas[1]. Terdapat beberapa tipe pegas yang umum dipakai, diantaranya adalah pegas ulir (*coil spring*), pegas daun (*leaf spring*), dan pegas puntir (*torsion bar spring*). Sedangkan untuk pegas pada komponen alat berat jenis *excavator* adalah 2 pegas *coil spring* yang terdapat pada bagian kanan dan kiri *undercarriage*.

Coil spring berperan penting dalam menyerap dan mempertahankan beban yang terjadi karena perbedaan medan kerja yang tidak merata dan bergelombang. *Coil spring* pada *excavator* juga berfungsi untuk menahan getaran *undercarriage* sehingga getaran tidak sampai ke kabin operator [2]. Jika terjadi suatu patahan pada *coil spring* tentu saja kenyamanan dan keamanan operator sangat terganggu. Banyak faktor yang mempengaruhi patahnya *coil spring* diantaranya yaitu medan kerja yang terlalu ekstrem, kurangnya perawatan rutin, serta adanya kecacatan pada material pada *coil spring*. Salah satu unit *excavator* yang umum digunakan dalam berbagai pekerjaan adalah *excavator* PC 78. Pada kasus ini terdapat *excavator* PC 78 mengalami masalah yaitu terjadinya patahan pada material *coil spring*.

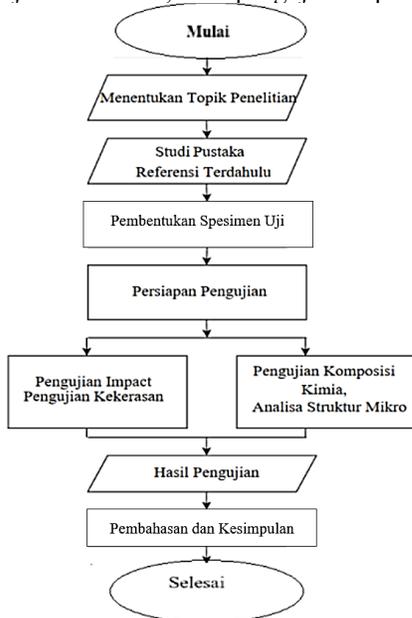
Penelitian yang dilakukan Ridho mengenai Analisis Kegagalan Material Patahnya Recoil Spring Undercarriage Hydraulic Excavator Komatsu PC200-7 mengidentifikasi penyebab patahnya recoil spring pada excavator Komatsu PC200-7. Beberapa faktor yang dapat menyebabkan patahnya recoil spring antara lain lingkungan kerja, cacat material, kurangnya perawatan, dan kesalahan dalam pengoperasian. Metode yang digunakan meliputi pengujian komposisi kimia, analisis struktur mikro, uji kekerasan, dan uji dampak [3]. Selain itu Ulya et al., melakukan analisis kegagalan pada komponen boom excavator tipe liebherr R9250. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui mekanisme kegagalan pada boom excavator

Liebherr R9250. Metode yang digunakan meliputi pengamatan visual, pengujian komposisi kimia, analisis struktur mikro, dan uji kekerasan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kegagalan disebabkan oleh faktor material dan beban kerja yang berlebihan [4].

Penanganan patahnya *coil spring* pada unit *excavator* membutuhkan jangka waktu yang tidak dapat ditentukan. Hal ini disebabkan terbatasnya ketersediaan *manpower* dalam menangani unit yang terdapat kerusakan. Permasalahan tersebutlah yang dapat menyebabkan produktivitas dari *excavator* menurun dan tidak maksimal. Untuk mengetahui secara pasti penyebab terjadinya patah pada *coil spring* perlu dilakukan serangkaian pengujian pada material *coil spring*. Penelitian yang dapat dilakukan untuk mengidentifikasi penyebab terjadinya patah pada *coil spring* antara lain pengamatan visual serta foto makro, uji dampak, uji kekerasan, analisis struktur mikro, dan dilakukan analisis komposisi kimia. Hasil dari serangkaian penelitian yang telah dilakukan dapat digunakan perusahaan untuk menjadi suatu acuan dan improvisasi dalam perawatan yang akan diterapkan kedepannya.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Langkah pertama yang dilaksanakan adalah menentukan topik penelitian yang akan dilaksanakan. Tahap selanjutnya yang dapat dilakukan adalah mencari tinjauan pustaka serta studi pustaka untuk mengetahui penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya serta digunakan untuk mengetahui dasar teori yang akan digunakan dalam penelitian. Tahap penelitian selanjutnya adalah dapat melaksanakan persiapan pengujian, tahap ini dapat dilakukan dapat berupa mempersiapkan alat dan bahan yang akan digunakan, mempersiapkan bahan pengujian berupa membentuk spesimen uji. Melaksanakan pengujian yang telah ditentukan seperti pengujian komposisi kimia, pengujian struktur mikro, pengujian kekerasan, serta pengujian dampak.



