



SELARAS

KEAUSAN LOGAM

**Agus Suprpto, Darto,
Ike Widyastuti, Dewi Izzatus T.**

Agus Suprpto – Darto
Ike Widyastuti – Dewi Izzatus Tsamroh

KEAUSAN LOGAM



SELARAS

KEAUSAN LOGAM

- **Agus Suprpto**
- **Darto**
- **Ike Widyastuti**
- **Dewi Izzatus Tsamroh**

Tata Letak Isi dan Desain Sampul
Much. Imam Bisri

Penerbit :

SELARAS MEDIA KREASINDO

Anggota IKAPI JTI No 165

Perum Pesona Griya Asri A-11

Malang 65154

e-mail: selarasmediak@gmail.com

Cetakan 1, Oktober 2022

Jumlah: xii + 74

Ukuran 15,5 x 23 cm

Perpustakaan Nasional: Katalog Dalam Terbitan (KDT)

ISBN: **978-623-6980-68-2**

Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang.

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian
atau seluruh isi buku tanpa seizin tertulis dari penerbit.

PRAKATA

Dengan mengucapkan puji syukur kehadirat Allah swt yang telah memberikan Rahmat dan Hidayahnya sehingga kami dapat menyelesaikan penulisan buku dengan judul “KEAUSAN LOGAM”

Kami ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu pelaksanaan penulisan buku ini sehingga dapat diselesaikan dengan lancar.

Buku ini disusun berdasarkan hasil penelitian penulis terkait dengan dampak *cryogenic treatment* dan *temper* terhadap kekerasan dan keausan pada pada pahat bubut serta dampak *carburizing dan cryogenic treatment* pada gear.

Dalam penyusunan ini penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dan jauh dari kesempurnaan, untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang sifatnya membangun dari semua pihak demi kesempurnaan buku ini.

Semoga buku ini bermanfaat bagi industri dan kalangan akademisi untuk pengembangan pengetahuan.

Malang, September 2022
ttd

Penulis

DAFTAR ISI

Prakata	iii
Daftar Isi	v
Daftar Tabel	vii
Daftar Gambar	ix
PENDAHULUAN	1
RUMUSAN MASALAH.....	9
PEMBAHASAN.....	11
~ Hasil penelitian pahat karbida.....	11
~ Keausan Pahat.....	19
~ Keausan Hasil MDI (<i>Martemper Ductile Iron</i>).....	32
~ Hasil penelitian <i>carburizing dan cryogenic treatment</i>	37
~ Hasil penelitian sprocket/ gear depan sepeda motor.....	42
~ Hasil Penelitian Roda Gigi Lurus.....	58
~ Laju keausan roda gigi lurus dengan variasi beban.....	59
~ Laju keausan roda gigi lurus variasi putaran	60
KESIMPULAN	63
Daftar Pustaka.....	67
Biografi Penulis	71

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	<i>Optical micrographs</i> pada <i>flank surface</i> dan <i>rake surface</i> pada sampel pahat karbida tanpa dan dengan <i>cryogenic treatment, soaking</i> pada variasi 2 jam, 24 jam dan 48 jam, dilanjutkan proses pembubutan dengan $V_c = 70$ m/min, $f: 0.1$ mm/putaran, $a = 0.10$ mm, pada benda kerja Aluminium T-6061	13
Tabel 2.	<i>Optical micrographs</i> pada <i>flank surface</i> dan <i>rake surface</i> pada sampel pahat karbida tanpa dan dengan <i>cryogenic treatment, soaking</i> dengan variasi 2 jam, 24 jam dan 48 jam + <i>temper</i> dilanjutkan proses pembubutan dengan $V_c = 70$ m/min, $f = 0.1$ mm/putaran, $a = 0.10$ mm, pada benda kerja Aluminium T- 6061.	14
Tabel 3.	<i>Optical micrographs</i> pada <i>flank surface</i> dan <i>rake surface</i> pada sampel pahat karbida tanpa dan dengan <i>cryogenic treatment, soaking</i> bervariasi 2 jam, 24 jam dan 48 jam, dilanjutkan proses pembubutan dengan $V_c: 70$ m/min, $f: 0.1$ mm/putaran, $a: 0.5$ mm, pada benda kerja aluminium T- 6061	15
Tabel 4.	<i>Optical micrographs</i> pada <i>flank surface</i> dan <i>rake surface</i> pada sampel pahat karbida tanpa dan dengan <i>cryogenic treatment</i> dan <i>soaking</i> dengan variasi 2 jam, 24 jam dan 48 jam + <i>temper</i> dilanjutkan proses pembubutan dengan $V_c: 70$ m/min, $f = 0.1$ mm/putaran, $a = 0.5$ mm, pada benda kerja Aluminium T- 6061...	17
Tabel 5.	<i>Optical micrographs</i> pada <i>flank surface</i> dan <i>rake surface</i> pada sampel pahat karbida tanpa dan dengan <i>cryogenic treatment, soaking</i> bervariasi 2 jam, 24 jam dan 48 jam, dilanjutkan proses pembubutan dengan $V_c = 70$ m/min, $f = 0.1$ mm/putaran, $a = 1.0$ mm, pada benda kerja Aluminium T- 6061	18

Tabel 6.	<i>Optical micrographs</i> pada <i>flank surface</i> dan <i>rake surface</i> pada sampel pahat karbida tanpa dan dengan <i>cryogenic treatment</i> , <i>soaking</i> dengan variasi 2 jam, 24 jam dan 48 jam, dan <i>cryogenic treatment + temper</i> dilanjutkan proses pembubutan dengan $V_c = 70$ m/min, $f = 0.1$ mm/putaran, $a = 1.0$ mm, pada benda kerja Aluminium T- 6061	20
Tabel 7.	<i>Optical micrographs</i> pada <i>flank surface</i> dan <i>rake surface</i> pada sampel pahat ADI tanpa dan dengan <i>cryogenic treatment</i> , dan <i>soaking</i> dengan variasi 2 jam, 24 jam dan 48 jam, dilanjutkan proses pembubutan dengan $V_c = 70$ mm/min, $f = 0.1$ mm/putaran, pada benda kerja Aluminium T- 6061 dengan kedalaman potong $a : 0,1$ mm, $0,5$ mm dan 1 mm.....	21
Tabel 8.	Keausan tepi pahat, V_B dengan <i>tool life</i> , T dan persamaan Taylor pada berbagai kondisi dengan gerak makan $f = 0,1$ mm/putaran kecepatan potong $V_c = 70$ m/menit	24
Tabel 9.	Hasil uji keras pahat ADI tanpa dan dengan <i>cryogenic treatment</i> dan <i>cryogenic treatment + temper</i>	26
Tabel 10.	Kekerasan hasil proses <i>Martemper Ductile Iron</i> (MDI) pada media air hangat dengan variasi <i>temperature</i> dan <i>holding time</i> 60 s dan <i>cryogenic treatment</i> serta <i>temper</i>	28
Tabel 11.	Ketahanan aus hasil proses MDI pada media air hangat dengan variasi <i>temperature</i> dan <i>holding time</i> $t = 60$ detik dan <i>cryogenic treatment</i> serta <i>temper</i>	32
Tabel 12.	Kekerasan hasil <i>carburizing</i> dan <i>cryogenic treatment</i>	37
Tabel 13.	Foto keausan <i>gear</i> depan hasil survey pada sepeda motor	42
Tabel 14.	Foto keausan <i>gear</i> depan hasil survey pada sepeda motor	53
Tabel 15.	Tabel ketebalan lapisan hasil <i>Case Hardening</i>	56

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Keausan tepi pahat V_b dengan variasi kedalaman potong dengan berbagai kondisi pada proses pembubutan $V_c = 70$ m/menit, f 0.1 mm/put dan $t_c = 6$ menit	12
Gambar 2.	Keausan tepi pahat, V_b dengan berbagai kondisi pada kedalaman potong yang bervariasi dengan kecepatan potong V_c dan gerak makan f konstan pada sampel pahat dengan dan tanpa <i>cryogenic treatment</i> .	22
Gambar 3.	Tool life, T dengan berbagai kondisi pada kedalaman potong yang bervariasi dengan Kecepatan potong V_c dan gerak makan f konstan	25
Gambar 4.	Kekerasan hasil proses MDI pada <i>temperature</i> media air hangat 400 °C dengan <i>holding time</i> $t = 60$ detik dilanjutkan dengan proses <i>cryogenic treatment</i> dengan variasi <i>soaking</i> pada nitrogen cair 2 jam, 24 jam dan 48 jam	28
Gambar 5.	Kekerasan hasil proses <i>cryogenic treatment</i> dilanjutkan dengan proses <i>temper</i> 150°C selama 1 jam	29
Gambar 6.	Kekerasan hasil proses MDI pada <i>temperature</i> media air hangat 600 °C dengan <i>holding time</i> $t = 60$ second dilanjutkan dengan proses <i>cryogenic treatment</i> dengan variasi <i>soaking</i> pada nitrogen cair 2 jam, 24 jam dan 48 jam	29
Gambar 7.	Kekerasan hasil proses <i>cryogenic treatment</i> dilanjutkan dengan proses <i>temper</i> 150°C selama 1 jam.....	30

Gambar 8.	Kekerasan hasil proses MDI pada <i>temperature</i> media air hangat 800°C dengan <i>holding time</i> t = 60 second dilanjutkan dengan proses <i>cryogenic treatment</i> dengan variasi <i>soaking</i> pada nitrogen cair 2 jam, 24 jam dan 48 jam	30
Gambar 9.	Kekerasan hasil proses <i>cryogenic treatment</i> dilanjutkan dengan proses temper 150°C selama 1 jam.....	31
Gambar 10.	Ketahanan aus hasil proses MDI pada <i>temperature</i> media air hangat 40°C dengan <i>holding time</i> t = 60 second dilanjutkan dengan proses <i>cryogenic treatment</i> dengan variasi <i>soaking</i> pada nitrogen cair 2 jam, 24 jam dan 48 jam.....	33
Gambar 11.	Ketahanan aus hasil proses <i>cryogenic treatment</i> dilanjutkan dengan proses temper 150 °C selama 1 jam	33
Gambar 12.	Ketahanan aus hasil proses MDI pada <i>temperature</i> media air hangat 60°C dengan <i>holding time</i> t = 60 second dilanjutkan dengan proses <i>cryogenic treatment</i> dengan variasi <i>soaking</i> pada nitrogen cair 2 jam, 24 jam dan 48 jam.....	34
Gambar 13.	Ketahanan aus hasil proses <i>cryogenic treatment</i> dilanjutkan dengan proses temper 150 °C selama 1 jam	34
Gambar 14.	Ketahanan aus hasil proses MDI pada <i>temperature</i> media air hangat 80°C dengan <i>holding time</i> t = 60 second dilanjutkan dengan proses <i>cryogenic treatment</i> dengan variasi <i>soaking</i> pada nitrogen cair 2 jam, 24 jam dan 48 jam.....	35
Gambar 15.	Ketahanan aus hasil proses <i>cryogenic treatment</i> dilanjutkan dengan proses temper 150 °C selama 1 jam	35
Gambar 16.	Kekerasan hasil <i>carburizing</i> pada <i>temperature</i> 800 °C, 850 °C dan 900 °C dengan <i>holding time</i> 1 jam, 2 jam dan 3 jam.....	38

Gambar 17. Kekerasan hasil *cryogenic treatment* dengan variasi *soaking* 2 jam, 24 jam dan 48 jam setelah di *carburizing* pada *temperature* 800 °C dengan *holding time* 1 jam, 2 jam dan 3 jam 38

Gambar 18. Kekerasan hasil *cryogenic treatment* dengan variasi *soaking* 2 jam, 24 jam dan 48 jam setelah di *carburizing* pada *temperature* 850 °C dengan *holding time* 1 jam, 2 jam dan 3 jam 39

Gambar 19. Kekerasan hasil *cryogenic treatment* dengan variasi *soaking* 2 jam, 24 jam dan 48 jam setelah di *carburizing* pada *temperature* 900 °C dengan *holding time* 1 jam, 2 jam dan 3 jam 39

Gambar 20. *Sprocket/ gear* depan sepeda motor, B. Gigi *sprocket* yang sudah dipotong sebagai spesimen uji 50

Gambar 21. ~~Foto~~ ~~kanonik~~ ~~original~~ ~~depa~~ ~~spesimen~~ ~~4n~~

Gambar 22. ~~Foto~~ ~~kanonik~~ ~~KW1~~ ~~di~~ ~~pa~~ ~~spesimen~~ ~~4n~~

Gambar 23. ~~Foto~~ ~~kanonik~~ ~~KW2~~ ~~di~~ ~~pa~~ ~~spesimen~~ ~~6n~~

Gambar 24.

1

PENDAHULUAN

Dalam suatu proses pemotongan logam khususnya pada proses pembubutan, gesekan yang terjadi antara pahat dengan benda kerja akan menimbulkan panas yang tinggi, sehingga akan mempercepat terjadinya keausan pahat, hal ini berdampak pada pertumbuhan kekasaran permukaan semakin tinggi dan umur pahat semakin pendek serta kualitas produk semakin rendah. Pada umumnya untuk mengatasi masalah keausan pahat menggunakan cairan pendingin pada proses pemotongan logam dengan tujuan untuk mengurangi gesekan atau menggunakan pelapisan pada pahat. Dewasa ini banyak industri mengembangkan penggunaan *cryogenic treatment* (perlakuan dengan media nitrogen cair) untuk memperbaiki ketahanan aus (Thamizhmanii, S. et al, 2011; Ramji B.R. et al, 2010; Kollmer K.P, 2007; Sudjtmiko dan Agus S., 2011).

Hasil penelitian yang dilakukan (Sudjatmiko dan Agus S., 2011), menentukan umur dan keausan pahat karbida untuk membubut Al T-6061, dengan metoda analitis dan grafik diperoleh nilai eksponen n umur pahat ($n=0.3$) dan konstanta umur pahat (CT) = 112,5723, pada kecepatan potong tinggi (optimum) $[V_c] = 69,12$ m/menit, dengan waktu terpendek (t_c) = 12 menit, dengan kedalaman makan (a) = 0,70 mm, persamaan umur pahat Taylor VT 0.3 = 112,5723.

Penelitian yang dilakukan bahan yang berbeda oleh (Amber Pawlik, et al, 2004) menunjukkan untuk setiap pahat karbida dan material benda kerja yang digunakan baja AISI 1148 untuk mendapatkan data umur dan kondisi pemesian, variabel proses pemesian dengan putaran spindel yang divariasikan menjadi 3 tingkatan dengan gerak potong (f) dan kedalaman potong (a) konstan, persamaan rumus Taylor dari penelitian diperoleh VT 02574 = 521,4.

Begitu juga penelitian yang dilakukan oleh (Budiman, H dan Richard, 2007), menunjukkan umur dan keausan pahat karbida untuk membubut baja paduan ASSAB 760, dengan kecepatan potong tinggi ($V_c = 170,816$ m/menit), diperoleh umur pahat yang paling pendek 14,756 menit, dan umur paling panjang 140,33 menit yang terjadi pada kecepatan potong rendah ($V_c = 54,259$ mm/menit).

Menindak lanjuti penelitian Amber Pawlik, et al, (2004), Budiman, H dan Richard, (2007), Ramji B.R. et al, (2010), Biranchi N.S. (2011), Sudjatmiko et al, (2011), Singh, S. et al, (2012), pada penelitian ini mengevaluasi dampak *cryogenic treatment* dan *temper* terhadap karakteristik keausan pahat karbida untuk di implementasikan pada proses pembubutan material paduan Al T-6061 dengan kedalaman potong (a) divariasikan, sedangkan gerak makan (f) dan kecepatan potong (V_c) yang konstan, dalam proses pemesian ini tidak menggunakan cairan pendingin (*coolant*).

Cryogenic treatment adalah suatu proses pendinginan suatu bahan baja, stainless steel dan lain-lain dari temperatur kamar sampai de-

ngan temperatur -320°F (-196°C) kemudian pada temperatur tersebut ditahan selama waktu tertentu dan dilanjutkan dengan penghangatan sampai temperatur kamar (Singh, S. et al, 2012 dan Ramji B.R. et al, 2010). Rajendra K. et al (2007) mengklasifikasikan jenis treatment bahan dibawah temperatur kamar ada 2, yaitu *subzero* atau *cold treatment* dan *cryogenic treatment*. *Subzero treatment* dilakukan pada -145°C (-230°F) dan *cryogenic treatment* dilakukan pada -195°C di nitrogen cair.

A Suprpto, et al (2014) menunjukkan dampak *cryogenic treatment* dan *temper* terhadap umur pahat karbida pada pembubutan Al T-6061 terjadi peningkatan umur pahat sebesar 105% dibandingkan dengan pahat karbida tanpa perlakuan. Hal ini didukung basil penelitian oleh Suriansyah et al (2015) yang menunjukkan pengaruh *cryogenic cooling*, *martemper* and *temper treatment* pada FCD-45 terjadi kenaikan kekerasan sebesar 9 % dibanding sebelum mendapat perlakuan. Penelitian dengan bahan berbeda ditunjukkan oleh *Society of Manufacturing Engineers* (SME), 2012 menyatakan pengaruh proses *cryogenic treatment* pada material *Austemper Ductile Iron* (ADI) terhadap sifat mekanik (kekerasan HRc 41,4) terjadi peningkatan kekerasan 10,4 % dibanding dengan material ADI tanpa *cryogenic treatment* (kekerasannya HRc 37,5). Hal ini didukung hasil penelitian Yazdani S.and, Ardestani M.(2007) yang menunjukan pengaruh *sub-zero cooling* pada *Austemper Ductile Iron* (ADI) terhadap sifat kekerasannya meningkat HB 66 (19,6 %) dibanding sebelum di *treatment* kekerasannya HB 337. Chang-Yong Kang et al (2009), menunjukan pengaruh *Subzero Treatment* terhadap struktur mikro dan sifat kekerasan *Austempered Ductile Cast Iron* (ADI) terjadi perubahan yang *significant* dari austenite sisa menjadi martensit, sehingga volume fraksi martensit semakin besar dan kekerasannya semakin meningkat 18%, selain itu A Suprpto, et al (2016) juga meneliti dampak *Cryogenic Treatment* terhadap karakteristik keausan pahat ADI (*Austemper Ductile Iron*) terjadi penurunan keausan sebesar 77%. Metode Penelitian dikembangkan oleh Akinlabi Q et all (2013) melalui

Martempered Ductile Iron (MDI) dengan *Quenching* dalam air hangat diperoleh kekerasan tertinggi HRc 52,9.

