

Perbandingan Keutuhan Permukaan Bahan Inkonel 718 dalam Pemesinan Kriogenik dan Kering

(Surface Integrity of Inconel 718 under Cryogenic and Dry Cutting Conditions)

Muammar Faiq Azhar^{a,b}, Che Hassan Che Haron^{a,b*}, Jaharah Abdul Ghani^{a,b} & Nurul Hayati Abdul Halim^c

^aMechanical Engineering Programme,

^bCentre for Engineering Materials and Smart Manufacturing (MERCU), Faculty of Engineering & Built Environment, Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia

^cSchool of Mechanical Engineering, College of Engineering, Universiti Teknologi MARA, 40450, Shah Alam, Malaysia

*Corresponding author: chase@ukm.edu.my

Received 17 April 2023, Received in revised form 3 December 2023

Accepted 3 January 2024, Available online 30 May 2024

ABSTRACT

Inconel 718 is a nickel-based alloy that has been developed with superior mechanical strength, creep resistance, and corrosion, as well as erosion resistance at temperatures above 649 °C. It is suitable to be used for aircraft engine components such as turbine discs. However, it also has low heat conductivity and the presence of hard carbide particles in its alloy worsens the machining conditions with high cutting temperature, and high shear force and promotes work hardening. Thus, this study aims to evaluate the surface integrity of Inconel 718 in terms of surface roughness, plastic deformation, and micro-hardness alterations after the turning process. Cryogenic CO₂ cooling was supplied along the cutting process to reduce cutting temperatures and the machining performances were compared with dry machining. The experimental works show that the dry machining resulted in lower surface roughness by up to 42.15% as compared to cryogenic. However, the depth of plastic deformation under dry machining was much more severe than in cryogenic machining driven by higher cutting temperatures and pressure from the worn tool. The depth of plastic deformation became more distinct as the cutting speed increased. While the microhardness alteration of the machined surface was higher under cryogenic machining due to extensive cooling capacity by the CO₂ flow. Thus, this study reveals that cryogenic cooling during metal cutting can produce products that have better wear resistance as well as higher surface hardness.

Keywords: Cryogenic machining; Dry machining; Inconel 718; Surface integrity

ABSTRAK

Inkonel 718 adalah antara aloi nikel yang dibina dengan kekuatan mekanikal, rintangan rayapan, dan rintangan kakisan yang tinggi, serta tahan hakisan pada suhu melebihi 649 °C. Ianya seringkali digunakan dalam pembuatan komponen enjin pesawat seperti cakera turbin. Namun, sifat kekonduksian habanya yang rendah disamping kehadiran bahan zarah pelepas di dalam aloinya memburukkan kebolehmesinannya dengan penjanaan suhu pemoangan dan daya ricihan yang tinggi serta mudah berlaku pengerasan kerja semasa pemesinan. Oleh itu, kajian ini dilakukan untuk menganalisis keutuhan permukaan Inkonel 718 melalui kekasaran permukaan, ubah bentuk plastik dan kekerasan mikro di sub-permukaan yang terhasil setelah pemesinan larik. Penyejukan kriogenik CO₂ digunakan untuk mengurangkan suhu terjana dan hasil pemesinan dibandingkan dengan pemesinan kering. Kajian ini mendapati kekasaran permukaan setelah pemesinan kering adalah lebih rendah sehingga 42.15%, berbanding kriogenik. Namun

kedalaman ubah bentuk plastik dalam pemesinan kering adalah lebih ketara, terdorong dari suhu pemesinan yang tinggi beserta tekanan dari mata alat yang telah haus. Turut didapati, kedalaman ubah bentuk plastik menjadi lebih ketara seiring dengan peningkatan kelajuan pemotongan. Bagi kekerasan mikro permukaan akhir pula, jelas ianya lebih tinggi dalam pemesinan kriogenik berbanding kering disebabkan pengaruh kesan penyejukan yang ketara. Oleh itu, kesan penyejukan kriogenik ini didapati mampu menghasilkan produk yang mempunyai rintangan haus yang lebih baik dengan kekerasan akhir bahan yang lebih tinggi.