Gambar 1. Diagram Alir

Penelitian menggunakan beberapa pengujian diantaranya yaitu:

1. Pengujian Komposisi Kimia.

Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui komposisi penyusun yang terdapat didalam material uji. Pengujian komposisi kimia dilakukan menggunakan alat uji *spectrometer*. Dalam pengujiannya harus dipastikan bahwa permukaan material yang di uji harus rata dan bersih. Pastikan juga permukaan yang akan diuji tidak memiliki lapisan seperti anti karat dan lapisan lain.

Alat *spectrometer* akan menembakan sinar yang kemudian akan membentuk sebuah tanda titik pada permukaan, kemudian pantulan akan ditangkap oleh alat *spectrometer*, dari pantulan tersebut alat *spectrometer* akan mengidentifikasi unsur-unsur penyusun dari material. Hasil dari pengujian komposisi kimia akan ditampilkan di monitor komputer. Berdasarkan hasil pengujian komposisi kimia suatu logam, kita dapat menentukan jenis dari baja/logam yang kita uji dengan melihat unsur-unsur yang terkandung didalam spesimen uji tersebut.

2. Analisa Struktur Mikro.

Pengujian struktur mikro yang dilakukan menggunakan alat *metalurgical microscope*. Spesimen yang diuji melewati beberapa proses seperti dilakukannya pengamplasan secara bertahap untuk menghasilkan permukaan yang rata dan halus pada spesimen uji. Proses pengamplasan harus dilakukan dengan perlahan hingga goresan pada permukaan spesimen menghilang. Spesimen yang telah dilakukan pengamplasan hingga benar-benar halus kemudian dilakukan polis menggunakan autosol dan kain beludru hingga mengkilap. Permukaan yang mengkilap tersebut kemudian kita celupkan menggunakan cairan esta lalu kita keringkan, Campuran cairan kimia untuk logam baja dapat menggunakan HNO₃ sekitar 2,5% [5]. setelah itu struktur mikro dapat kita amati menggunakan *metalurgical microscope*.

3. Pengujian Kekerasan.

Pengujian kekerasan yang dilakukan adalah pengujian kekerasan menggunakan alat *hardness tester* dengan menggunakan metode *vickers*. Persiapan pengujian yang dilakukan dengan melakukan pembentukan dan meratakan spesimen. Sebelum melakukan pengujian disarankan untuk melakukan dilakukannya perataan dan pengamplasan pada permukaan spesimen terlebih dahulu untuk mendapatkan hasil dari indentor yang dapat dilihat jelas oleh pantulan cahaya alat *hardness tester*.

4. Pengujian Impact.

Menurut ASTM (*American Standard Testing and Material*) pada pengujian *impact* terdapat tiga jenis takik (*notch*) yaitu takikan tipe A (*V-notch*), takikan tipe B (*key hole notch*), dan takikan tipe C [6]. Pengujian *impact* yang dilakukan adalah pengujian *impact* menggunakan metode *charpy* dengan *V-notch* yang umum digunakan di Amerika Serikat [7]. Spesimen uji dibentuk sesuai dengan standar. Pengujian menggunakan sebanyak 3 spesimen uji *impact* untuk mengetahui ketangguhan material dari beban kejut. Prinsip dari pengujian *impact* adalah memberikan beban kejut pada spesimen, kemudian alat akan mencatat sejumlah energi yang dibutuhkan untuk membuat