Menindak lanjuti penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Chang-Yong Kang et al (2009); A Suprpto, et al (2016); dan Akinlabi Q et all (2013), dalam penelitian ini mengkombinasikan *cryogenic treatment* dengan proses *Martemper Ductile Iron* (MDI, untuk melihat pengaruh sifat kekerasan dan karakteristik keausan MDI (*Martemper Ductile Iron*), untuk itu ditindaklanjuti dengan mengganti proses *Austemper* dengan *Martemper* dilanjutkan dengan proses *cryogenic treatment* dan *temper* terhadap struktur mikro, sifat kekerasan dan karakteristik keausan MDI (*Martemper Ductile Iron*) untuk di implementasikan pada *gear*. Hasil penelitian A Suprpto, et al (2017) menunjukkan kekerasan hasil *cryogenic treatment* HRc 55.33, lebih tinggi dibanding dengan hasil *Martemper* HRc 51.33, hal ini menunjukkan ketahanan aus meningkat 83%.

Dua benda yang saling mengalami kontak dan bergerak relatif satu dengan yang lainnya akan menimbulkan gaya gesek. Gaya gesek tersebut akan menyebabkan terjadinya kerusakan berupa hilangnya material dari permukaan benda tersebut yang dinamakan keausan. Keausan terjadi pada dua benda yang mempunyai kekerasan yang lebih rendah. Faktor yang mempengaruhi keausan adalah kecepatan putaran, besarnya beban, kekasaran permukaan dan kekerasan material itu sendiri. Di samping itu juga gesekan antar roda gigi lurus juga menghasilkan panas yang sangat mempengaruhi keausan (A Suprpto, et al, 2020). Hal tersebut dalam kajian material disebutkan bahwa kekerasan material akan berkurang seiring meningkatkan temperatur permukaan. Dampak dari gesekan antara dua material bisa dikurangi dengan meningkatkan kekerasan permukaan benda.

Sampai saat ini telah banyak penelitian yang membahas tentang keausan roda gigi khususnya roda gigi lurus. Akan tetapi dalam hal ini yang sering diteliti adalah keausan setelah roda gigi mengalami keausan akibat mekanisme kerja dalam waktu dan kondisi tertentu. Berdasarkan

hal tersebut maka penelitian ini dikaitkan dengan tinjauan laju keausan roda gigi lurus dengan variasi beban dan putaran.

Pengambilan data keausan pada penelitian ini difokuskan pada perhitungan luas bercak sebagai tanda laju keausan pada roda gigi lurus akibat adanya variasi beban dan putaran dengan berbagai batasan masalah. Adapun batasan masalah tersebut adalah (1) pengujian keausan roda gigi dalam kondisi kering (tanpa pelumasan) (2) bahan dasar roda gigi lurus adalah SCM440 (3) variasi beban 0 kg, 5 kg dan 10 kg (4) variasi putaran 200 rpm, 500 rpm dan 1000 rpm (A Suprpto, et al, 2020).

Limbah tempurung kelapa banyak digunakan untuk meningkatkan nilai ekonomis tempurung kelapa dapat diproses menjadi karbon aktif. Karbon aktif dapat digunakan antara lain dalam industri obat, makanan, minuman, dan pembersih air. Karbon aktif memegang peranan yang sangat penting baik sebagai bahan baku maupun sebagai bahan pembantu pada proses industri dalam meningkatkan kualitas atau mutu produk yang dihasilkan. Karbon aktif dari tempurung kelapa dapat digunakan sebagai media pada proses *Carburizing* untuk meningkatkan kekerasan (A Suprpto, et al, 2019).

Penambahan karbon yang disebut *carburizing* atau karburasi, dilakukan dengan cara memanaskan pada temperatur yang cukup tinggi yaitu pada temperature austenit dalam lingkungan yang mengandung atom karbon aktif, diikuti perlakuan pendinginan cepat (*quenching*), sehingga diperoleh permukaan yang lebih keras. *Pack carburizing* adalah metode *carburizing* yang paling sederhana dibanding metode cair dan gas, karena dapat dilakukan dengan peralatan yang sederhana. Hasil penelitian Yahya et al (2013) pada baja karbon rendah dengan proses carburizing pada temperature 900 °C dan holding 90 menit dengan menggunakan media karbon aktif dari tempurung kelapa, kekerasannya meningkat 13,5 % dari HV 231.65 ke HV 262.85. Hasil yang serupa ditunjukkan oleh Jamal I. et al (2014) yang melakukan penelitian *Carburizing* dengan menggunakan bahan baja karbon rendah yaitu baja ST 37 dengan suhu pemanasan

950 °C dengan waktu penahanan 1 jam dan didinginkan cepat dalam air, dengan menggunakan arang tempurung kelapa dengan katalisator cangkang kerang darah (CaCO₃) 30 % memiliki kekerasan tertinggi 60 HRC, naik 45,63 %. Hasil kekerasan yang berbeda dengan temperatur 980 °C dengan waktu *carburizing* selama 2 jam. Media carburizing menggunakan 80% serbuk arang tempurung kelapa dan 20% BaCO₃ dimana prosentase dalam berat dilakukan oleh Cahyo A.Y.A (2009), diperoleh nilai kekerasan yang tertinggi pada ketebalan 20 mm sebesar 848 HV dengan kedalaman pengerasan pada 0.53 mm.

Hasil penelitian Gunawan, S dan Budi, H.S., (2015) menunjukkan Proses *pack carburizing* pada temperatur 900°C dengan media arang tempurung kelapa selama 2 jam dilanjutkan dengan *quenching* oli menghasilkan kekerasan 579 HV dan keausan specific $1,634 \times 10^{-7}$ mm²/kg pada bahan baja karbon sedang. Hal ini berbeda yang dilakukan oleh Kuswanto, B. (2010) dengan menggunakan bahan baja karbon rendah ST 37 menunjukkan terjadi peningkatan kekerasan sebesar 26% dari 146 HV menjadi 185 HV hasil *pack carburizing* pada temperatur 900 °C dengan media arang tempurung kelapa selama 2 jam dilanjutkan dengan pendinginan dalam tungku sampai temperatur 350 °C kemudian didinginkan di udara.

Menindak lanjuti penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Yahya et al (2013); A Suprpto, et al (2016); dan Suriansyah et al (2015) dalam penelitian ini mengkombinasikan karbon aktif dari limbah tempurung kelapa dipakai sebagai media pada proses *Carburizing*, dilanjutkan dengan *Cryogenic treatment* pada material baja karbon rendah, untuk melihat pengaruh sifat kekerasan (A Suprpto, et al, 2019).

Baja ST 37 adalah salah satu klasifikasi baja yang ditentukan dari nilai kekuatan tarik baja tersebut. Baja ST 37 sendiri memiliki sifat lunak karena kadar karbon rendah, dengan nilai 0,06%. Kadar karbon tersebut menghasilkan baja dengan mampu keras yang rendah. Secara praktis, baja tersebut tidak dapat diperkeras dengan cara konvensional. Untuk

KEAUSAN LOGAM

meningkatkan kekerasan pada baja tersebut, diperlukan proses untuk meningkatkan mampu kerasnya. Proses karburisasi adalah salah satu proses peningkatan kadar karbon terlarut pada baja dengan memanaskan spesimen pada lingkungan karbon, baik dalam bentuk padat, cair maupun gas. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besar pengaruh proses karburisasi pada spesimen baja (A Suprpto, et al, 2019).

2

RUMUSAN MASALAH

Dari berbagai permasalahan penelitian diatas dapat diambil suatu rumusan masalah pada penelitian ini dengan mengevaluasi dampak:

1. Hasil *cryogenic treatment* dan *temper* terhadap karakteristik pahat karbida yang digunakan untuk membubut Aluminium 6061 dibandingkan dengan pahat tanpa perlakuan.
2. Hasil *cryogenic treatment* dan *temper* terhadap karakteristik keausan dan ADI *tool life* (T), dengan menggunakan rumus Taylor $V.T_n = CT$, pada kondisi pemotongan untuk material Aluminium T-6061 dan sejauh mana peningkatan ADI *tool life* hasil *cryogenic treatment* dan *temper*.
3. Hasil proses *martemper* dengan air hangat pada *ductile iron* terhadap struktur mikro, kekerasan dan ketahanan aus pada komponen gear di industri komponen otomotif

KEAUSAN LOGAM

4. Hasil *cryogenic treatment* dan temper terhadap struktur mikro, kekerasan dan ketahanan aus MDI (*Martemper Ductile Iron*) pada komponen *gear* di industri komponen otomotif
5. Hasil proses *carburizing*, dilanjutkan *cryogenic treatment* terhadap kekerasan produk *gear* dari bahan ST 37 dibanding dengan *gear* original, kualitas 1 dan 2 tanpa perlakuan, selain hal tersebut juga pengaruh terhadap ketebalan lapisan permukaan pada *gear*.
6. Hasil karbon aktif dari limbah tempurung kelapa dipakai sebagai media pada proses *carburizing*, dilanjutkan dengan *cryogenic treatment* serta *temper* pada material baja karbon rendah, untuk melihat pengaruh sifat kekerasan dan ketahanan aus.
7. Hasil perlakuan *carburizing* terhadap kekerasan permukaan profil roda gigi lurus dibandingkan perlakuan *carburizing* dengan tambahan proses *cryogenic treatment* terhadap kekerasan profil roda gigi lurus, selain itu juga dibandingkan dengan profil roda gigi lurus tanpa perlakuan.

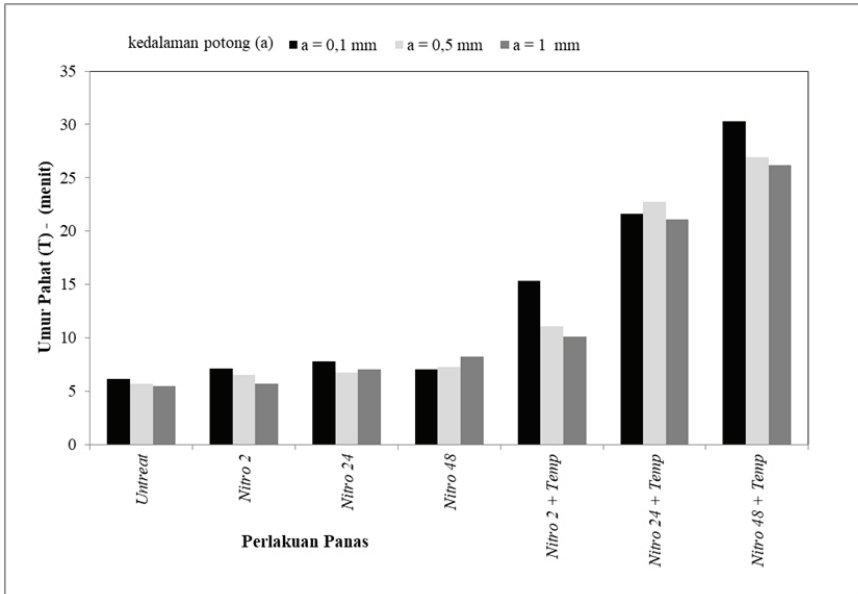
3

PEMBAHASAN

Hasil penelitian pahat karbida

Berdasarkan hasil pengujian pemakaian mata pahat pada proses pembubutan bahan Aluminium baik tanpa perlakuan maupun dengan *Cryogenic treatment* dan kombinasi proses *Cryogenic treatment* dengan *temper* dan penahanan, diperoleh data keausan tepi pahat seperti ditampilkan pada Gambar 1 berikut ini.

KEAUSAN LOGAM



































Gambar 1. Keausan tepi pahat V_b dengan variasi kedalaman potong dengan berbagai kondisi pada proses pembubutan $V_c = 70$ m/menit, $f = 0.1$ mm/put dan $t_c = 6$ menit

Berdasarkan Gambar 1. keausan tepi pahat (V_B) dengan berbagai kondisi menunjukkan bahwa semakin besar kedalaman potong (a) maka keausan tepi pahat (V_B) semakin besar. Keausan tepi pahat juga dipengaruhi oleh *cryogenic treatment* dan kombinasi proses *cryogenic treatment* dengan *temper*.

Gambar 1 juga menunjukkan pada kondisi tanpa perlakuan keausan tepi pahatnya (V_B) lebih besar dibandingkan dengan pahat yang mengalami proses *Cryogenic treatment* dengan variasi *soaking* pada kedalaman potong yang sama (a : 0,1 mm; 0,5 mm; 1 mm). Hal yang sama juga ditunjukkan pada *Cryogenic treatment* dengan variasi *soaking* (2 jam; 24 jam; 48 jam) pada kedalaman potong yang sama (a : 0,1 mm; 0,5 mm; 1 mm), keausan tepi pahatnya (V_B) lebih besar dibandingkan dengan proses *Cryogenic treatment + temper* pada temperatur 150 °C selama 1

jam. Namun untuk kondisi pahat karbida dengan *Cryogenic treatment* dengan soaking 24 jam + *temper* menunjukkan keausan tepi pahat lebih besar dibanding pada kondisi *Cryogenic Treatment* dengan *soaking* 2 jam + *temper* pada kedalaman potong 0,5 mm dan 1 mm, seharusnya lebih kecil.

Tabel 1. *Optical micrographs* pada *flank surface* dan *rake surface* pada sampel pahat karbida tanpa dan dengan *cryogenic treatment*, *soaking* pada variasi 2 jam, 24 jam dan 48 jam, dilanjutkan proses pembubutan dengan $V_c = 70$ m/min, $f: 0.1$ mm/putaran, $a = 0.10$ mm, pada benda kerja Aluminium T-6061

No	Waktu Pembubutan (detik)	Untreated		Cryogenic Treatment					
		Flank Surface	Rake Surface	Soaking 2 hour		Soaking 24 hour		Soaking 48 hour	
				Flank Surface	Rake Surface	Flank Surface	Rake Surface	Flank Surface	Rake Surface
1	90								
2	180								
3	270								
4	360								

Berdasarkan Tabel 1 hasil *optical micrograph* untuk kondisi pemotongan bahan Aluminium dengan kecepatan potong $V_c = 70$ m/menit, pemakanan $f = 0,1$ mm/putaran dan kedalaman potong $a = 0,1$ mm menunjukkan bahwa sampel tanpa *cryogenic treatment* mengalami penumpukan (*Built Up Edge/ BUE*) bahan Aluminium pada pahat karbida yang semakin tebal dengan bertambahnya waktu pemotongan 90 s/d 360 detik. BUE ini nampak sekali pada *flank surface*. Hal ini berbeda dengan sampel yang mendapat *cryogenic treatment* dengan *soaking* : 2 jam, 24 jam maupun 48 jam menunjukkan tidak terjadi BUE bahan Aluminium pada *flank surface* pahat karbida. Namun untuk sampel yang mendapat

cryogenic treatment + temper pada temperatur 150 selama 1 jam terjadi BUE bahan Aluminium dan pada *soaking* 24 jam dan 48 jam pada waktu pemotongan/pembubutan 180 detik dengan ketebalan BUE Aluminium pada pahat karbida relatif tipis (Tabel 2).

Tabel 3. menunjukkan pada kondisi pemotongan dengan kecepatan potong $V_c = 70$ m/menit, pemakanan $f = 0,1$ mm/putaran dan kedalaman potong $a = 0,5$ mm terjadi BUE Aluminium pada pahat karbida semakin tebal untuk sampel tanpa *cryogenic treatment* dengan waktu pemotongan 90 s/d 360 detik. Adapun sampel dengan *cryogenic treatment* dengan *soaking* 2 jam sudah nampak terjadi BUE Aluminium pada waktu pemotongan 180 detik dan semakin tebal BUE yang terbentuk dengan bertambahnya waktu pemotongan, hal ini berbeda untuk *cryogenic treatment* dengan *soaking* 24 jam yang baru mengalami BUE pada waktu pemotongan 270 detik. Adapun untuk *cryogenic treatment* dengan *soaking* 48 jam ada perbedaan mekanisme terbentuknya BUE, pada saat waktu pemotongan 90 detik sudah nampak tebal BUE Aluminium, dengan berjalannya waktu pemotongan 270 s/d 360 detik terjadi pengelupasan Aluminium.

Tabel 2. *Optical micrographs* pada *flank surface* dan *rake surface* pada sampel pahat karbida tanpa dan dengan *cryogenic treatment*, *soaking* dengan variasi 2 jam, 24 jam dan 48 jam + *temper* dilanjutkan proses pembubutan dengan $V_c = 70$ m/min, $f = 0.1$ mm/putaran, $a = 0.10$ mm, pada benda kerja Aluminium T- 6061

No	Waktu Pembubutan (detik)	Untreated		Cryogenic Treatment					
		Flank Surface	Rake Surface	Soaking 2 hour + temper 150 OC 1 jam		Soaking 24 hour + temper 150 OC 1 jam		Soaking 48 hour + temper 150 OC 1 jam	
				Flank Surface	Rake Surface	Flank Surface	Rake Surface	Flank Surface	Rake Surface
1	90								
2	180								
3	270								
4	360								

Tabel 4 menunjukkan pada *cryogenic treatment* dengan *soaking* 2 jam + *temper* 150 selama 1 jam terjadi pengelupasan Aluminium pada pahat yang terjadi saat waktu pemotongan 180 detik, namun terjadi BUE lagi pada pahat karbida saat waktu pemotongan 360 detik. Mekanisme terjadinya penumpukan dan pengelupasan bahan Aluminium pada pahat karbida juga terjadi pada pendinginan nitrogen *cryogenic treatment* dengan *soaking* 24 jam + *temper* 150 selama 1 jam, BUE bahan Aluminium semakin tebal dibanding dengan yang *soaking* 2 jam + *temper* dan pengelupasan bahan Aluminium pada waktu pemotongan 270 detik dan terjadi lagi BUE pada waktu pemotongan 360 detik. *Cryogenic treatment* dengan *soaking* 48 jam + *temper* 150 selama 1 jam menunjukkan BUE Aluminium pada waktu pemotongan 90 detik dan terjadi pengelupasan Al pada waktu pemotongan 180 detik, kemudian terbentuk BUE Aluminium lagi pada waktu 270 detik dan mengelupas lagi pada waktu 360 detik.