Kata Kunci: Pemesinan kriogenik; Pemesinan kering; Inkonel 718; Keutuhan permukaan

PENGENALAN

Antara bahan kerja yang sering dikaji dalam penyelidikan pemesinan logam adalah Inkonel 718. Ini kerana, Inkonel 718 adalah antara bahan yang sering digunakan untuk pembuatan komponen berputar dalam enjin turbin pesawat seperti cakera turbin. Komponen yang dibina diletakkan di kawasan paling panas di dalam enjin turbin, yang mana suhu persekitaran mampu mencecah antara 1100 hingga 1250 °C. Ciri-ciri utama yang menjadikan bahan ini sesuai digunakan adalah kekuatan jangka masa panjang, serta rintangan rayapan, kakisan dan hakisan yang tinggi pada suhu melebihi 649 °C (N.H.A. Halim et al. 2019; Liu et al. 2021). Namun, bahan ini turut dikenali dengan kebolehmesanan yang rendah. Isu utama adalah sifatnya yang mempunyai kekonduksian haba yang rendah, mudah mengeras kerja dengan perubahan suhu, serta kehadiran zarah pelelas karbida di dalam aloinya yang memendekkan hayat mata alat dengan haus yang pesat berlaku ketika pemesinan (Thakur et al. 2009). Tambahan pula, suhu tinggi pemotongan yang terjana mampu mencecah sehingga 950 °C tertumpu pada bucu mata alat akan melemahkannya. Hal ini mengakibatkan kegagalan mata alat yang mana akan menjejaskan produktiviti dan kualiti akhir bahan dimesin.

Untuk meningkatkan kebolehmesanan, penggunaan bendalir pelincir-penyejuk dalam pemesinan seperti dalam kaedah banjir diamalkan. Kaedah ini turut digunakan dalam pemesinan Inkonel 718, dan terbukti membantu kebolehmესinannya. Namun, penggunaan bendalir pemesinan dalam kuantiti yang besar ini bukan sahaja memerlukan kos yang tinggi, tetapi terbukti menjejaskan kesihatan sehingga boleh menyebabkan kanser, dermatitis dan masalah pernafasan terhadap pengendali mesin (Jawahir et al. 2016; A. Shokrani, Dhokia, & Newman 2012). Ia juga memberi kesan buruk kepada alam sekitar jika tidak dikendalikan dengan betul, serta memerlukan kos yang tinggi untuk tujuan pelupusan (Ahmad, Ghani & Haron 2022).

Oleh itu, kaedah pemesinan lestari diperkenalkan, antaranya melalui pemesinan kriogenik yang telah mula digunakan pada tahun 1919 oleh Reitz (Jawahir et al.

2016). Pemesinan kriogenik kerap menggunakan bendalir penyejuk nitrogen (LN₂), dan yang terkini adalah menggunakan karbon dioksida (CO₂). LN₂ dan CO₂ masing-masing pada suhu -196 °C dan -78.5 °C, meruap ke udara tanpa meninggalkan sisa, tidak memerlukan pembersihan selepas operasi dan lebih mesra alam (Araoyinbo et al. 2022; Jawahir et al. 2016). Dengan kesan penyejukan yang tinggi, ia sangat berpotensi menurunkan suhu pemotongan yang terjana, lantas meningkatkan kebolehmesanan bahan. Kajian terdahulu membuktikan keberkesanan pemesinan kriogenik mengurangkan suhu yang terjana dan menambahbaik hayat mata alat, serta menghasilkan permukaan pemesinan yang jauh lebih baik serta mengurangkan sisa tegasan (Bagherzadeh & Budak 2018; Chaabani et al. 2020; Kaynak 2014).