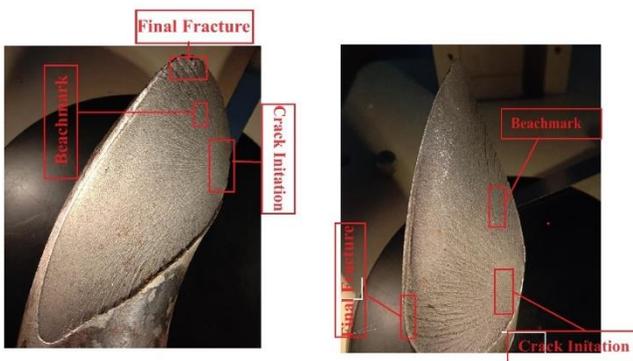
suatu spesimen patah. Beban kejut yang dihasilkan dari alat *impact tester* adalah berasal dari palu penghantam yang telah posisikan diatas. Lakukan pemosisian spesimen tepat ditengah alat, supaya palu penghantam dari *impact tester* tepat mengenai takik dari spesimen. Tepat ketika palu penghantam *impact* mengenai spesimen dan mematahkannya maka *impact tester* akan mencatat energi yang dibutuhkan untuk membuat spesimen tersebut patah.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pengamatan Visual

Pengamatan visual bertujuan untuk menemukan dan menentukan area awal terjadinya patahan (*crack initiation*), arah perambatan retak (*crack propagation*), dan akhir terjadinya patahan (*final fracture*). Pengamatan visual yang dilakukan bertujuan untuk dapat mengetahui bentuk serta arah rambatan patahan yang terjadi pada coil spring excavator [8].

Patahan yang terjadi sebagaimana terlihat Gambar 2 material *coil spring* adalah patah lelah atau *fatigue*. *Fatigue* adalah perubahan struktural progresif, terlokalisasi, dan permanen yang terjadi pada suatu material yang mengalami pengulangan atau regangan yang berfluktuasi pada tegangan nominal yang mempunyai nilai maksimum kurang dari hasil statis kekuatan material [9]. Patah lelah terjadi dapat diakibatkan oleh pembebanan yang berfluktuasi terhadap waktu, sehingga pada kondisi ini tegangan yang terjadi lebih kecil daripada kekuatan luluh dari material [8]. Berdasarkan gambar 2 dapat dilihat bahwa terdapat *beachmark* dan *striations* pada permukaan patahan. Insiasi patahan atau *crack initiation* pada material dapat dilihat dengan memiliki bentuk melingkar diikuti oleh perambatan retak yang menyebar luas dengan bentuk *beachmarks* yang terdapat pada permukaan patahan material. Patahan yang terjadi akibat kelelahan material sangatlah berbahaya karena sering terjadi secara tiba-tiba dan tanpa peringatan [8].



Gambar 2. Pengamatan Visual

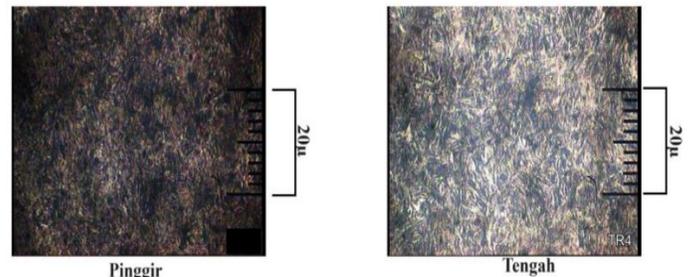
2. Hasil Uji Komposisi Kimia.

Berdasarkan hasil dari pengujian komposisi kimia yang dilakukan mendapatkan hasil berupa unsur penyusun komponen coil spring dengan unsur besi (Fe) dan unsur karbon (C) mendapatkan presentase terbesar. Hasil pengujian menunjukkan

kandungan unsur karbon (C) memiliki presentase sebesar 0.647%, dan kandungan unsur besi (Fe) memiliki presentase sebesar 97.19%. Selain unsur besi (Fe) dan karbon (C), coil spring juga memiliki unsur-unsur paduan lainnya seperti Silikon (Si), Mangan (Mn), Fosfor (P), Aluminium (Al), Nikel (Ni), dan unsur-unsur penyusun lainnya.

Berdasarkan kandungan unsur karbonnya yang mencapai 0.647%. maka *coil spring excavator* PC 78 termasuk dalam klasifikasi baja karbon tinggi (*high carbon steel*), dimana baja karbon tinggi memiliki kandungan karbon sekitar 0.6%-1.4% . Material dengan kadar karbon tersebut akan memiliki sifat kekuatan tarik tinggi dan ketahanan aus yang baik. Unsur kromium (Cr) yang mencapai presentase kandungan 1.036% menjadikan komponen *coil spring* semakin memiliki mampu keras yang tinggi karena unsur kromium (Cr) dapat membentuk suatu karbida. Berdasarkan kandungan unsur kromium (Cr) yang dimiliki pada *coil spring* material tersebut termasuk dalam klasifikasi *chromium steels*. *Chromium steels* merupakan suatu baja paduan yang memiliki unsur chromium mencapai 0.80%-1.05%. Paduan krom yang terdapat pada material tersebut akan meningkatkan kekerasan, ketahanan aus, ketahanan oksidasi, dan ketahanan korosi. Hasil pengujian komposisi yang dilakukan dapat diperkirakan bahan *coil spring* tersebut adalah SAE 6150, AISI 5160, atau JIS SUP10.