Tabel 3. *Optical micrographs* pada *flank surface* dan *rake surface* pada sampel pahat karbida tanpa dan dengan *cryogenic treatment*, *soaking* bervariasi 2 jam, 24 jam dan 48 jam, dilanjutkan proses pembubutan dengan Vc: 70 m/min, f: 0.1 mm/putaran, a: 0.5 mm, pada benda kerja aluminium T- 6061

No	Waktu Pembubutan (detik)	Untreated		Cryogenic Treatment					
		Flank Surface	Rake Surface	Soaking 2 hour		Soaking 24 hour		Soaking 48 hour	
				Flank Surface	Rake Surface	Flank Surface	Rake Surface	Flank Surface	Rake Surface
1	90								
2	180								
3	270								
4	360								

Pada sampel tanpa *cryogenic treatment* untuk kondisi pemotongan yang semakin besar kedalaman potongnya $a = 1$ mm (lihat Tabel 5), menunjukkan BUE Aluminium pada pahat semakin tebal dibandingkan dengan kedalaman potong $a = 0,1$ mm (lihat Tabel 1) dan $a = 0,5$ mm (lihat Tabel 3). Kondisi pemotongan $a = 1$ mm dengan bertambahnya waktu pemotongan 90 s/d 360 detik pada sampel tanpa perlakuan menunjukkan pengurangan BUE Aluminium pada *flank surface* pahat (lihat Tabel 5). Hal ini kebalikannya pada sampel dengan *cryogenic treatment* dengan *soaking* 2 jam, semakin bertambah waktu pemotongan 90 s/d 360 detik menunjukkan BUE Aluminium pada pahat semakin tebal (lihat Tabel 5). Hal ini berbeda dengan sampel pada *cryogenic treatment* dengan *soaking* 24 jam menunjukkan terjadinya siklus penumpukan Aluminium yang cukup tebal pada waktu pemotongan 90 detik dan mengelupas pada saat 180 detik, kemudian terjadi BUE Aluminium lagi pada waktu 270 detik dan mengelupas lagi pada waktu 360 detik. Siklus semacam ini juga terjadi pada sampel *cryogenic treatment* dengan *soaking* 48 jam yang menunjukkan mekanisme terjadinya BUE Aluminium pada waktu pemotongan s/d 180 detik dan terjadi pengelupasan pada saat 270 detik, kemudian terjadi BUE Aluminium lagi pada waktu 360 detik (lihat Tabel 5).

Tabel 4. *Optical micrographs* pada *flank surface* dan *rake surface* pada sampel pahat karbida tanpa dan dengan *cryogenic treatment* dan *soaking* dengan variasi 2 jam, 24 jam dan 48 jam + *temper* dilanjutkan proses pembubutan dengan V_c : 70 m/min, $f = 0.1$ mm/putaran, $a = 0.5$ mm, pada benda kerja Aluminium T- 6061

No	Waktu Pembubutan (detik)	Untreated		Cryogenic Treatment					
		Flank Surface	Rake Surface	Soaking 2 hour + temper 150 OC 1 jam		Soaking 24 hour + temper 150 OC 1 jam		Soaking 48 hour + temper 150 OC 1 jam	
				Flank Surface	Rake Surface	Flank Surface	Rake Surface	Flank Surface	Rake Surface
1	90								
2	180								
3	270								
4	360								

Tabel 6. untuk sampel *cryogenic treatment* dengan *soaking* 2 jam + *temper* 150 selama 1 jam, mulai terjadi BUE Aluminium yang cukup tebal pada saat pemotongan 180 detik, kemudian mengelupas pada waktu 270 detik. Hal ini berbeda dengan sampel pada *cryogenic treatment* dengan *soaking* 24 jam + *temper* temperatur 150 selama 1 jam, menunjukkan BUE yang cukup besar terjadi waktu pemotongan 90 detik dan penumpukan ini bertahan sampai 270 detik, kemudian mengelupas pada waktu 360 detik. Sampel pada *cryogenic treatment* dengan *soaking* 48 jam + *temper* 150 selama 1 jam, mulai terjadi BUE Aluminium yang cukup tebal pada saat pemotongan 270 detik dan mengelupas pada saat pemotongan 360 detik.

Tabel 5. *Optical micrographs* pada *flank surface* dan *rake surface* pada sampel pahat karbida tanpa dan dengan *cryogenic treatment*, *soaking* bervariasi 2 jam, 24 jam dan 48 jam, dilanjutkan proses pembubutan dengan $V_c = 70$ m/min, $f = 0.1$ mm/putaran, $a = 1.0$ mm, pada benda kerja Aluminium T- 6061

No	Waktu Pembubutan (detik)	Untreated		Cryogenic Treatment					
		Flank Surface	Rake Surface	Soaking 2 hour		Soaking 24 hour		Soaking 48 hour	
				Flank Surface	Rake Surface	Flank Surface	Rake Surface	Flank Surface	Rake Surface
1	90								
2	180								
3	270								
4	360								

Tabel 6. untuk sampel pada *cryogenic treatment* dengan *soaking* 2 jam + *temper* 150°C selama 1 jam, mulai terjadi BUE Aluminium yang cukup tebal pada saat pemotongan 180 detik, kemudian mengelupas pada waktu 270 detik. Hal ini berbeda pada sampel *cryogenic treatment* dengan *soaking* 24 jam + *temper* pada temperatur 150°C selama 1 jam, menunjukkan BUE yang cukup besar terjadi pada waktu pemotongan 90 detik dan penumpukan ini bertahan sampai 270 detik, kemudian mengelupas pada waktu 360 detik. Sampel pada *cryogenic treatment* dengan *soaking* 48 jam + *temper* 150°C selama 1 jam, mulai terjadi BUE Aluminium yang cukup tebal pada saat pemotongan 270 detik dan mengelupas pada saat pemotongan 360 detik.

Keausan pada *rake surface* semakin parah dengan bertambahnya waktu pemotongan (lihat Tabel 1 s/d 6). Pada kondisi kecepatan potong $V_c = 70$ m/menit dengan gerak makan $f = 0,1$ mm/putaran, dan kedalaman potong $a = 1$ mm, sampel hasil *cryogenic treatment* menunjukkan keausan

tepi pahatnya semakin kecil dibanding tanpa perlakuan. Hal ini menunjukkan bahwa sampel yang mendapat *cryogenic treatment* mengalami peningkatan ketahanan aus pahat yang digunakan untuk membubut Aluminium 6061. Hasil ini mirip dengan penelitian yang dilakukan oleh Ramji B.R. et al, (2010), yang mana hasilnya menunjukkan bahwa *cryogenic treatment* pada *carbide inserts* yang digunakan untuk membubut besi cor kelabu mengalami peningkatan ketahanan aus sebesar 31%. Begitu juga dengan penelitian yang dilakukan oleh Thamizhmanii S., et al (2011), *cemented carbide tools* yang dilapisi melalui metode *physical vapour deposition* (PVD) digunakan untuk membubut bahan *Inconel 718* dengan kecepatan dan gerak makan yang tinggi, pahat yang mendapat *cryogenic treatment* memiliki usia pakai yang lebih panjang dibandingkan dengan pahat tanpa perlakuan.

Tepi pahat karbida yang digunakan untuk membubut Aluminium 6061 hasil *cryogenic treatment + temper* memiliki keausan yang lebih kecil dibandingkan dengan sampel yang hanya mendapatkan *cryogenic treatment*. Hal ini menunjukkan bahwa pada keadaan yang sama, maka pahat dengan *cryogenic treatment + temper* memiliki ketahanan aus yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel yang hanya mendapatkan *cryogenic treatment*. Hasil ini hampir sama dengan penelitian yang dilakukan oleh Rupinder Singh, and Kamaljit Singh (2010), yang menunjukkan proses pembubutan *crank shaft* dengan pahat karbida pada kecepatan potong Vc 250 m/menit, umur pahat karbida meningkat 22,2 % setelah mendapat *cryogenic treatment + temper*.

Keausan Pahat

Dalam prakteknya, umur pahat tidak hanya dipengaruhi oleh geometri pahat saja melainkan juga dipengaruhi oleh semua faktor yang berkaitan dengan proses pemesinan, antara lain jenis material benda kerja dan pahat, kondisi pemotongan (kecepatan potong, kedalaman potong,

dan gerak makan), cairan pendingin dan jenis proses pemesinan (Rochim, T, 2007).

Tabel 6. *Optical micrographs* pada *flank surface* dan *rake surface* pada sampel pahat karbida tanpa dan dengan *cryogenic treatment*, *soaking* dengan variasi 2 jam, 24 jam dan 48 jam, dan *cryogenic treatment + temper* dilanjutkan proses pembubutan dengan $V_c = 70$ m/min, $f = 0.1$ mm/putaran, $a = 1.0$ mm, pada benda kerja Aluminium T- 6061

No	Waktu Pembubutan (detik)	Untreated		Cryogenic Treatment					
		Flank Surface	Rake Surface	Soaking 2 hour + temper 150 OC 1 jam		Soaking 24 hour + temper 150 OC 1 jam		Soaking 48 hour + temper 150 OC 1 jam	
				Flank Surface	Rake Surface	Flank Surface	Rake Surface	Flank Surface	Rake Surface
1	90								
2	180								
3	270								
4	360								

Keausan pahat akan tumbuh dan semakin membesar seiring dengan bertambahnya waktu pemotongan sampai pada suatu saat pahat tersebut dianggap tidak dapat digunakan lagi. Keausan merupakan faktor yang menentukan umur pahat, maka pertumbuhannya perlu ditinjau dengan memperhatikan faktor utama/dominan.

Berdasarkan Tabel 7, dapat diketahui hasil *optical micrograph* untuk kondisi pemotongan bahan Aluminium dengan kecepatan potong $V_c = 70$ m/menit, dan pemakanan $f = 0,1$ mm/putaran menunjukkan bahwa sampel tanpa *cryogenic treatment* mengalami BUE bahan Aluminium pada pahat ADI (*Austemper Ductile Iron*) yang semakin tebal dengan semakin besarnya kedalaman potong $a : 0,1$ mm ; $0,5$ mm dan $1,0$ mm. BUE ini nampak sekali pada *flank surface*. Hal ini didukung hasil penelitian Agus Suprpto et al (2014) yang menunjukkan bahwa sampel dengan

cryogenic treatment mengalami BUE pada pahat karbida. Untuk sampel yang mendapat *cryogenic treatment* dengan *soaking* selama 2 jam, 24 jam maupun 48 jam nampak muncul BUE bahan Aluminium pada *flank surface* pahat ADI. Namun sampel yang mendapat *cryogenic treatment* dengan *soaking* yang lebih lama, maka BUE bahan Aluminium yang muncul pada *flank surface* pahat ADI semakin tipis. Keausan pada *rake surface* semakin parah dengan bertambahnya kedalaman potong (lihat Tabel 7)

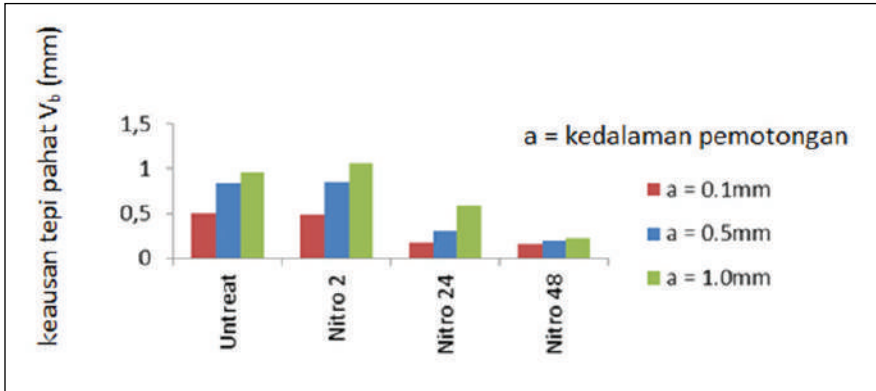
Tabel 7. *Optical micrographs* pada *flank surface* dan *rake surface* pada sampel pahat ADI tanpa dan dengan *cryogenic treatment*, dan *soaking* dengan variasi 2 jam, 24 jam dan 48 jam, dilanjutkan proses pembubutan dengan $V_C = 70$ mm/min, $f = 0.1$ mm/putaran, pada benda kerja Aluminium T- 6061 dengan kedalaman potong a: 0,1 mm, 0,5 mm dan 1 mm.

No	Waktu Pembubutan (detik)	Untreated		Soaking 2 hour		Soaking 24 hour		Soaking 48 hour	
		Flank Surface	Rake Surface	Flank Surface	Rake Surface	Flank Surface	Rake Surface	Flank Surface	Rake Surface
1	0.1								
2	0.5								
3	1.0								

Berdasarkan hasil pengujian pemakaian mata pahat pada proses pembubutan bahan Aluminium baik tanpa dan dengan *cryogenic treatment* diperoleh data keausan tepi pahat seperti ditampilkan pada Gambar 2.

Berdasarkan Gambar 2. keausan tepi pahat (VB) dengan berbagai kondisi menunjukkan bahwa semakin besar kedalaman potong (a) maka keausan tepi pahat (VB) semakin besar. Keausan tepi pahat juga dipengaruhi oleh *cryogenic treatment*. Gambar 2 juga menunjukkan pada kondisi tanpa *cryogenic treatment*, keausan tepi pahatnya (VB) lebih besar dibandingkan dengan pahat yang mengalami *cryogenic treatment* dengan berbagai variasi durasi *soaking* pada kedalaman potong yang sama a: 0,1 mm; 0,5 mm dan 1 mm. Namun untuk kedalaman potong a: 1 mm memiliki VB yang lebih besar pada kondisi pahat yang mendapat

cryogenic treatment dengan *soaking* 2 jam dibanding dengan sampel tanpa *cryogenic treatment*, yang mana hasilnya lebih kecil.



Gambar 2. Keausan tepi pahat, V_b dengan berbagai kondisi pada kedalaman potong yang bervariasi dengan kecepatan potong V_c dan gerak makan f konstan pada sampel pahat dengan dan tanpa *cryogenic treatment*.

Pada kondisi kecepatan potong $V_c = 70$ m/menit dengan gerak makan $f = 0,1$ mm/putaran, dan kedalaman potong $a = 1$ mm pada sampel hasil *cryogenic treatment* menunjukkan keausan tepi pahatnya semakin kecil dibanding tanpa *cryogenic treatment*. Hal ini menunjukkan, bahwa dengan *cryogenic treatment* sampel memiliki ketahanan aus yang semakin meningkat. Hasil ini mirip dengan yang dilakukan oleh Ramji B.R. et al, (2010), yang mana hasilnya menunjukkan *cryogenic treatment* dapat meningkatkan ketahanan aus sebesar 31% pada *carbide inserts* yang digunakan untuk membubut besi cor kelabu. Begitu juga yang dilakukan oleh Thamizhmanii S., et al (2011), yang mana usia pakai *cemented carbide tools* dengan *cryogenic treatment* yang digunakan untuk membubut bahan *Inconel 718* lebih panjang dibandingkan dengan pahat tanpa *treatment*.

Keausan tepi pahat karbida yang digunakan untuk membubut Aluminium 6061 hasil *cryogenic treatment* + *temper* semakin kecil dibanding dengan pahat yang hanya mendapatkan *cryogenic treatment*

saja. Hal ini menunjukkan bahwa pahat hasil *cryogenic treatment + temper* memiliki ketahanan aus yang lebih tinggi dibandingkan dengan pahat hasil *cryogenic treatment* saja pada kondisi yang sama. Hasil ini mirip dengan penelitian yang dilakukan oleh Rupinder Singh, and Kamaljit Singh (2010), yang menunjukkan proses pembubutan *crank shaft* dengan pahat karbida pada kecepatan potong V_c 250 m/menit, umur pahat karbida meningkat 22,2 % setelah mendapat *cryogenic treatment + temper*.

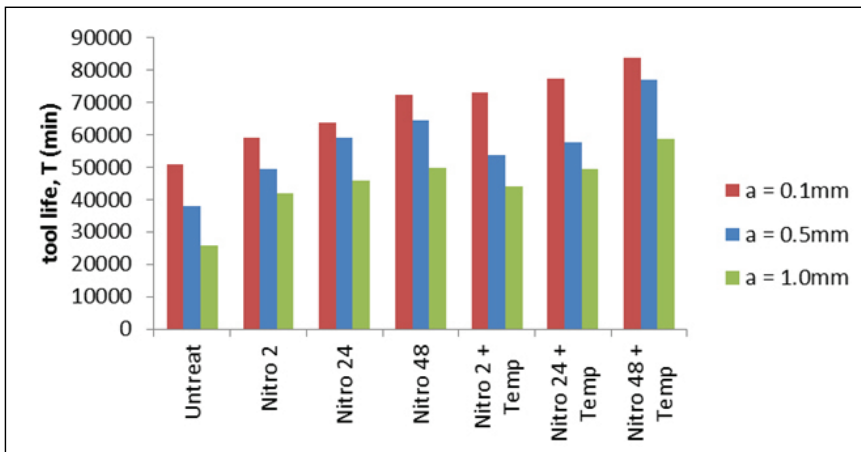
Berdasarkan Tabel 8 hubungan keausan tepi pahat, V_B dan *tool life*, T dengan berbagai kondisi menunjukkan bahwa semakin besar kedalaman potong a maka keausan tepi pahat V_B semakin besar dan *tool life* T semakin pendek. Tabel 8 menunjukkan keausan tepi pahatnya V_B pada kondisi tanpa perlakuan lebih besar dibandingkan dengan pahat yang mendapatkan *cryogenic treatment* dengan berbagai variasi *soaking* pada kedalaman potong yang sama, (a: 0,1 mm; 0,5 mm; 1 mm). Hal yang sama juga ditunjukkan pada sampel *cryogenic treatment* dengan berbagai variasi *soaking* (2 jam; 24 jam; 48 jam) pada kedalaman potong yang sama (a: 0,1 mm; 0,5 mm; 1 mm), keausan tepi pahatnya lebih besar dibandingkan dengan pahat hasil *cryogenic treatment + temper* pada temperature 150 selama 1 jam. Hal ini berlaku sebaliknya untuk *tool life* tanpa *cryogenic treatment*, dengan *cryogenic treatment* dan *cryogenic treatment + temper* (lihat Tabel 8).