Kajian literasi mendapati penggunaan LN₂ paling kerap digunakan sebelum ini dalam kajian pemesinan kriogenik. Ini disebabkan oleh suhu penyejukannya yang sangat tinggi, dan ianya juga turut mudah didapati di pasaran. Penggunaan CO₂ pula masih baru dan memerlukan kajian terperinci yang lebih lanjut. Namun ianya didapati sangat berpotensi menggantikan LN₂ kerana suhu penyejukannya yang lebih rendah membantu mengurangkan kesan pengerasan bahan kerja terutama Inkonel 718 (Halim et al. 2020). Bahan ini cenderung mengeras kerja serta mempunyai sifat rintangan haba yang tinggi menjadi punca perubahan keutuhan permukaan seperti ubah bentuk plastik di sub-permukaan dan perubahan kekerasan permukaan (Sharman et al. 2006). Permasalahan ini adalah penting untuk dinilai kerana ia berkait rapat dengan prestasi komponen akhir terhadap hayat lesu dan sifat rintangan haus sesuatu komponen (Pusavec et al. 2011). Aspek keutuhan permukaan bahan melalui pemesinan kriogenik CO₂ ini masih kurang dilaporkan dan ia menjadi satu ruang bagi kajian ini untuk dijalankan.

Oleh itu, kajian ini memfokuskan pada pemesinan larik laju tinggi bahan Inkonel 718 menggunakan kaedah kriogenik CO₂. Penilaian kebolehmesanan dilakukan terhadap keutuhan permukaan melalui kekasaran permukaan, ubah bentuk plastik sub-permukaan dan perubahan kekerasan mikro permukaan. Prestasi pemesinan ini turut dibandingkan dengan kaedah pemesinan kering.

KAEDAH KAJIAN

Bahan kerja adalah Inkonel 718 dengan ukuran diameter 100 mm dan panjang 150 mm. Ianya telah melalui proses rawatan haba dan penuaan berganda. Kekerasan bahan adalah ± 44.8 HRC yang mana mengikut piawaian AMS

5663. Julat kekerasan ini turut dikaji pengkaji seperti Cantero et al. (2018) dan Soo et al. (2016) dalam pemesinan larik. Permukaan luar bahan kerja telah dibuang sedalam 3 mm bagi mengelakkan ketidakseragaman dari segi geometri dan kekerasan luar hasil dari proses rawatan haba dan penuaan berganda. Komposisi kimia bahan ini adalah seperti rujukan pada Jadual 1.

JADUAL 1. Komposisi bahan Inkonel 718

Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Al	Si
53	18.3	18.7	5.05	3.05	1.05	0.49	0.08
C	Mn	Co	Mg	Cu	Ca	P	B
0.051	0.23	0.30	0.0025	0.04	<0.010	<0.005	<0.004
S	Ta	Bi	Pb	Se			
<0.002	<0.05	<0.0003	<0.0005	0.0001			

Bahan mata alat adalah karbida terekat, bersalut TiAlN melalui proses salutan mendapan wap fizikal, PVD dengan saiz ukuran teknikal seperti pada Jadual 2. Bagi pemegang mata alat pula, DCLNR 2525 M12 yang dikeluarkan oleh syarikat Sandvik telah digunakan. Ianya mempunyai darjah sudut sadak -6° , yang mana sesuai bagi pemesinan bahan

Inkonel 718 khususnya pada pemesinan kemas akhir (Behera et al. 2017). Dengan menggunakan perisian Design Expert dan rekabentuk eksperimen kaedah sambutan permukaan RSM-Box Behnken, sebanyak 17 susunan larian ujikaji dibentuk merujuk pada Jadual 3.

JADUAL 2. Perincian maklumat rekabentuk mata alat

Faktor	Dimensi (mm)
Diameter bulatan terterap, D	12.70
Panjang pinggir pemotong, $L10$	12.896
Tebal mata alat, s	4.762
Jejari muncung, R_ϵ	0.80

source: Kennametal (2018)

JADUAL 3. Aras dan faktor parameter pemesinan

Faktor	Aras		
	Rendah (-1)	Tengah (0)	Tinggi (+1)
Laju Pemotongan (V_c), m/min	70	90	110
Kadar Suapan (f), mm/putaran	0.05	0.075	0.1
Dalam Pemotongan (a_p), mm	0.25	0.30	0.35