3. Hasil Uji Pengamatan Struktur Mikro.



Gambar 3. Analisis Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro yang dilakukan menggunakan alat *metalurgical microscope* dengan menggunakan pembesaran 500X. Hasil pengujian struktur mikro yang dapat dilihat pada gambar 3 dapat dilihat kandungan struktur mikro yang terdapat pada material *coil spring* yang di uji adalah struktur mikro berupa bainit. Bainit merupakan mikro struktur yang terbentuk ketika proses transformasi fase yang terjadi ketika austenit didinginkan secara isothermal ke suhu tertentu dibawah temperatur eutektik (250°-500°). Struktur mikro bainit terbentuk dalam dua jenis yaitu *upper bainit* dan juga *lower bainit* [8]. Berdasarkan hasil analisa struktur mikro, dapat dilihat perbedaan struktur yang terdapat pada titik spesimen pinggir dan tengah. Titik spesimen bagian pinggir cenderung memiliki lapisan sementit yang halus dan rapat yang mengakibatkan warna permukaan dari struktur mikro cenderung memiliki warna serta kontras yang gelap. Titik spesimen bagian tengah cenderung memiliki lapisan sementit yang renggang dan dapat mengakibatkan kontras dari permukaan struktur mikro saat diamati menggunakan *microscope* lebih terang.

4. Hasil Uji Kekerasan.

Pengujian kekerasan yang dilakukan menggunakan metode *vickers* dengan indentor berbentuk diamond dengan sudut 136°. Hasil pengujian kekerasan yang dilakukan disajikan pada Tabel 1.

Hasil dari pengujian kekerasan yang dilakukan pada 5 titik permukaan *coil spring* mendapatkan hasil yang berbeda-beda dengan nilai kekerasan tertinggi mencapai 475,308 VHN dan nilai kekerasan terendah mencapai 410,574 VHN. Nilai kekerasan yang cukup tinggi dapat dihubungkan dengan hasil analisa struktur mikro yang mempunyai kandungan bainit yang dominan secara merata. Kandungan komposisi kimia juga berpengaruh terhadap kekerasan seperti unsur karbon (C) dan juga unsur *chromium* (Cr). Unsur karbon dan unsur *chromium* dapat membentuk suatu karbida yang mampu meningkatkan sifat kekerasan material.

Tabel 1. Hasil Pengujian Kekerasan

Titik Penekanan	d1 (mm)	d2 (mm)	Nilai kekerasan (VHN)
1	0.39	0.40	475,308
2	0.4	0.42	441,165
3	0.4	0.42	441,165
4	0.41	0.43	420,408
5	0.43	0.42	410, 574
Kekerasan rata-rata			437,721

Titik pengujian nomor 1 merupakan titik pengujian kekerasan yang berada pada bagian paling tepi dari permukaan uji, dengan jarak tepi berkisar 2 mm. Titik pengujian yang memiliki kekerasan paling rendah adalah titik pengujian nomor 5, dimana titik nomor 5 adalah titik pengujian yang dilakukan pada bagian tengah spesimen uji. Berdasarkan hasil pengujian kekerasan tersebut dapat dikaitkan dengan analisis struktur mikro yang sudah dilakukan. Analisis struktur mikro pada bagian pinggir permukaan cenderung memiliki bainit dengan lapisan yang halus serta rapat dan cenderung berwarna gelap, hal ini sudah sesuai ketika hasil kekerasan pada permukaan bagian nomor 1 memiliki nilai kekerasan tertinggi. Struktur mikro bagian tengah memiliki bainit dengan lapisan yang renggang dan memiliki kontras yang 33 lebih terang, jika dikaitkan dengan pengujian kekerasan maka titik nomor 5 sudah sewajarnya memiliki nilai kekerasan paling rendah.