KEAUSAN LOGAM

Tabel 8. Keausan tepi pahat, V_B dengan *tool life*, T dan persamaan Taylor pada berbagai kondisi dengan gerak makan $f = 0,1$ mm/putaran kecepatan potong $V_c = 70$ m/menit

Kondisi	Kedalaman potong, a (mm)	keausan tepi pahat, V_B (mm)	<i>Tool life</i> , T (mnt)	Persamaan Taylor
Tanpa perlakuan (Untreated)	0.1	0.499	50992.43	$VT^{0,100} = 152.5478$
	0.5	0.843	37831.48	$VT^{0,100} = 145.3567$
	1.0	0.957	25973.72	$VT^{0,100} = 136.7363$
Pendinginan Nitrogen dengan soaking 2 jam	0.1	0.485	59162.93	$VT^{0,098} = 151.4663$
	0.5	0.86	49362.65	$VT^{0,098} = 146.0840$
	1.0	1.065	41984.62	$VT^{0,098} = 140.4408$
Pendinginan Nitrogen dengan soaking 24 jam	0.1	0.175	63905.90	$VT^{0,080} = 125.0543$
	0.5	0.301	58996.14	$VT^{0,080} = 121.9875$
	1.0	0.592	45749.44	$VT^{0,080} = 116.7510$
Pendinginan Nitrogen dengan soaking 48 jam	0.1	0.164	72481.60	$VT^{0,072} = 115.5026$
	0.5	0.194	64588.03	$VT^{0,072} = 112.4555$
	1.0	0.223	49828.35	$VT^{0,072} = 107.8074$
Pendinginan Nitrogen dengan soaking 2 jam + temper pd 150°C selama 1 jam	0.1	0.322	73155.34	$VT^{0,087} = 136.7240$
	0.5	0.517	53782.34	$VT^{0,087} = 130.6818$
	1.0	0.597	43962.52	$VT^{0,087} = 125.4234$
Pendinginan Nitrogen dengan soaking 24 jam + temper pd 150°C selama 1 jam	0.1	0.229	77340.85	$VT^{0,079} = 125.5566$
	0.5	0.397	57520.62	$VT^{0,079} = 120.4136$
	1.0	0.499	49322.52	$VT^{0,079} = 116.1933$
Pendinginan Nitrogen dengan soaking 48 jam + temper pd 150°C selama 1 jam	0.1	0.196	83661.95	$VT^{0,070} = 114.0860$
	0.5	0.351	77018.03	$VT^{0,070} = 111.3553$
	1.0	0.378	58563.33	$VT^{0,070} = 106.7000$

Gambar 3 menunjukkan bahwa pengaruh *soaking* yang semakin lama pada proses *cryogenic treatment* maupun pada proses *cryogenic treatment + temper*, maka ADI *tool life* semakin meningkat dengan berbagai kedalaman potong, begitu sebaliknya semakin besar kedalaman potongnya, maka ADI *tool life* semakin pendek. Pahat ADI dengan *cryogenic treatment + temper*, *tool life* nya T semakin panjang (lihat Gambar 3).



Gambar 3. Tool life, T dengan berbagai kondisi pada kedalaman potong yang bervariasi dengan Kecepatan potong V_c dan gerak makan f konstan

Berdasarkan Tabel 9. menunjukkan angka kekerasan yang tertinggi yaitu 33,7 HRc pada pahat ADI yang telah mendapat *cryogenic treatment* dengan *soaking* selama 48 jam dilanjutkan dengan *temper* pada temperatur 150 selama 1 jam, jika dibandingkan dengan sampel yang mendapatkan *cryogenic treatment* dengan *soaking* yang sama tanpa *temper*, maka terdapat peningkatan kekerasan sebesar 3 %, begitu juga untuk *soaking* 24 jam terdapat peningkatan kekerasan sebesar 14 %, sedangkan untuk *soaking* 2 jam terdapat peningkatan kekerasan sebesar 30 %. Sedangkan untuk pahat ADI tanpa perlakuan angka kekerasannya hanya 23 HRc. Hal ini menunjukkan bahwa *cryogenic treatment* dengan variasi *soaking* :

KEAUSAN LOGAM

2jam dan 48 jam terdapat peningkatan kekerasan pada pahat ADI sebesar 14% dan 42%. Hal ini didukung SME (2012) yang menyatakan pengaruh proses *cryogenic treatment* pada material ADI terhadap sifat mekanik (kekerasan 41,4 HRC) terjadi peningkatan kekerasan sebesar 10,4 % dibanding dengan material ADI tanpa *cryogenic treatment* (kekerasannya 37,5 HRC). Begitu juga hasil penelitian Yazdani S.and, Ardestani M.(2007) yang menunjukkan pengaruh *sub-zero cooling* pada ADI terhadap sifat kekerasannya meningkat sebesar 66 HB (19,6 %) dibanding sebelum mendapatkan perlakuan. Chang-Yong Kang et al (2009), menunjukan pengaruh *subzero treatment* terhadap sifat kekerasan ADI yang mengalami peningkatan sebesar 18%. Dalam penelitian ini terdapat perbedaan untuk proses *cryogenic treatment* dengan tambahan proses *temper* dengan variasi *soaking*: 2jam dan 48 jam, angka kekerasannya semakin meningkat 30 % dan 47 %.

Tabel 9. Hasil uji keras pahat ADI tanpa dan dengan *cryogenic treatment* dan *cryogenic treatment + temper*.

No	Kondisi	Uji kekerasan, HRC			Kekerasan Rata-rata, HRC	
		1	2	3		
1	untreated	26	21	22	23,0	
2	treated Pendinginan pada nitrogen cair, soaking (jam)	2	25	28	26	26,3
		24	29	29	28	28,7
		48	32	33	33	32,7
3	treated Pendinginan pada nitrogen cair, soaking (jam) dan temper 150°C 1 jam	2	31	28	31	30,0
		24	32	33	33	32,7
		48	34	34	33	33,7

Kekerasan pahat ADI semakin tinggi maka ketahanan aus dan *tool life*-nya semakin panjang, hal ini ditunjukkan pada pahat ADI untuk kondisi kedalaman potong $a = 0,1$ mm, kecepatan potong $V_c = 70$ m/mnt dan gerak makan $f = 0,1$ mm/putaran yang mendapat *cryogenic treatment + temper* mempunyai keausan tepi pahat yang terkecil $V_b = 0,196$ mm (lihat Tabel 7) dengan kekerasan tertinggi 33,7 HRc (lihat Tabel 2) dan *tool life* $T = 83661,95$ menit (lihat Tabel 8).

Untuk kedalaman potong $a = 1$ mm, kecepatan potong $V_c = 70$ m/mnt dan gerak makan $f = 0,1$ mm/putaran, persamaan *tool life* Taylor tanpa perlakuan, $VT_{0,100} = 136,7363$. Persamaan *tool life* Taylor untuk kondisi *cryogenic treatment* dengan *soaking* 48 jam, $VT_{0,072} = 107,8074$. Persamaan *tool life* Taylor dengan *cryogenic treatment* dengan *soaking* 48 jam + *temper* pada temperature 150 selama 1 jam, $VT_{0,070} = 106,7000$. Untuk persamaan *tool life* Taylor $VT_n = C$ pada berbagai kondisi dapat dilihat pada Tabel 8.

Pahat ADI dengan kekerasan yang semakin tinggi maka ketahanan aus dan *tool life*-nya semakin panjang, hal ini ditunjukkan pada pahat ADI untuk kondisi kedalaman potong $a = 0,1$ mm, kecepatan potong $V_c = 70$ m/mnt dan gerak makan $f = 0,1$ mm/putaran yang mendapat *cryogenic treatment + temper* memiliki keausan tepi pahat yang terkecil $V_b = 0,196$ mm (lihat Tabel 7) dengan kekerasan tertinggi 33,7 HRc (lihat Tabel 2) dan *tool life* $T = 83661,95$ menit (lihat Tabel 8).

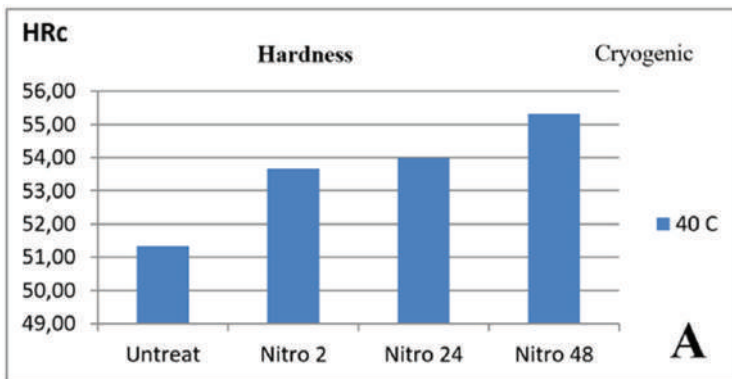
Untuk kedalaman potong $a = 1$ mm, kecepatan potong $V_c = 70$ m/mnt dan gerak makan $f = 0,1$ mm/putaran, persamaan *tool life* Taylor tanpa perlakuan, $VT_{0,100} = 136,7363$. Persamaan *tool life* Taylor untuk kondisi *cryogenic treatment* dengan *soaking* 48 jam, $V_{T0,072} = 107,8074$. Persamaan *tool life* Taylor *cryogenic treatment* dengan *soaking* 48 jam + *temper* pada temperature 150 selama 1 jam, $VT_{0,070} = 106,7000$. Untuk persamaan *tool life* Taylor $VT_n = C$ pada berbagai kondisi dapat dilihat pada Tabel 8.

KEAUSAN LOGAM

ADI *tool life* yang digunakan untuk membubut Aluminium 6061 hasil *cryogenic treatment* + *temper* mengalami peningkatan *tool life* sebesar 125%. Hasil ini jauh lebih besar dibanding dengan penelitian yang dilakukan oleh Rupinder Singh, and Kamaljit Singh (2010), yang menunjukkan proses pembubutan *crank shaft* dengan pahat karbida pada kecepatan potong V_c 250 m/menit, carbide *tool life* meningkat 22,2 % setelah mendapat *cryogenic treatment* dan *temper*. Hal ini dikarenakan bahan yang dibubut lebih keras.

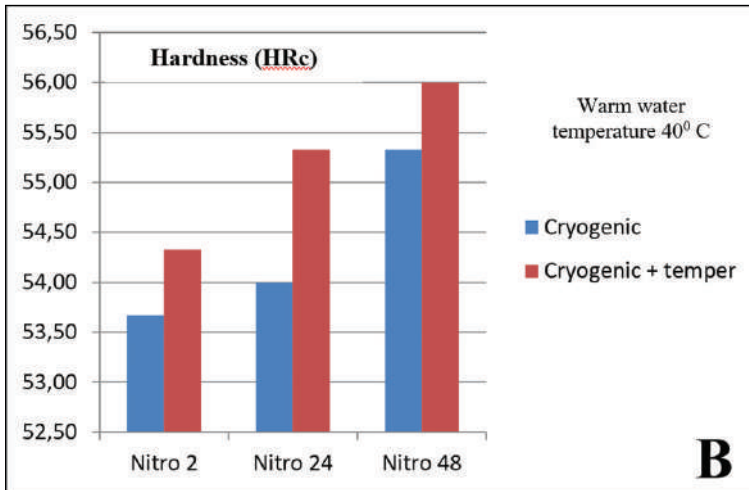
Tabel 10. Kekerasan hasil proses *Martemper Ductile Iron* (MDI) pada media air hangat dengan variasi *temperature* dan *holding time* 60 s dan *cryogenic treatment* serta *temper*

Condition	HRC		
	T 40 ⁰ C	T 60 ⁰ C	T 80 ⁰ C
Martemper (Cryogenic Untreatment)	51.33	46.67	48.33
Nitrogen 2 jam	53.67	51.67	55.33
Nitrogen 24 jam	54.00	53.33	54.67
Nitrogen 48 jam	55.33	53.33	52.67
Nitrogen 2 jam + Temper 150 ⁰ C	54.33	53.00	55.33
Nitrogen 24 jam + Temper 150 ⁰ C	55.33	54.33	53.67
Nitrogen 48 jam + Temper 150 ⁰ C	56.00	56.00	52.00

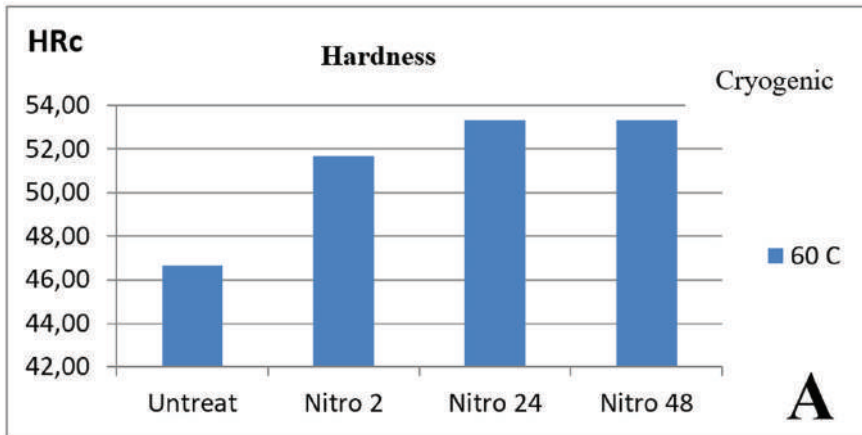


Gambar 4. Kekerasan hasil proses MDI pada *temperature* media air hangat 400 °C dengan *holding time* $t = 60$ detik dilanjutkan dengan proses *cryogenic treatment* dengan variasi *soaking* pada nitrogen cair 2 jam, 24 jam dan 48 jam

KEAUSAN LOGAM

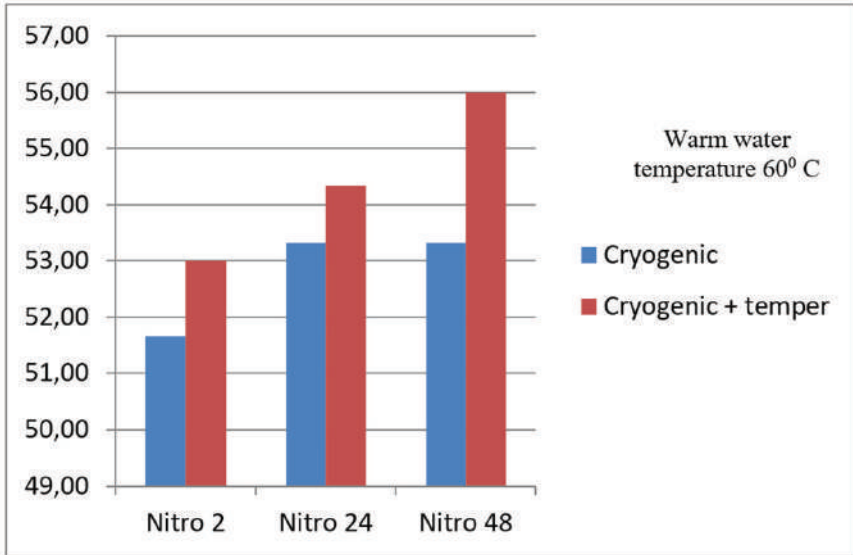


Gambar 5. Kekerasan hasil proses *cryogenic treatment* dilanjutkan dengan proses *temper* 150 selama 1 jam

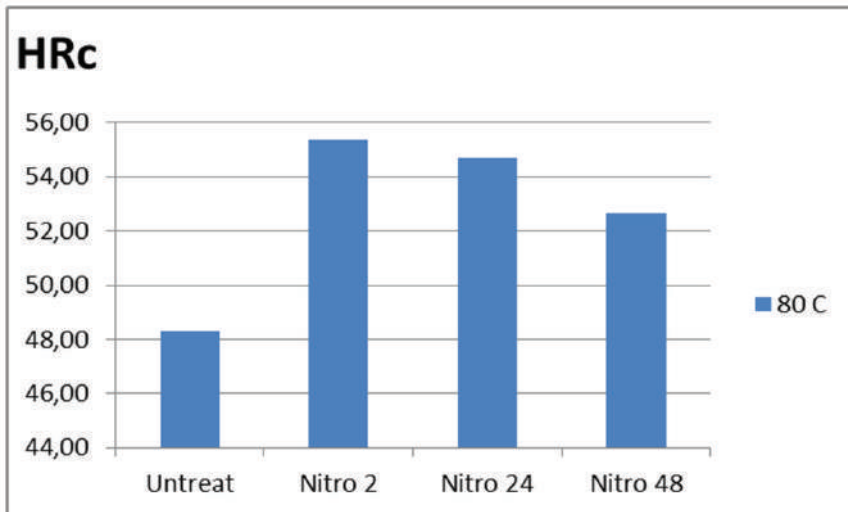


Gambar 6. Kekerasan hasil proses MDI pada *temperature* media air hangat 60^o dengan *holding time* $t = 60$ second dilanjutkan dengan proses *cryogenic treatment* dengan variasi *soaking* pada nitrogen cair 2 jam, 24 jam dan 48 jam

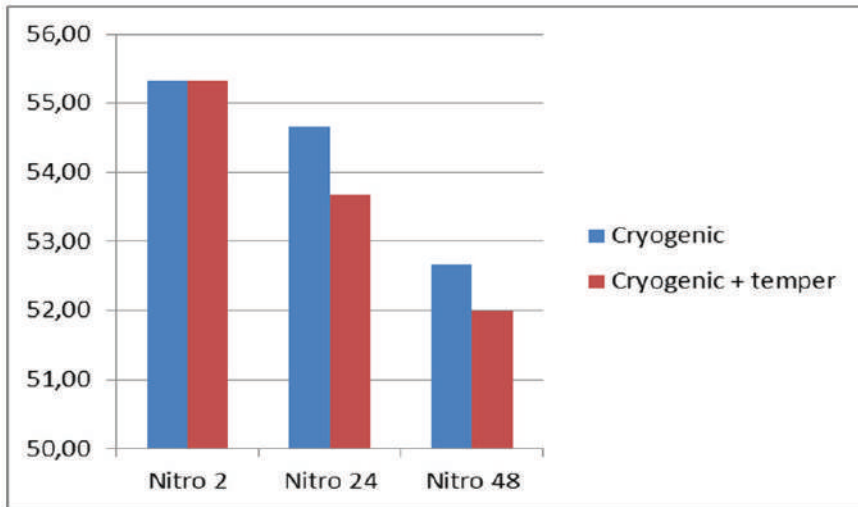
KEAUSAN LOGAM



Gambar 7. Kekerasan hasil proses *cryogenic treatment* dilanjutkan dengan proses temper 150 selama 1 jam



Gambar 8. Kekerasan hasil proses MDI pada *temperature* media air hangat 800 dengan *holding time* $t = 60$ second dilanjutkan dengan proses *cryogenic treatment* dengan variasi *soaking* pada nitrogen cair 2 jam, 24 jam dan 48 jam



Gambar 9. Kekerasan hasil proses *cryogenic treatment* dilanjutkan dengan proses temper 150°C selama 1 jam

Proses martemper menggunakan bahan FCD-45 yang memiliki kekerasan 9 HRc. Adapun hasil proses martemper pada FCD-45 dengan *quenching* pada temperatur air hangat 400 diperoleh kekerasan 51,33HRc (lihat Tabel 10). Hal ini menunjukkan hasil proses martemper pada bahan FCD 45 terjadi peningkatan kekerasan sebesar 470 % dibanding dengan tanpa perlakuan.