Korelasi hubungan antara kekuatan tarik maksimum baja terhadap kekerasan Vickers (VHN) adalah $\sigma_t \approx 0.35 \times \text{VHN}$ (dalam MPa). Selanjutnya hubungan antara kekuatan luluh σ_y dan kekuatan tarik σ_t pada material baja karbon adalah $\sigma_y \approx 0.7 \times \sigma_t$ [10]. Berdasarkan korelasi tersebut, maka dapat diperkirakan kekuatan tarik terendah mencapai $\sigma_{t(\text{min})} = 0,35 \times 410,5 = 143,68$ MPa, kekuatan tarik tertinggi mencapai $\sigma_{t(\text{mak})} = 0,35 \times 475 = 166,25$ MPa. Selanjutnya berdasarkan kekuatan tarik maksimum dapat diperkirakan kekuatan luluh terendah mencapai $\sigma_{y(\text{min})} = 0.7 \times 143,68 = 100,58$ Mpa dan kekuatan luluh tertinggi mencapai $\sigma_{y(\text{mak})} = 0.7 \times 166,25 = 116,38$ MPa.

5. Hasil Uji Impak.

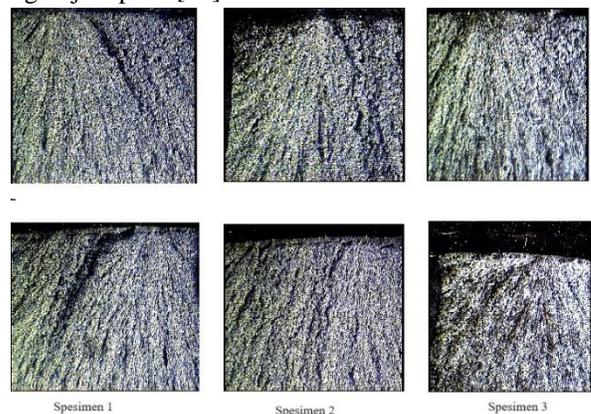
Pengujian material dilakukan dengan menggunakan mesin impact tester menggunakan metode *charpy*, menggunakan alat berupa *impact tester*. Hasil pengujian impact yang dilakukan disajikan pada Tabel 2.

Berdasarkan hasil dari pengujian *impact* yang dilakukan penulis, pengujian *impact* yang dilakukan menggunakan tiga spesimen impact dengan material yang sama. Hasil yang didapatkan dari ketiga pengujian *impact* tersebut membutuhkan energi untuk mematahkan spesimen impact masing-masing 22 joule, 25 joule, dan 20 joule. Berdasarkan energi yang diserap tersebut maka nilai *impact* yang dihasilkan berdasar dari pengujian, masing-masing adalah 0.275 Joule/mm², 0.312 Joule/mm², 0.25 Joule/mm². Berdasarkan hasil tersebut maka dapat diketahui bahwa material dari *coil spring* memiliki ketahanan terhadap beban kejut yang tinggi. Hal ini ditunjukkan dengan besarnya energi yang dapat diserap oleh material tersebut yaitu selisih antara energi awal dan energi akhir setelah impact.

Tabel 2. Hasil Pengujian *Impact*

Keterangan	Spesimen 1	Spesimen 2	Spesimen 3
Panjang	55 mm	55 mm	55 mm
Lebar	10 mm	10 mm	10 mm
Tinggi	10 mm	10 mm	10 mm
Suhu Ruangan Pengujian	30°	30°	30°
Tinggi Bawah Takik	8 mm	8 mm	8 mm
Energi Awal	300 Joule	300 Joule	300 Joule
Energi Terbaca	22 Joule	25 Joule	20 Joule
Luas Patahan	80 mm ²	80 mm ²	80 mm ²
Nilai Impact	0.275 Joule/mm ²	0.312 Joule /mm ²	0.25 Joule/mm ²

Hasil patahan yang terjadi akibat pengujian impact yang dilakukan dapat dilihat gambar 4. Berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa jenis patahan yang terjadi adalah patahan berserat. Patahan berserat merupakan salah satu ciri-ciri patahan material yang bersifat ulet. Patahan berserat dapat ditandai dengan patahan yang relatif berwarna gelap dan menyerap cahaya, selain itu terdapat serat-serat patahan yang terdapat pada permukaan yang terjadi patah[10].