Bahan MDI (*Martemper ductile iron*) di proses lebih lanjut dengan *cryogenic treatment*, yaitu didinginkan dalam nitrogen cair dengan variasi *soaking* 2 jam, 24 jam dan 48 jam, kemudian diletakkan diudara sampai *temperature* kamar. Gambar 4 menunjukkan dampak *cryogenic treatment* terhadap perubahan kekerasan, yang mana semakin meningkat dibandingkan dengan hasil proses *martemper*. Hasil *cryogenic treatment* pada bahan MDI diperoleh kekerasan tertinggi sebesar 55,33 HRc (lihat Tabel 10), sehingga terjadi kenaikan kekerasan 8% dibandingkan dengan hasil proses *martemper*, dibandingkan dengan bahan FCD 45 terjadi peningkatan kekerasan sebesar 515%. Pengaruh *soaking* pada *cryogenic*

treatment semakin lama semakin meningkat kekerasannya, namun untuk proses *martemper* pada *temperature* air hangat 80 (lihat Gambar 8), yang dilanjutkan dengan proses *cryogenic treatment* mengalami penurunan kekerasan dibandingkan pada *temperature* air hangat 40 dan 60 (Gambar 4 & 8).

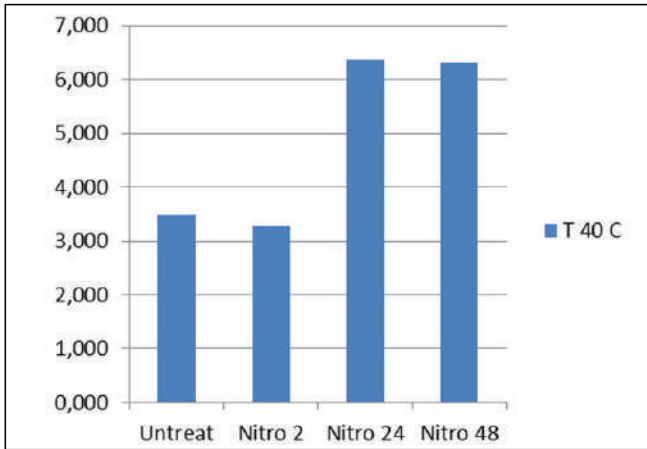
Bahan MDI pada *temperature* air hangat 40°C dan 60°C di proses lebih lanjut dengan *cryogenic treatment* + *temper* 150 selama 1 jam dan didinginkan di udara, menunjukkan terjadinya peningkatan kekerasan dibanding dengan hasil *cryogenic treatment* (lihat Tabel 10 dan Gambar 5 & 7), sedangkan Gambar 9 menunjukkan hasil *cryogenic treatment* + *temper* terjadi penurunan kekerasan dibanding dengan hasil *cryogenic treatment*, yang sebelumnya diproses *martemper* pada *temperature* air hangat 80. Dampak *soaking* semakin lama pada proses *cryogenic treatment* kekerasannya semakin meningkat, hal ini ditunjukkan pada Gambar 5 & 7. Hal ini berbeda dengan Gambar 9 yang menunjukkan semakin lama *soaking*, kekerasannya semakin menurun. Hal ini dipengaruhi oleh *temperature* air hangat 80°C pada proses *martempemnya* sudah cukup tinggi sehingga terjadi penurunan kekerasan.

Keausan Hasil MDI

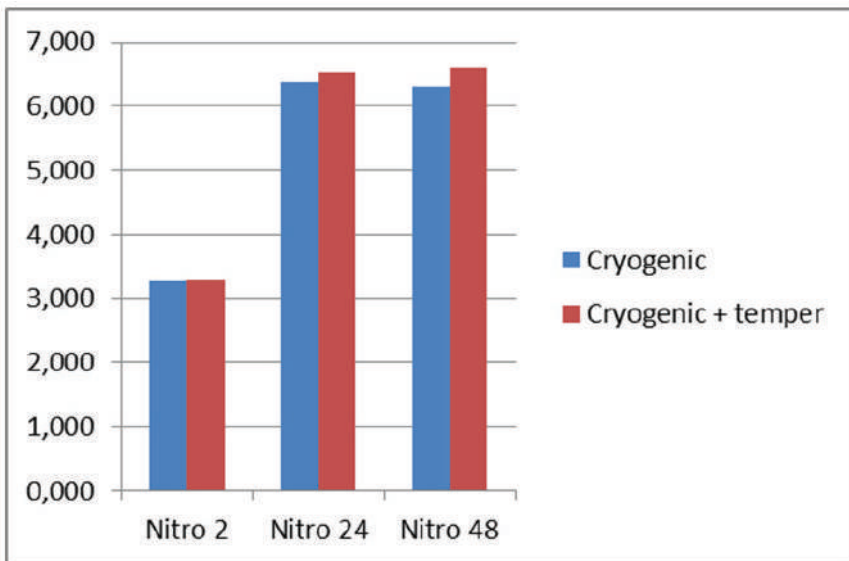
Tabel 11. Ketahanan aus hasil proses MDI pada media air hangat dengan variasi *temperature* dan *holding time* $t = 60$ detik dan *cryogenic treatment* serta *temper*

Condition	Wear resistance		
	T 40 ^o C	T 60 ^o C	T 80 ^o C
Martemper (Cryogenic Untreatment)	3.478	1.571	3.478
Nitrogen 2 hours	3.268	1.716	0.876
Nitrogen 24 hours	6.377	6.195	3.126
Nitrogen 48 hours	6.308	3.093	1.354
Nitrogen 2 hours + Temper 150 ^o C	3.301	3.299	1.320
Nitrogen 24 hours + Temper 150 ^o C	6.539	6.331	2.159
Nitrogen 48 hours + Temper 150 ^o C	6.601	6.601	1.683

KEAUSAN LOGAM

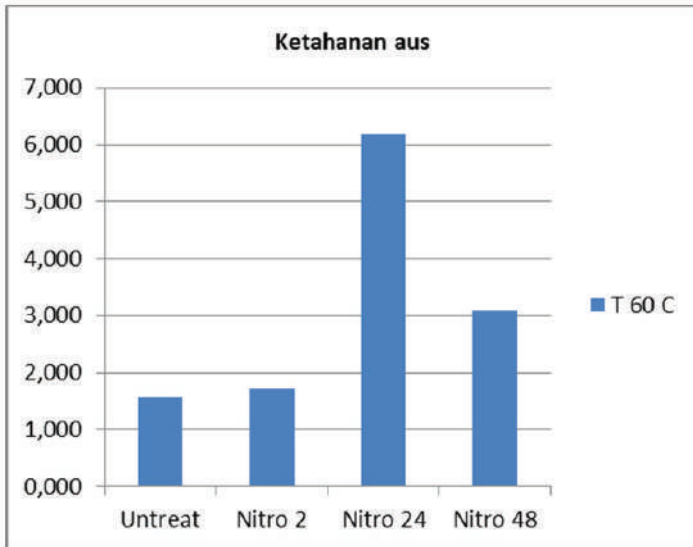


Gambar 10. Ketahanan aus hasil proses MDI pada *temperature* media air hangat 40°C dengan *holding time* $t = 60$ second dilanjutkan dengan proses *cryogenic treatment* dengan variasi *soaking* pada nitrogen cair 2 jam, 24 jam dan 48 jam

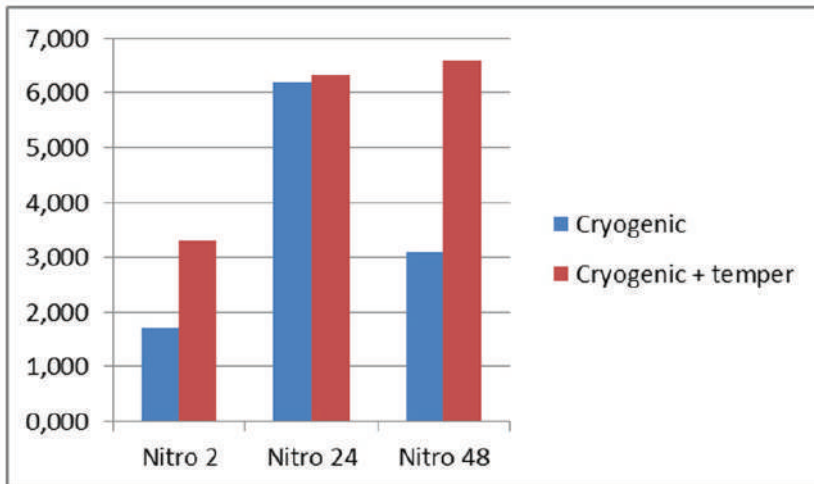


Gambar 11. Ketahanan aus hasil proses *cryogenic treatment* dilanjutkan dengan proses *temper* 150 selama 1 jam

KEAUSAN LOGAM

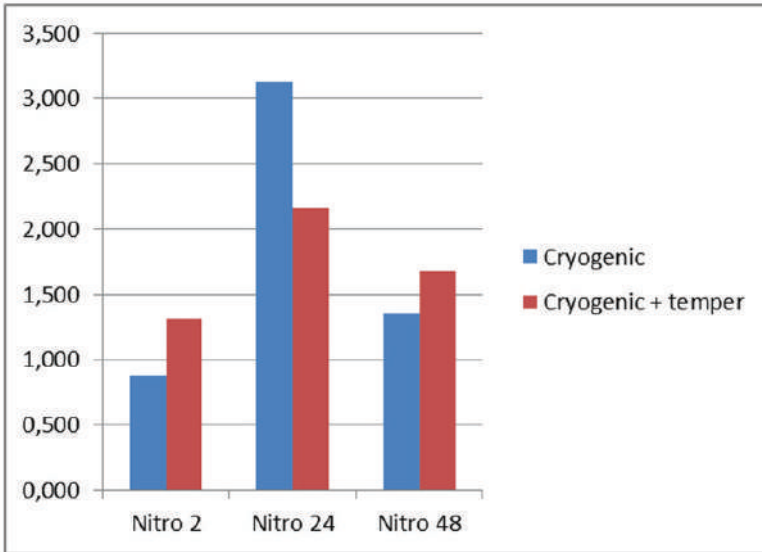


Gambar 12. Ketahanan aus hasil proses MDI pada *temperature* media air hangat 60 °C dengan *holding time* $t = 60$ second dilanjutkan dengan proses *cryogenic treatment* dengan variasi *soaking* pada nitrogen cair 2 jam, 24 jam dan 48 jam

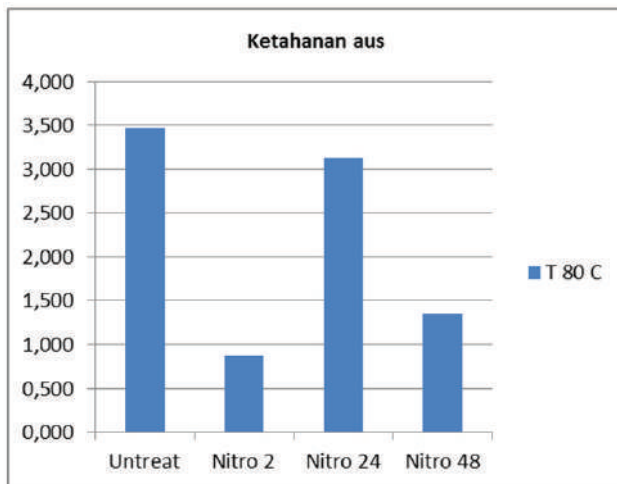


Gambar 13. Ketahanan aus hasil proses *cryogenic treatment* dilanjutkan dengan proses *temper* 150 °C selama 1 jam

KEAUSAN LOGAM



Gambar 14. Ketahanan aus hasil proses MDI pada *temperature* media air hangat 80°C dengan *holding time* $t = 60$ second dilanjutkan dengan proses *cryogenic treatment* dengan variasi *soaking* pada nitrogen cair 2 jam, 24 jam dan 48 jam



Gambar 15. Ketahanan aus hasil proses *cryogenic treatment* dilanjutkan dengan proses *temper* 150 °C selama 1 jam

Berdasarkan Tabel 11 dan Gambar 10 menunjukkan pengaruh *soaking* semakin lama (2 jam, dan 24 jam) pada proses *cryogenic treatment* yang sebelumnya mendapat proses *martemper* pada temperatur air hangat 40 dengan *holding time* $t = 60$ second ketahanan ausnya meningkat. Namun pada *soaking* 48 jam pada proses *cryogenic treatment* ketahanan ausnya sedikit menurun. Hal ini mirip dengan hasil *cryogenic treatment* dari bahan MDI pada temperatur air hangat 60°C (Gambar 12), Hal ini sangat berbeda dengan temperatur air hangat 80°C, ketahanan ausnya semakin turun.

Hal ini didukung dengan hasil kekerasan yang ditunjukkan pada Gambar 4 & 5, kekerasan yang semakin meningkat maka ketahanan ausnya semakin tinggi. Bila dilihat dari pengaruh temperatur air hangat pada proses *martemper* semakin tinggi (40°C, 60°C, dan 80°C), dilanjutkan dengan proses *cryogenic treatment* yang menunjukkan ketahanan ausnya semakin turun (Tabel 11 dan Gambar 4 sd 15).

Ketahanan aus hasil *temper* pada *temperature* 150 di *holding* 1 jam kemudian didinginkan di udara, untuk bahan yang sebelumnya di *martemper* dengan media air hangat 40°C dengan *holding time* 60 second, dan dilanjutkan proses *cryogenic treatment* dengan variasi *soaking* 2 jam, 24 jam dan 48 jam menunjukkan ketahanan ausnya meningkat 3,5% dibanding hasil *cryogenic treatment* (lihat Gambar 11). Adapun pengaruh *temperature* air hangat semakin tinggi pada proses *martemper*, ketahanan ausnya semakin turun (lihat Gambar 10, 12 dan 14). Gambar 13 dan 15 menunjukkan ketahanan aus hasil *temper* lebih tinggi dibanding dengan hasil *cryogenic treatment* dengan variasi *soaking* 2 jam, 24 jam dan 48 jam. Namun pada Gambar 10 & 11 hasil *cryogenic treatment* dengan *soaking* 24 jam menunjukkan ketahanan aus lebih tinggi dibanding hasil *temper* seharusnya lebih rendah.

Ketahanan aus tertinggi hasil proses *martemper* pada FCD-45 dengan *quenching* dalam air hangat diperoleh $1/K = 3.478$ (lihat Tabel 11). Adapun hasil *cryogenic treatment* pada bahan MDI, ketahanan aus

KEAUSAN LOGAM

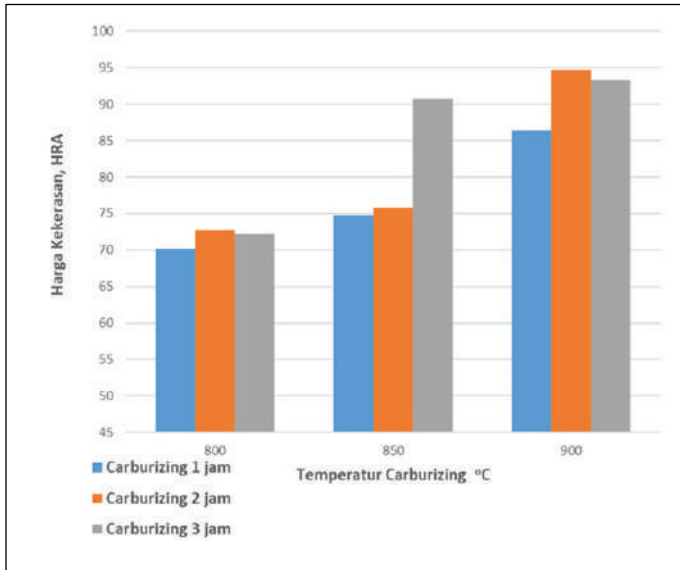
tertinggi $1/K = 6.377$ (lihat Tabel 11) sehingga terjadi kenaikan ketahanan aus sebesar 83%. Hal ini didukung hasil penelitian oleh A Suprpto, et al (2016) yang menunjukkan terjadi penurunan keausan sebesar 77% hasil proses *cryogenic treatment* pada pahat ADI. Ketahanan aus tertinggi hasil proses *temper* $1/K = 6.601$ (lihat Tabel 11) sehingga ketahanan ausnya meningkat 3,5% dibanding dengan hasil *cryogenic treatment*.

Hasil penelitian *carburizing* dan *cryogenic treatment*

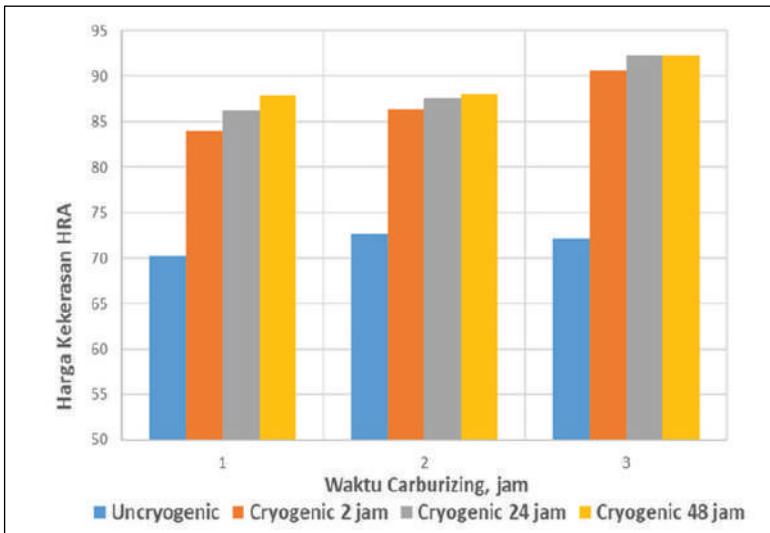
Tabel 12. Kekerasan hasil *carburizing* dan *cryogenic treatment*

No	Perlakuan		Kekerasan (HRA)	
1	Tanpa perlakuan		56,0	
2	Carburizing 800° C	Holdng 1 jam, quenching dalam air	Untreated cryogenic 70,2	
3		Holdng 2 jam quenching dalam air	Untreated cryogenic 72,7	
4		Holdng 3 jam quenching dalam air	Untreated cryogenic 72,2	
5	Carburizing 850° C	Holdng 1 jam, quenching dalam air	Untreated cryogenic 74,8	
6		Holdng 2 jam quenching dalam air	Untreated cryogenic 75,8	
7		Holdng 3 jam quenching dalam air	Untreated cryogenic 90,75	
8	Carburizing 900° C	Holdng 1 jam, quenching dalam air	Untreated cryogenic 86,35	
9		Holdng 2 jam quenching dalam air	Untreated cryogenic 94,75	
10		Holdng 3 jam quenching dalam air	Untreated cryogenic 93,3	
11	Carburizing 800° C	Holdng 1 jam, quenching dalam air	Cryogenic treatment nitrogen cair Soaking 2 jam	84,05
12			Soaking 24 jam	86,3
13			Soaking 48 jam	87,9
14		Holdng 2 jam quenching dalam air	Cryogenic treatment nitrogen cair Soaking 2 jam	86,4
15			Soaking 24 jam	87,6
16			Soaking 48 jam	88,06
17		Holdng 3 jam quenching dalam air	Cryogenic treatment nitrogen cair Soaking 2 jam	90,6
18			Soaking 24 jam	92,3
19			Soaking 48 jam	92,3
20	Carburizing 850° C	Holdng 1 jam, quenching dalam air	Cryogenic treatment nitrogen cair Soaking 2 jam	81,8
21			Soaking 24 jam	87,3
22			Soaking 48 jam	88,3
23		Holdng 2 jam quenching dalam air	Cryogenic treatment nitrogen cair Soaking 2 jam	89,2
24			Soaking 24 jam	90,3
25			Soaking 48 jam	91,95
26		Holdng 3 jam quenching dalam air	Cryogenic treatment nitrogen cair Soaking 2 jam	95,05
27			Soaking 24 jam	87
28			Soaking 48 jam	94,3
29	Carburizing 900° C	Holdng 1 jam, quenching dalam air	Cryogenic treatment nitrogen cair Soaking 2 jam	93,2
30			Soaking 24 jam	95,05
31			Soaking 48 jam	95,6
32		Holdng 2 jam quenching dalam air	Cryogenic treatment nitrogen cair Soaking 2 jam	95,85
33			Soaking 24 jam	96,35
34			Soaking 48 jam	97,1
35	Holdng 3 jam quenching dalam air	Cryogenic treatment nitrogen cair Soaking 2 jam	96,9	
36		Soaking 24 jam	96,6	
37		Soaking 48 jam	96,75	

KEAUSAN LOGAM

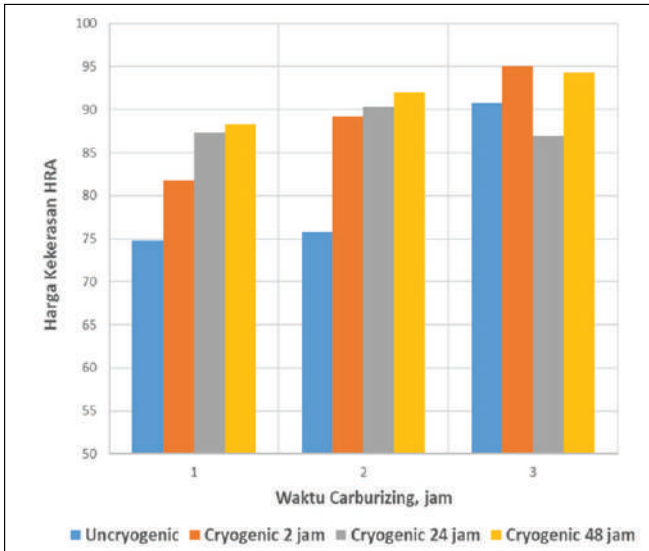


Gambar 16. Kekerasan hasil *carburizing* pada *temperature* 800 °C, 850 °C dan 900 °C dengan *holding time* 1 jam, 2 jam dan 3 jam

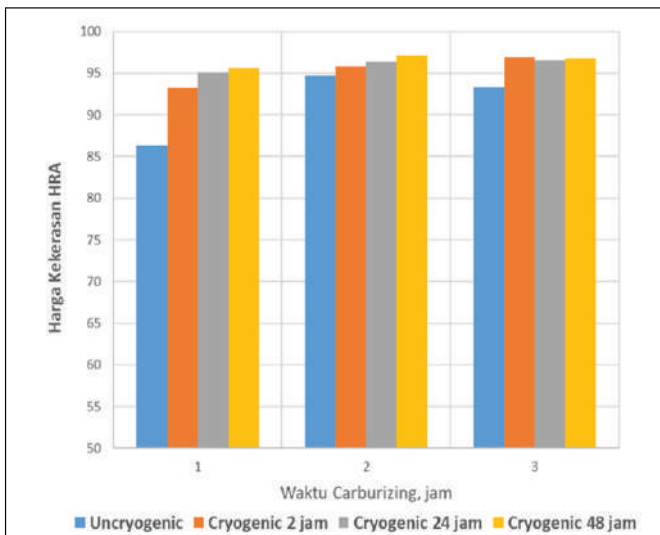


Gambar 17. Kekerasan hasil *cryogenic treatment* dengan variasi *soaking* 2 jam, 24 jam dan 48 jam setelah di *carburizing* pada *temperature* 800 °C dengan *holding time* 1 jam, 2 jam dan 3 jam

KEAUSAN LOGAM



Gambar 18. Kekerasan hasil *cryogenic treatment* dengan variasi *soaking* 2 jam, 24 jam dan 48 jam setelah di *carburizing* pada *temperature* 850 °C dengan *holding time* 1 jam, 2 jam dan 3 jam



Gambar 19. Kekerasan hasil *cryogenic treatment* dengan variasi *soaking* 2 jam, 24 jam dan 48 jam setelah di *carburizing* pada *temperature* 900 °C dengan *holding time* 1 jam, 2 jam dan 3 jam

Carburizing

Berdasarkan Tabel 12 menunjukkan kekerasan tertinggi hasil *carburizing* pada temperatur 900 °C dengan *holding time* 2 jam kekerasannya menjadi 94,75 HRA dibanding sebelum diproses *carburizing* kekerasannya 56 HRA, naik sebesar 69 %. Gambar 16 menunjukkan adanya pengaruh waktu *holding* pada proses *carburizing* pada *temperature* 800 °C dapat meningkatkan kekerasan sebesar 3,5% pada saat *holding time* 2 jam dibanding dengan *holding time* 1 jam. Pada temperatur 850 terjadi kenaikan kekerasan dari 74,8 HRA dengan *holding time* 1 jam menjadi 90,75 HRA dengan *holding time* 3 jam, naik sebesar 21,3%. Pada temperatur 900 juga mengalami kenaikan kekerasan sebesar 9,7% dari 86,35 HRA dengan *holding time* 1 jam menjadi 94,75 HRA dengan *holding time* 2 jam. Pada temperatur 850 menunjukkan bahwa parameter *holding time* merupakan parameter yang paling signifikan dalam peningkatan kekerasan yaitu sebesar 21,3 %. Adapun hasil kekerasan dari proses *carburizing* yang paling tinggi, yaitu sebesar 94,75 HRA pada temperatur 900 dengan *holding time* 2 jam.

Cryogenic Treatment

Gambar 17 menunjukkan hasil kekerasan dari *cryogenic treatment* yang sebelumnya yang mendapat proses *carburizing* menunjukkan terjadi perubahan sebesar 96,90 HRA dibanding hasil kekerasan *carburizing* sebesar 94,75 HRA (Tabel 12), yang mana terjadi peningkatan sebesar 2,3 %. Bila dibandingkan dengan *base metal* yang belum mendapat perlakuan terjadi perubahan yang sangat besar, yaitu peningkatan sebesar 73%. Pengaruh *soaking* pada saat *cryogenic treatment* berdampak pada kekerasan, semakin lama waktu *soaking*, maka akan semakin meningkat kekerasannya, terdapat kenaikan 4,6 % dari 84,05 HRA dengan *soaking* 2 jam menjadi 87,09 HRA dengan *soaking* 48 jam, yang sebelumnya mendapat perlakuan *carburizing* dengan *temperature* 800 *holding time* 1 jam. Untuk temperatur *carburizing* 800 dengan *holding time* 2 jam,

dilanjutkan dengan *cryogenic treatment* dengan variasi *soaking* yang sama juga terjadi perubahan kekerasan dari 86,4 HRA dengan *soaking* 2 jam menjadi 88,06 HRA dengan *soaking* 48 jam, terdapat peningkatan sebesar 1,9%. Untuk temperatur 800 dengan *holding time* 3 jam, dilanjutkan dengan *cryogenic treatment* juga terjadi perubahan kekerasan dari 90,6 HRA dengan *soaking* 2 jam menjadi 92,3 HRA dengan *soaking* 48 jam, terdapat peningkatan sebesar 1,9%. Perubahan yang paling besar dari pengaruh waktu *soaking* terjadi pada *temperature* 800 dengan *holding time* 1 jam sebesar 4,6 % (Gambar 17).

Untuk *temperature carburizing* 850 dengan *holding time* 1 jam, dilanjutkan dengan *cryogenic treatment* dengan variasi *soaking* yang sama juga terjadi perubahan kekerasan dari 81,8 HRA dengan *soaking* 2 jam menjadi 88,3 HRA dengan *soaking* 48 jam, terdapat peningkatan sebesar 7,9 %. Untuk *temperature* 850 dengan *holding time* 2 jam, dilanjutkan dengan *cryogenic treatment* juga terjadi perubahan kekerasan dari 89,2 HRA dengan *soaking* 2 jam menjadi 91,5 HRA dengan *soaking* 48 jam, terdapat peningkatan sebesar 3,0 %. Untuk *temperature* 850 dengan *holding time* 3 jam, dilanjutkan dengan *cryogenic treatment* juga terjadi perubahan kekerasan dari 90,05 HRA dengan *soaking* 2 jam menjadi 87,0 HRA dengan *soaking* 24 jam, terjadi penurunan kekerasan sebesar 3,0 %. Perubahan yang paling besar dari pengaruh waktu *soaking* terjadi pada *temperature* 850 dengan *holding time* 1 jam sebesar 7,9 % (Gambar 18)

Untuk temperatur *carburizing* 900 °C dengan *holding time* 1 jam, dilanjutkan dengan *cryogenic treatment* dengan variasi *soaking* yang sama juga terjadi perubahan kekerasan dari 93,2 HRA dengan *soaking* 2 jam menjadi 95,6 HRA dengan *soaking* 48 jam, terdapat peningkatan sebesar 2,6 %. Untuk temperatur 900 dengan *holding time* 2 jam, dilanjutkan dengan *cryogenic treatment* juga terjadi perubahan kekerasan dari 95,9 HRA dengan *soaking* 2 jam menjadi 97,1 HRA dengan *soaking* 48 jam, terdapat peningkatan sebesar 1,3 %. Untuk *temperature* 900 dengan *holding time* 3 jam, dilanjutkan dengan *cryogenic treatment* juga terjadi perubahan kekerasan dari 96,9 HRA dengan *soaking* 2 jam menjadi 96,6

KEAUSAN LOGAM

HRA dengan *soaking* 24 jam, ada penurunan kekerasan 0,3 % (Gambar 19).







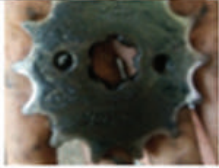



Perubahan yang paling besar dari pengaruh waktu *soaking* terjadi pada temperature 900 dengan *holding time* 1 jam sebesar 2,6 %. Pengaruh *cryogenic treatment* terbesar yang sebelumnya mendapat proses *carburizing* terjadi pada temperatur *carburizing* 900 dengan *holding time* 2 jam dilanjutkan *cryogenic treatment* dengan waktu *soaking* 48 jam mendapatkan kekerasan tertinggi 97,1 HRA.

Hasil penelitian *sprocket/ gear* depan sepeda motor











Tabel 13. Foto keausan *gear* depan hasil survey pada sepeda motor

No	Kualitas Gear	Foto Gear Full/Utub.	Foto Gear yang Aus.
1.	Kw1		
2.	Kw2		
3.	Original		











KEAUSAN LOGAM

No	Kualitas Gear	Foto Gear Full/Utuh	Foto Gear yang Aus
4.	Kw1		
5.	Original		
6.	Kw1		
7.	Original		
8.	Original		













KEAUSAN LOGAM

No	Kualitas Gear	Foto Gear Full/Utuh	Foto Gear yang Aus
9.	Original		
10.			
11.	Kw2		
12.	Kw1		
13.	Kw1		











KEAUSAN LOGAM

No	Kualitas Gear	Foto Gear Full/Utuh	Foto Gear yang Aus
14.	Kw2		
15.	Kw2		
16.	Kw1		
17.	Kw1		
18.	Kw1		













KEAUSAN LOGAM

No	Kualitas Gear	Foto Gear Full/Utuh	Foto Gear yang Aus
19.	Kw1		
20.	Original		
21.	Kw2		
22.	Kw2		
23.	Kw1		
24.	Kw1		







KEAUSAN LOGAM

No	Kualitas Gear	Foto Gear Full/Utuh	Foto Gear yang Aus
25.	Original		
26.	Kw1		
27.	Kw1		
28.	Kw1		
29.	Kw1		

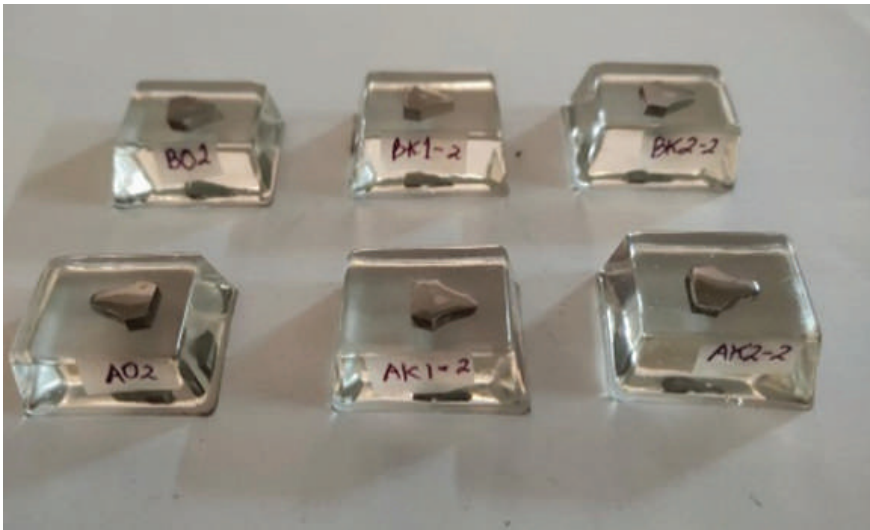
KEAUSAN LOGAM

No	Kualitas Gear	Foto Gear Full/Utuh	Foto Gear yang Aus
30.	Original		
31.	Kw2		
32.	Kw1		
33.	Kw1		
34.	Kw1		
35.	Kw1		

KEAUSAN LOGAM

No	Kualitas Gear	Foto Gear Full/Utuh	Foto Gear yang Aus
36.	Kw2		
37.	Kw1		
38.	Kw1		

KEAUSAN LOGAM



Gambar 20. A. *Sprocket/ gear* depan sepeda motor, B. Gigi *sprocket* yang sudah dipotong sebagai spesimen uji

Berdasarkan hasil survey *gear* depan sepeda motor sebagaimana dalam Tabel 13 yang menunjukkan keausan *gear* pada produk *gear original*, produk *gear* KW 1 dan produk *gear* KW 2, yang kemudian ditindaklanjuti dengan pengamatan ketebalan lapisan permukaan gigi (Gambar 20) dan

pengujian kekerasan dan keausan, selanjutnya dibandingkan dengan hasil penelitian *pack carburizing* dan *cryogenic treatment* pada gear ST 37.

Baja ST37 dalam hal ini difungsikan sebagai material dasar pembuatan *sprocket* (roda gigi) yang kemudian diberikan perlakuan panas (*heat treatment*) baik secara menyeluruh maupun permukaan saja (*surface treatment*). Baja ST37 memiliki keuletan yang tinggi, jika dilakukan perlakuan panas pada permukaannya dalam hal ini karburasi/*carburizing* maka akan didapatkan baja dengan kekerasan permukaan yang tinggi namun tetap memiliki keuletan dibagian dalam sehingga tahan aus namun tidak mudah patah. Ini dilakukan untuk meningkatkan sifat material dasar, agar sesuai dengan sifat yang dibutuhkan dari suku cadang itu sendiri ketika difungsikan sebagai komponen pendukung kendaraan bermotor. Mengingat *sprocket* mengalami gaya gesek yang tinggi di permukaan terutama pada gigi-giginya namun harus kuat apabila dibebani oleh putaran poros dan roda.

Hal tersebut diatas didukung dengan beberapa penelitian sebelumnya David Satya (2020) menunjukkan menyatakan semakin lama waktu penahanan proses karburasi pada baja ST37 maka akan semakin banyak karbon yang berdifusi sehingga nilai kekerasan semakin meningkat, dengan hasil pada penahanan 90 menit + *cryogenic* 2 jam harga kekerasannya 80,45 HRA. Hal ini didukung oleh penelitian Dewa (2015) bahwa adanya peningkatan kekerasan pada raw material baja karbon rendah dengan nilai 183,60 HV1 menjadi 368,46 HV1 setelah diberikan perlakuan *pack carburizing*. Tentu ini menjadi pandangan dasar sebagai rujukan penelitian ini dimana perlakuan panas *carburizing* mampu meningkatkan kadar karbon dalam baja dengan karbon rendah yang hanya sekitar 0.3%, hingga nilai kekerasannya meningkat lebih dari 100% dari nilai awal. Penelitian Richard (2018) juga mengungkapkan *carburizing* dengan potassium *hexacyanoferrat* sebagai karbon cair mampu meningkatkan kekerasan *sprocket* imitasi, dan diperoleh nilai kekerasan

tertinggi apabila waktu penahanan 45 menit yaitu 106,48 HRB pada sprocket imitasi hitam juga 102,90 HRB.