Gambar 4. Hasil Foto Makro Patahan Impact

Hasil nilai impact dan hasil patahan dari pengujian impact dapat dipengaruhi oleh komposisi kimia pada *coil spring* yang memiliki kandungan mangan. Kandungan mangan pada baja mempengaruhi terhadap sifat mekanik berupa menambah kekerasan serta keuletan pada baja. Pengaruh tersebut mengakibatkan baja pada *coil spring* memiliki kekerasan untuk menahan kelelahan dan juga keuletan untuk fleksibilitas yang cukup.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan, maka dapat disimpulkan beberapa kesimpulan, antara lain:

1. Patahan yang terjadi pada material *coil spring excavator* PC 78 merupakan patah leleh pada material.
2. Struktur mikro yang terdapat pada *coil spring excavator* PC 78 didominasi oleh bainit. Kekerasan yang dihasilkan pada permukaan rata-rata mencapai 437,721 VHN. Berdasarkan nilai kekerasan yang dimiliki nilai kekuatan tarik material mencapai 143,68 - 166,25 Mpa dan kekuatan luluh material mencapai 100,58 - 116,38 MPa.
3. Energi rata-rata yang terserap dan diperlukan untuk mematahkan spesimen pada pengujian impact adalah sekitar 22.33 Joule, dengan nilai impact rata-rata sekitar 0.279 Joule/mm². Baja AISI 51xx pada umumnya memiliki kekuatan impact berkisar 0,125 Joule/mm² hingga 0,312 Joule/mm². Bentuk patahan yang dihasilkan dari pengujian impact merupakan patahan berserat yang menunjukkan bahwa patahan material merupakan patahan ulet.
4. Material *coil spring excavator* PC 78 tersusun dari berbagai unsur seperti unsur besi (Fe), karbon (C), kromium (Cr), mangan (Mn), silikon (Si), fosfor (P), molibdenom (Mo), dan unsur paduan lainnya. Kandungan karbon (C) pada material *coil spring excavator* PC 78 adalah sebesar 0.647%. Selain kandungan unsur karbon, *coil spring excavator* juga mengandung unsur paduan lain, unsur selain karbon (C) yang memiliki presentase lebih dari 1% adalah kromium (Cr). Berdasarkan hal tersebut spesimen *coil spring* yang diuji merupakan baja paduan rendah (*low alloy steels*). Unsur paduan lain yang dominan pada

material *coil spring* adalah unsur kromium (Cr). Unsur kromium mencapai presentase 1,036%. Berdasarkan kandungan unsur kromium (Cr) maka material *coil spring* dapat diklasifikasikan termasuk baja AISI 51xx.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan kali ini penulis menyampaikan banyak terimakasih kepada semua pihak yang telah memberikan bimbingan dan juga dorongan semangat, terutama kepada kedua orang tua, saudara, dosen pembimbing, dan semua teman-teman Departemen Teknik Mesin SV UGM, serta teman-teman lain penulis. Terimakasih atas segala bantuan, waktu dan energi yang telah diberikan kepada penulis dalam pembuatan jurnal ini.

REFERENSI

- [1] S. F. Rostiyanti, *Alat Berat Untuk Proyek Konstruksi*, 2nd ed. Rineka Cipta, 2008.
- [2] P. Purwanto, M. H. Wagino, A. Arif, and T. Sugiarto, *Teknologi Pada Sistem Alat Berat*. UNP PRESS, 2020.
- [3] Ridho Purwanto dan Suryo Darmo, "Skripsi Analisis Kegagalan Material Patahnya Recoil Spring Undercarriage Hydraulic Excavator Komatsu PC200-7," Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2018.
- [4] U. R. Fikri, S. Nugroho, and Y. Umardani, "Analisis Kegagalan pada Komponen Boom Excavator Tipe Liebherr R9250."
- [5] G. F. Vander Voort, *Metallography, Principle and Practice*. ASM International, 1999.
- [6] E. Budiyanto and S. D. Handono, *Pengujian Material*. Lampung: CV. Laduny Alifatama, 2020.
- [7] Samnur and B. Anwar, *Pengujian Bahan Teknik*. Yogyakarta: Deeeepublish, 2022.
- [8] W. D. Callister and D. G. Retwisch, *Materials Science and Engineering An Introduction*, 10th ed. John Wiley & Sons, 2018.
- [9] ASM Handbook, *Fatigue and Fracture*, vol. 19. ASM International Handbook Committee, 1996.
- [10] T. Surdia and S. Saito, *Pengetahuan Bahan Teknik*, vol. 4. Jakarta: PT. Pradnya Paramita, 1999.