Riset ini dilakukan dengan tujuan untuk mencari data secara kuantitatif dengan pengujian kekerasan sehingga dapat diambil kesimpulan secara faktual bahwa ada pengaruh dalam proses *pack carburizing* yang dilakukan terhadap baja karbon rendah ST37. Sebagai pembandingan lain dimana baja ST37 dimaksudkan untuk menjadi *raw material* dari *sprocket* (*gear*) maka diambil sampel serupa yaitu sprocket (*gear* depan) dari sepeda motor H dengan kualitas Original, KW 1, dan KW 2 berdasarkan hasil survey (Tabel 13).

Untuk material baja ST37 dimasukkan dalam kotak baja dengan dipenuhi arang dari batok kelapa dan ditutup rapat kemudian diberi perlakuan panas *pack carburizing* pada dapur pemanas dengan suhu konstan 900 dengan *holding time* 2 jam lalu di *quenching* dengan pendingin air, selanjutnya diberikan *cryogenic treatment* dengan dicelupkan pada nitrogen cair selama 2 jam. Sedangkan untuk sprocket H yang lain dengan kualitas original, KW 1 dan KW 2 (Gambar 20) tidak di berikan perlakuan apapun dikarenakan secara proses pembuatan sudah diberi *treatment* khusus seperti *case hardening*. Sehingga perbandingan pengujian kekerasan permukaan yang dilakukan pada material sama-sama pada sisi yang sudah mengalami proses *case hardening* terkhusus *carburizing*. Metode selanjutnya untuk mengambil data secara kuantitatif dilakukan uji kekerasan Rockwell dengan skala A beban pengujian sebesar 60 kg serta indenter intan atau diamond.

Selain dengan uji kekerasan menggunakan Rockwell skala A dilakukan juga proses pengamatan struktur mikro terhadap spesimen uji yang sudah dipotong pada bagian gigi *sprocket*. Ini dilakukan dengan tujuan melihat ketebalan lapisan hasil *case hardening* yang terbentuk pada permukaan *sprocket*. Mengingat proses pengerjaan pemesinan pada *sprocket* ada tahapan pengerasan permukaan yaitu *pack carburizing*. Perlu adanya persiapan sebelum dilakukannya pengamatan struktur sesuai

KEAUSAN LOGAM

dengan langkah yang dianjurkan. Adapun langkahnya antara lain yaitu pemotongan bagian yang diuji, dilanjutkan peresinan apabila spesimen kecil maka sulit untuk dipegang langsung, kemudian diampelas sampai halus dan dipoles, hingga terakhir dietsa dengan larutan Asam Nitrat (HNO₃). Maka dengan langkah yang sudah dilalui tadi pengamatan dengan mikroskop akan memperlihatkan struktur mikro dari spesimen.

Hasil uji kekerasan baja ST37 dengan ketiga *sprocket* pembeding pada tabel dibawah ini:

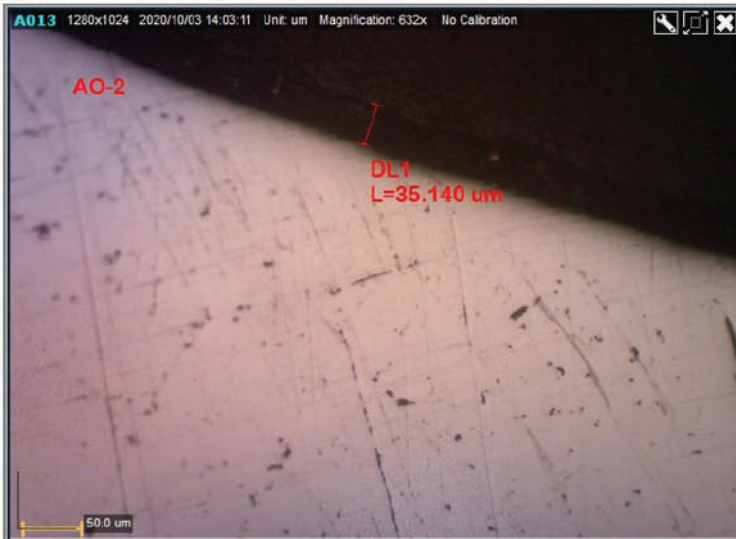
Tabel 14. Foto keausan *gear* depan hasil survey pada sepeda motor

	KEKERASAN SPROCKET (HRA)			
	ORIGINAL DEPAN	KW 1 DEPAN	KW 2 DEPAN	ST37
	88.5	80.5	81.5	92
	88.5	82.5	86.5	92
	89	82.5	87.5	92
	89	88	88.5	95
	91.5	89.5	92	94
RATA-RATA	89	88	92	93

Dari data dapat dilihat bahwa nilai kekerasan rata-rata *sprocket original* adalah sebesar 89 HRA, untuk nilai kekerasan rata-rata *sprocket KW 1* sebesar 88 HRA juga dapat dilihat untuk *sprocket KW 2* memiliki nilai kekerasan sebesar 92. Sedangkan jika dilihat lebih lanjut *sprocket* dengan *raw material* ST37 memiliki kekerasan sebesar 93 HRA.

Hasil dari pengamatan struktur mikro yang dilakukan pada spesimen uji menggunakan mikroskop ada pada gambar 21, 22, 23 dan 24 berikut ini.

KEAUSAN LOGAM



Gambar 21. Foto struktur mikro spesimen *sprocket original* depan



Gambar 22. Foto struktur mikro spesimen *sprocket KW 1* depan



Gambar 23. Foto struktur mikro spesimen *sprocket* KW 2 depan



Gambar 24. Foto struktur mikro spesimen baja ST37

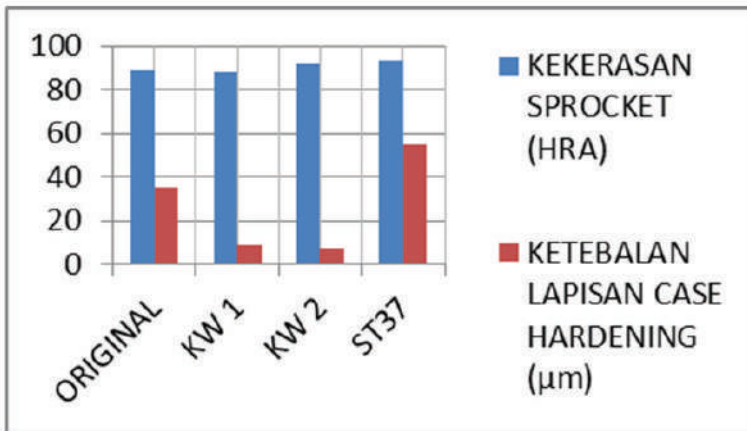
KEAUSAN LOGAM

Tabel 15 menunjukkan ketebalan lapisan hasil *case hardening* dari *sprocket original* bagian depan dengan ukuran sebesar 35,140 μm , *sprocket* KW 1 bagian depan dengan ketebalan sebesar 8,914 μm . Serta ketebalan dari lapisan *case hardening sprocket* KW 2 sebesar 7,583 μm .

Tabel 15. Tabel ketebalan lapisan hasil *Case Hardening*

KETEBALAN LAPISAN CASE HARDENING (μm)			
ORIGINAL	KW 1	KW 2	ST37
35,14	8,914	7,583	55,177

Dari penelitian diatas dapat ditarik grafik hubungan antara kekerasan dengan ketebalan lapisan yang terbentuk, sebagai berikut:



Gambar 25. Grafik batang kekerasan dan ketebalan lapisan hasil *case hardening*

Berdasarkan hal tersebut diatas perlu dijabarkan terkait dengan hasil dari proses penelitian yang sudah dilakukan. Dilihat dari hasil penelitian yang sudah disajikan dalam tabel diatas, menunjukkan bahwa besaran

nilai kekerasan yang paling tinggi justru pada baja ST37 dengan nilai 93 HRA apabila dibandingkan dengan nilai kekerasan pada ketiga *sprocket*. Ini berkesinambungan dengan teori proses perlakuan *carburizing* dimana pada suhu pemanasan antara 850-950 saat *holding time* akan membuka pori-pori baja sehingga karbon yang ada bisa masuk memenuhi lapisan luar sehingga terbentuk lapisan luar yang keras. Selain hal tersebut grafik juga memperlihatkan lapisan luar yang lebih tebal sebesar 55,177 μm dari ST37 dibandingkan dengan *sprocket* lain yang menunjukkan lapisan original 35,140 μm , KW 1 hanya sebesar 8,914 μm dan KW 2 sebesar 7,583 μm .

Dari uraian data pengujian diatas dapat disimpulkan bahwa baja ST37 dengan penambahan *treatmen pack carburizing* menghasilkan nilai kekerasan rata-rata 93 HRA merupakan nilai paling tinggi dibanding kekerasan dari *sprocket original* yang hanya sebesar 89 HRA, KW 1 sebesar 88 HRA, dan juga KW 2 sebesar 92 HRA. Hal ini juga menunjukkan bahwa label tidak selalu mempengaruhi kualitas atas dasar bahwa *sprocket original* dengan nilai kekerasan 89 HRA justru lebih rendah dibandingkan *sprocket KW 2* yang memiliki nilai sebesar 92 HRA.

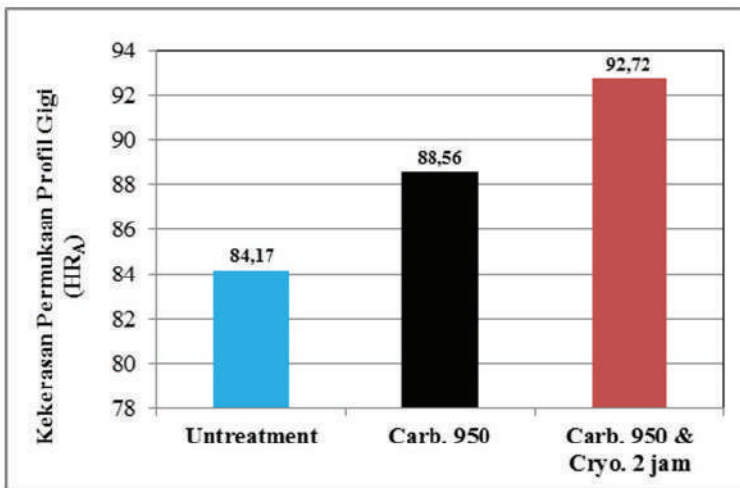
Untuk hasil dari pengamatan ketebalan lapisan menggunakan pengamatan struktur mikro dapat disimpulkan bahwa *sprocket* yang memiliki lapisan paling tebal adalah sprocket ST37 dengan nilai ketebalan 55,117 μm dibandingkan dengan *sprocket* lain yang hanya 35,140 μm dari *sprocket original*, 8,914 μm dari *sprocket KW 1* dan KW 2 sebesar 7,583 μm (Gambar 25),

Hubungan antara ketebalan dengan kekerasan adalah berbanding lurus sebagaimana diperlihatkan pada grafik pada Gambar 25. Dari grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin tebal lapisan hasil karburasi maka kekerasan permukaan yang dimiliki suatu baja akan semakin tinggi nilainya.

Hasil Penelitian Roda Gigi Lurus

Pengujian kekerasan profil roda gigi lurus dilakukan dengan menggunakan mesin uji keras dengan indenter type A yang menghasilkan nilai kekerasan dalam satuan HRA. Berdasarkan Gambar 26 bisa dilihat bahwa perlakuan *carburizing* dengan menggunakan karbon aktif dari limbah tempurung akan bisa meningkatkan kekerasan permukaan profil roda gigi lurus sebesar 4,40 HRA (5.22%) sedangkan tambahan proses perlakuan *cryogenic* makin memperbesar nilai kekerasan profil roda gigi lurus sebesar 7.75 HRA (10.17%) dari kekerasan profil roda gigi lurus tanpa perlakuan.

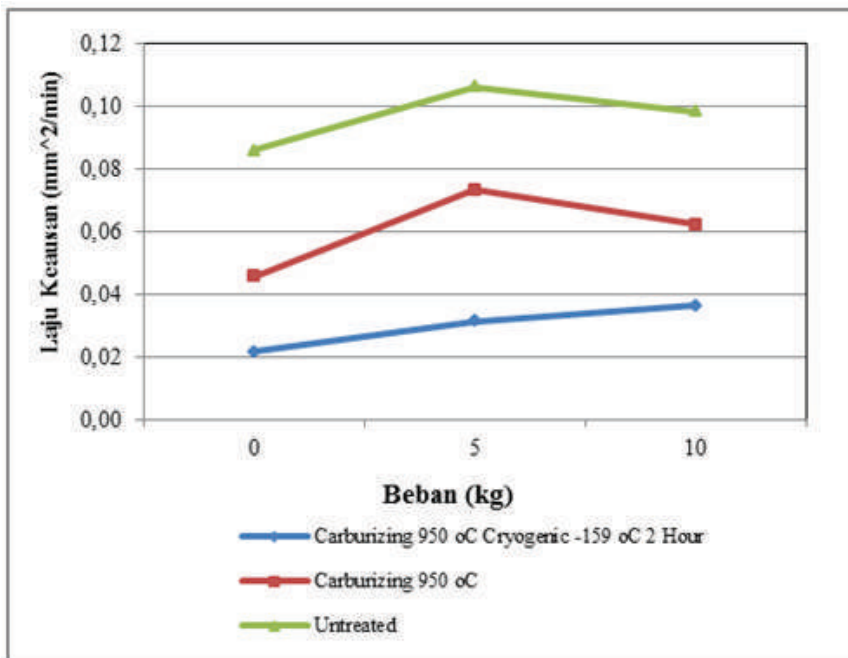
Kondisi peningkatan kekerasan permukaan profil roda gigi lurus tersebut sesuai dengan tujuan perlakuan yang dilakukan. Hal tersebut menggambarkan bahwa proses penambahan unsur karbon pada permukaan profil roda gigi lurus telah berhasil dilakukan. Di samping itu juga proses *cryogenic* juga telah berhasil dilakukan dengan ditunjukkannya nilai kekerasan hasil proses tersebut meningkat sekitar 10%.



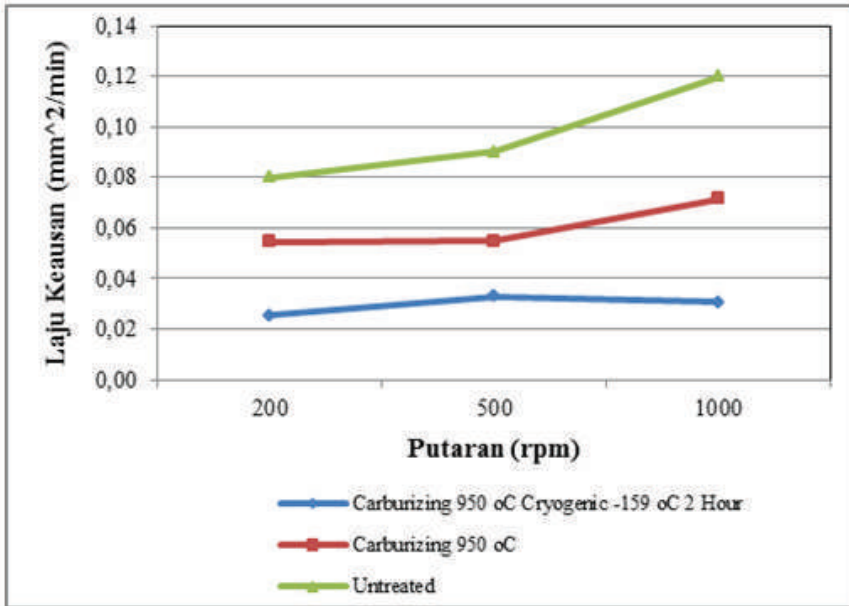
Gambar 26. Grafik hasil pengukuran kekerasan permukaan profil roda gigi dengan variasi perlakuan panas

Laju keausan roda gigi lurus dengan variasi beban

Berdasarkan Gambar 27 bisa dilihat bahwa semakin besar beban maka secara keseluruhan laju keausan profil roda gigi lurus akan semakin meningkat. Peningkatan laju keausan tertinggi terjadi pada profil roda gigi lurus yang tidak dikenakan perlakuan sebesar $0.02 \text{ mm}^2/\text{min}$ (0.25%). Hal tersebut dipengaruhi oleh profil roda gigi lurus yang tidak mengalami perlakuan yang memiliki nilai kekerasan terendah.



Gambar 27. Grafik laju keausan roda gigi lurus dengan variasi beban



Gambar 28. Grafik laju keausan roda gigi lurus dengan variasi putaran dan variasi perlakuan panas

Laju keausan roda gigi lurus variasi putaran

Gambar 28 menunjukkan bahwa semakin tinggi putaran yang dikenakan pada profil roda gigi lurus maka laju keausan akan semakin meningkat. Akan tetapi peningkatan yang cukup besar (slope besar) terjadi pada putaran dibawah 500 rpm, akan tetapi peningkatan laju keausan di atas 500 rpm cenderung untuk lebih landai (slope rendah).

Peningkatan laju keausan dengan variasi putaran menunjukkan juga bahwa profil roda gigi yang tidak mengalami perlakuan adalah yang paling besar yaitu sebesar 0.04 mm²/min (5%). Hal tersebut dipengaruhi oleh profil roda gigi lurus yang tidak mengalami perlakuan yang memiliki nilai kekerasan terendah.

KEAUSAN LOGAM

Berdasarkan hasil pengujian secara umum bahwa proses perlakuan *carburizing* 950 dan proses *cryogenic* 2 jam telah meningkatkan nilai kekerasan permukaan profil gigi. Sehingga dengan peningkatan nilai kekerasan tersebut berimplikasi pada terjadinya perlambatan laju keausan profil gigi lurus yang diberikan variasi pembebanan dan variasi putaran.

4

KESIMPULAN

1. Semakin besar kedalaman potongnya keausan yang terjadi pada tepi pahat V_B semakin besar dan umur pahat T semakin rendah.
2. Umur pahat karbida yang digunakan untuk membubut Aluminium 6061 hasil *cryogenic treatment* meningkat sebesar 28% dibandingkan dengan pahat tanpa perlakuan.
3. Umur pahat karbida yang digunakan untuk membubut Aluminium 6061 hasil *cryogenic treatment + temper* mengalami peningkatan umur pahat sebesar 105% dibandingkan dengan pahat tanpa perlakuan.
4. Persamaan Taylor umur pahat tanpa treatment, $VT_{0,5} = 115,6598$.
5. Persamaan Taylor umur pahat dengan *cryogenic treatment* $VT_{0,35} = 103,6707$.
6. Persamaan Taylor umur pahat dengan *cryogenic treatment + temper*, $VT_{0,2} = 95,06642$

7. Pahat karbida tanpa *cryogenic treatment* mengalami BUE bahan Aluminium yang semakin tebal seiring dengan bertambahnya waktu pemotongan 90 s/d 360 detik, BUE ini nampak sekali pada *flank surface*.
8. Untuk *cryogenic treatment* dengan *soaking* 2 jam, waktu timbulnya BUE bahan Aluminium pada pahat karbida terjadi pada waktu pemotongan 180 detik, sedangkan pada variasi *soaking* 24 jam, BUE timbul pada waktu pemotongan 270 detik. Untuk *soaking* 48 jam, pada saat waktu pemotongan 90 detik BUE yang terjadi sudah Nampak tebal seiring dengan berjalannya waktu pemotongan 270 s/d 360 detik terjadi pengelupasan Aluminium.
9. Untuk *cryogenic treatment* dengan *soaking* 48 jam + *temper* 150 selama 1 jam mengalami BUE bahan Aluminium pada waktu pemotongan 90 detik dan terjadi pengelupasan Aluminium pada waktu pemotongan 180 detik, kemudian terbentuk BUE bahan Aluminium lagi pada waktu 270 detik dan mengelupas lagi pada waktu 360 detik.
10. ADI *tool life* yang digunakan untuk membubut Aluminium 6061 hasil *cryogenic treatment* meningkat sebesar 92% dibandingkan dengan pahat tanpa perlakuan
11. ADI *tool life* yang digunakan untuk membubut Aluminium 6061 hasil *cryogenic treatment* + *temper* terjadi peningkatan *tool life* sebesar 125% dibandingkan dengan pahat tanpa perlakuan.
12. Persamaan ADI *tool life* Taylor tanpa *treatment*, $VT_{0,100} = 136,7363$.
13. Persamaan ADI *tool life* Taylor dengan *cryogenic treatment* $VT_{0,072} = 107.8074$.
14. Persamaan ADI *tool life* Taylor dengan *cryogenic treatment* + *temper*, $VT_{0,070} = 106.7000$.
15. Semakin besar kedalaman potongnya maka keausan tepi pahat semakin besar dan ADI *tool life* nya semakin pendek.

KEAUSAN LOGAM

16. BUE bahan Aluminium semakin tebal terjadi pada pahat ADI tanpa perlakuan seiring dengan bertambahnya kedalaman potong (a).
17. BUE bahan Aluminium semakin tipis terjadi pada pahat ADI hasil *cryogenic treatment* seiring dengan bertambahnya waktu *soaking*.
18. Keausan pada *rake surface* semakin parah dengan bertambahnya kedalaman potong (a).
19. Hasil proses MDI menunjukkan kekerasan dan ketahanan ausnya meningkat dibanding sebelum proses *martemper*.
20. Hasil *cryogenic treatment* menunjukkan kekerasan dan ketahanan ausnya lebih tinggi dibanding hasil proses *martemper*.
21. Hasil *cryogenic treatment* + *temper* menunjukkan kekerasan dan ketahanan ausnya lebih rendah dibanding dengan hasil *cryogenic treatment*.
22. Kekerasan hasil *carburizing* pada temperatur 900°C dengan *holding time* 2 jam kekerasannya menjadi 93 HRA dibanding sebelum diproses *carburizing*, yang mana kekerasannya hanya 56 HRA, hal ini menunjukkan adanya peningkatan kekerasan sebesar 66 % dibanding sampel tanpa perlakuan.
23. Hasil *cryogenic treatment* terbesar yang sebelumnya mendapat proses *carburizing* terjadi pada temperatur *carburizing* 900°C dengan *holding time* 2 jam dilanjutkan *cryogenic treatment* dengan waktu *soaking* selama 48 jam mendapatkan kekerasan tertinggi 97 HRA. Hal ini menunjukkan terdapat peningkatan kekerasan sebesar 73 % dibanding tanpa perlakuan.
24. Kekerasan *gear original* adalah sebesar 89 HRA, kekerasan *gear* KW 1 sebesar 88 HRA sedangkan kekerasan *gear* KW 2 sebesar 92 HRA.
25. Kekerasan *gear* hasil penelitian menunjukkan lebih tinggi 9% dibanding dengan *gear original*, 10 % dibanding dengan *gear* KW 1 dan 5% dengan *gear* KW 2.

26. Semakin tinggi kekerasan permukaan profil gigi lurus maka semakin kecil laju pertumbuhan keausannya sehingga ketahanan ausnya semakin tinggi
27. Perlakuan *carburizing* dan *cryogenic* terbukti dapat meningkatkan kekerasan permukaan profil gigi sehingga laju pertumbuhan keausan dapat diperlambat.
28. Ketebalan lapisan permukaan *gear* hasil *Carburizing* 55,117 μm , dibandingkan dengan ketebalan lapisan *gear original* 35,140 μm dan *gear KW I* sebesar 8,914 μm sedangkan *gear KW 2* sebesar 7,583 μm .
29. Kekerasan hasil *carburizing* pada temperatur 900°C dengan *holding time* 2 jam kekerasannya menjadi 94,75 HRA dibanding sebelum diproses *carburizing* kekerasannya 56 HRA, hal ini menunjukkan bahwa terdapat peningkatan kekerasan sebesar 69 % dibanding tanpa perlakuan.
30. Hasil *cryogenic treatment* terbesar yang sebelumnya mendapat proses *carburizing* terjadi pada temperatur *carburizing* 900°C dengan *holding time* 2 jam dilanjutkan *cryogenic treatment* dengan waktu *soaking* selama 48 jam mendapatkan kekerasan tertinggi yaitu 97,1 HRA. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat peningkatan kekerasan sebesar 73 % dibanding tanpa perlakuan.
31. Pengaruh *holding time* pada proses *carburizing* merupakan parameter yang paling signifikan, yaitu sebesar 21 %.
32. Pengaruh temperatur *carburizing* yang paling signifikan sebesar 30 %.
33. Kekerasan hasil perlakuan *carburizing* dengan menggunakan karbon aktif dari limbah tempurung, mampu meningkatkan kekerasan permukaan profil roda gigi lurus sebesar 4,40 HRA (5.22%) sedangkan tambahan proses perlakuan *cryogenic* makin memperbesar nilai kekerasan profil roda gigi lurus sebesar 7.75 HRA (10.17%) dari kekerasan profil roda gigi lurus tanpa perlakuan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Thamizhmanii S. et al. 2011. Performance of deep cryogenically treated and non-treated PVD inserts in milling. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 49(2): 460-466
2. Ramji B. R. et al. 2010. Analysis of Roughness and Flank Wear in Turning Gray Cast Iron Using Cryogenically Treated Cutting Tool. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2(5): 414-417
3. K.P, Kollmer. 2007. Applications & Developments in the Cryogenic Processing of Materials. Kollmer-The Technologi Interface. htm.2/23/2007
4. Sudjatmiko, Agus Suprpto dan Rudy Soenoko. 2011. Analisis Umur dan Keausan Pahat Karbida untuk membubut Alumunium 6061-T. *ProsedingSemNasTek. Informatika dan Aplikasinya Tahun 2011 Vol-3. Polines Malang*
5. Pawlik, A. et al. 2004. Tool Life Experiment. *Journal Teknologi Process*: 149-56
6. Budiman, H dan Richard. 2007. Percobaan menentukan Analisis umur dan keausan pahat karbida untuk membubut baja paduan ASSAB 760, dengan metoda variable speed machining test. *Jurnal Teknik Mesin*, 9(11): 31-39
7. N.S, Biranchi. 2011. Effect of Cryogenic Treatment of Cemented Carbide Inserts on Properties & Performance Evaluation In Machining of Stainless Steel. Thesis Master of Technology in Production Engineering, Departement of Mechanical Engineering. Rourkela: National Institute of Technology.
8. Singh S. et al., 2012, "Experimental Analysis of Cryogenic Treatment on Coated Tungsten Carbide Inserts in Turning", *International*

- Journal of Advanced Engineering Technology, Vol.3 (1) pp.290-294
9. Rajendra K. et al, 2007, “Under standing the effect of cryogenic treatment on M2 Tool Steel Properties”, Heat Treating Progress, 2007, p.57-60
 10. Agus Suprpto, Agus Iswantoko dan Ike Widyastuti, 2014, “Impact of Cryogenic Treatment and Temper to carbide tool life on turning process for Al T-6061”, International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 9 (24) pp. 30643-30650.
 11. Suriansyah S., Pratikto, Agus Suprpto dan Yudi Surya Irawan, 2015, “The Effect Cryogenic Cooling, Martemper And Temper Of Micro Structure And Hardness Ductile Cast Iron (FCD-45)”, International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 10 (8) pp. 19389-19400
 12. Society of Manufacturing Engineers (SME), 2012, “Deep Cryogenic Treatment of Metal, an Emerging Technology”, DCT WEBINARS SME March 13 2012, Air Liquide,
 13. Chang-Yong Kang et al, 2009, “Effect of Subzero Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Cast Iron”, Materials Transactions, Vol. 50 (9) pp. 2207 to 2211
 14. Agus Suprpto, Agus Iswantoko dan Ike Widyastuti, 2016, “Impact Evaluation of Cryogenic Treatment to Wear Characteristics of ADI Cutting Tool”, International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 11(12) pp. 7691-7697
 15. Agus Suprpto, Agus Iswantoko dan Ike Widyastuti, 2017, “The Impact of Cryogenic Treatment and Temper to wear resistance of MDI (Martemper Ductile Iron)”, International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 12 (3) pp. 331-335
 16. Oyetunji Akinlabi; Barnabas A. A.; Adewara J.O.T., 2013, “Development of Martempered Ductile Iron by Step-Quenching Method in Warm Water”, Daffodil International University Journal of Science and Technology, Vol. 8, Issue 2

17. Yahya, Nukman dan Hendri Chandra, 2013, "The Carburizing Process of Low Carbon Steel with Charcoal Media", *Journal of Mechanical Science and Engineering*, Vol. 1., No1, October 2013
18. Ilyas Jamal, Mukhtar Rahman dan Arsyad Abdullah, 2014, Pengaruh Karburisasi Padat Dengan Katalisator Cangkang Kerang Darah (CaCO_2) Terhadap Sifat Mekanik Dan Keausan Baja St. 37, *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIII (SNTTM XIII)*, Depok, 15 – 16 Oktober 2014
19. Rochim, Taufiq, 2007, *Buku 1 Klasifikasi Proses, Gaya dan Daya Pemesinan. Mechanical & Production Engineering (MPE)*, FTI, Jurusan Mesin. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
20. Yazdani S.and, Ardestani M., 2007," Effect of sub-zero cooling on microstructure and mechanical properties of a low alloyed austempered ductile iron", *China Foundry*, Vol 4, No 2, pp 120-123
21. Aziz Cahyo Yullye Antoro, 2009, "Pengaruh ketebalan media karburasi pada proses pack carburizing terhadap nilai kekerasan baja karbon rendah", skripsi, jurusan teknik mesin-fakultas teknik universitas sebelas maret, Surakarta.
22. Sigit Gunawan dan Sigit Budi Hartono, 2015, "Analisis pengaruh media pack carburizing terhadap keausan dan kekerasan sproket sepeda motor", *Jurnal TRAKSI*, Vol. 15, No.2., pp. 52-59.
23. Bambang Kuswanto, 2010, "Perlakuan Pack carburizing Pada Baja Karbon Rendah Sebagai Material Alternatif Untuk Pisau Potong Pada Penerapan Teknologi Tepat Guna",*Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2010. Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim Semarang*
24. N. Dewa, dan M. I Dewa, 2015, "Pack Carburizing Baja Karbon Rendah", *Jurnal Energi dan Manufaktur* Vol.7, No.1.
25. M. Richard, 2018, "Peningkatan Kekerasan Sprocket Imitasi Melalui Proses Karburasi Cair Dengan Suhu 850°C", Yogyakarta,.

26. David Satya Hartanto, Agus Suprpto, Ike Widyastuti, 2020, “Analisa Variasi Waktu Penahanan Karburisasi Dan Perlakuan Cryogenic Terhadap Sifat Mekanis Baja ST37”, TRANSMISI, Vol-16 Edisi-1/ Hal.56-64
27. Ilham Pangestu, Agus Suprpto, Ike Widyastuti, 2020, “Analisis Nilai Kekerasan Pada Baja ST37 Pasca Proses Pack Carburizing Sebagai Material Dasar Sprocket”, Prosiding Seminar Nasional SISTEK 2020, Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang
28. Singh Rupinder, and Singh Kamaljit, 2010,” Enhancement of Tool Material Machining Characteristics with Cryogenic Treatment: A Review”, Proceedings of the 2010 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Dhaka, Bangladesh, January 9 – 10, 2010
29. A. Suprpto, Darto, I. Widyastuti dan D.I. Tsamroh, 2020, “Behavior Effects of Carburizing and Cryogenic Treatment to the Wear Rate of Spur Gear with Load and Rotation Variations”, International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 15 (11) pp. 1049-1051
30. A. Suprpto, Darto, I. Widyastuti dan D.I. Tsamroh, 2019, “ Utilization of Coconut Shell in Pack Carburizing Process of ST37 to the Rate of Wear at the Different Cryogenic Treatment”, International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 14 (21) pp. 4085-4089

BIOGRAFI PENULIS



Prof. Ir. Agus Suprpto, MSc., PhD., IPM - terlahir di Kota Surabaya pada tanggal 7 September 1958. Menempuh Pendidikan Sarjana (S1) pada jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, pasca sarjana (S2) di Teknik Mesin ITB dan (S3) di Mechanical Engineering UTM Malaysia. Penulis aktif dalam penelitian sejak tahun 1987. Selain itu penulis juga aktif menulis karya ilmiah dalam bentuk artikel jurnal maupun artikel untuk seminar dan pelatihan dalam pengabdian kepada masyarakat. Memiliki pengalaman dalam menduduki jabatan sebagai Kepala Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Merdeka Malang, Wakil Rektor bidang Akademik Universitas Merdeka Malang, Saat ini penulis menjabat sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang untuk masa jabatan 2019-2023. Dalam berorganisasi aktif sebagai anggota Persatuan Insinyur Indonesia (PII), anggota ASM International tahun 2018, pengurus Forum Dekan Teknik Indonesia (FDTI) periode 2021-2023.



Ir. Darto, ST., MT. – lahir di Malang pada tanggal 04 Juli 1973 menempuh pendidikan sarjana di Teknik Mesin Universitas Merdeka Malang serta melanjutkan pendidikan tingkat magister di Institut Teknologi Bandung pada bidang kekhususan Teknik Produksi Pemesinan. Penulis berpengalaman dalam bidang komisioning mesin perkakas NC dan telah banyak berpengalaman dalam bidang tersebut. Di samping itu penulis juga merupakan anggota Masyarakat Teknik Produksi Indonesia dalam bidang Pengetesan Mesin Perkakas. Dalam keseharian penulis juga bekerja sebagai pelaksana pengawas berbagai proyek gedung di bidang Mekanikal Elektrikal, dan mulai tahun 2007 sampai dengan sekarang telah bergabung dengan PT. Empat Pilar Konsultan yang berkedudukan di Surabaya. Di bidang pendidikan penulis pada saat ini menjabat sebagai Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Merdeka Malang sedangkan dalam akademik penulis merupakan anggota Kelompok Bidang Keahlian Perangan dan Produksi dengan mengampu mata kuliah Teknologi CAD-CAM dan Pengantar Sistem Kendali.



Ir. Ike Widyastuti, ST., MT. – lahir di Malang pada tanggal 1 Oktober 1972. Penulis menyelesaikan jenjang Strata satu di bidang Teknik Mesin dari Universitas Merdeka Malang pada tahun 1996 dan jenjang Magister di bidang yang sama dari Institut Teknologi Bandung (ITB) pada tahun 2003. Telah aktif melakukan penelitian dan pengabdian masyarakat sejak diangkat menjadi dosen pada tahun 1998 hingga sekarang. Selain menjadi anggota Persatuan Insinyur Indonesia (PII) penulis juga menjadi aktif anggota Ikatan Asesor Profesional Indonesia (IASPRO) dan bergabung dalam organisasi kemasyarakatan Eco Enzim Nusantara. Saat ini penulis lebih banyak melakukan penelitian terutama dalam bidang keahlian material/metalurgi sesuai bidang kompetensi penulis, baik di dalam kampus maupun kerjasama dengan industri atau perusahaan dalam bidang rekayasa material dan *maintenance (repairing)*. Saat ini penulis menjabat sebagai Sekretaris Program Studi Teknik Mesin Universitas Merdeka Malang dan pada periode sebelumnya menjabat sebagai Kepala Bidang Pengembangan Sistem Informasi Manajemen



Dewi Izzatus Tsamroh, S.Pd., MT. – lahir di Kediri pada tanggal 07 Desember 1993. Pendidikan sarjana ditempuh di Universitas Negeri Malang pada Jurusan Pendidikan Teknik Mesin, pendidikan magister dilanjutkan pada jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Malang dengan peminatan Material. Penulis menekuni penelitian di bidang material, khususnya terkait dengan paduan aluminium. Penulis juga tertarik pada bidang material maju dan nanomaterial. Publikasi terkait dengan bidang material telah dihasilkan oleh penulis sejak tahun 2017 baik dalam bentuk jurnal, prosiding, book chapter, dan buku. Pada saat ini penulis merupakan dosen tetap Program Studi Teknik Mesin Universitas Merdeka Malang dan mulai tahun 2021 diberi kepercayaan sebagai salah satu ketua bidang di Badan Pengembangan Pendidikan dan Penjaminan Mutu Universitas Merdeka Malang.