Bagi proses pemotongan, mesin larik yang digunakan adalah berjenama HURCO model TM8i, dengan keupayaan pengumpar sehingga 4000 rpm, dan kuasa sehingga 23.2 kW. Sebelum pemotongan dilakukan, semburan cecair CO_2 melalui hos keluli dan muncung yang diperbuat dari kuprum dilakukan tepat ke arah muka rusuk mata alat. Muka rusuk dipilih kerana semburan melalui muka sadak

akan terhalang dengan pembentukan serpihan (Shokrani et al. 2019). Jarak antara penghujung muncung ke kawasan pemotongan adalah sebanyak 20 mm. Rajah 1 menunjukkan kedudukan mesin dan peralatan bagi saluran penyejuk kriogenik yang ditetapkan.



RAJAH 1. Susun atur mesin larik dan peralatan saluran kriogenik

Bagi persediaan sampel metalurgi, pemotongan “*grooving*” dan “*parting*” dilakukan bagi mendapatkan sampel berbentuk cincin, yang kemudiannya dipotong kepada ukuran kecil mengikut piawai ASTM E3-95. Setelah itu, sampel dicagak panas menggunakan serbuk *bakelite* pada suhu 180 °C dan tekanan 250 bar selama 15 minit. Proses canai dan gilap turut dilakukan bagi mendapatkan permukaan sampel yang licin tanpa sebarang kesan calar (mengikut kepada ASTM E3-95 2001). Permukaan sampel telah direndam ke dalam campuran kimia punar *Kalling's No. 2* (ASTM E407-95) selama 15 saat.

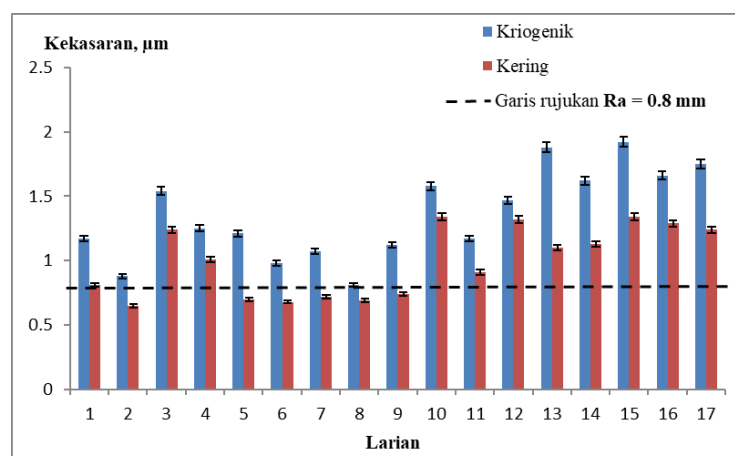
Bagi kekasaran permukaan, ia diukur menggunakan pengukur kekasaran permukaan jenama Mitutoyo, model SJ-310. Spesifikasi dan tetapan pada mesin mengikut ISO 4288 (2) 1996, dengan panjang pengukuran (*cut-off length*) 0.8 mm. Pengukuran diambil sebanyak tiga kali pada tempat yang berbeza, kemudian dinilai secara purata. Bagi menganalisa dan mengukur kedalaman ubah bentuk plastik, mesin mikroskop optik berjenama Olympus BX 51 M digunakan. Setelah itu, kekerasan mikro diukur

menggunakan mesin pengukuran kekerasan mikro Vicker dengan beban 500 g selama 10 saat. Ukuran bermula dari jarak menghampiri permukaan luar termesin sehingga ke dalam bahan yang akan mencapai nilai kekerasan asal bahan. Berat beban yang dipilih ini selari dengan pengkaji bagi bahan Inkonel 718 terdahulu.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

KEKASARAN PERMUKAAN

Dari Rajah 2, dapat dilihat kekasaran permukaan dari kesemua larian pemesinan kriogenik adalah lebih tinggi berbanding pemesinan kering, iaitu di antara 10.20% hingga 42.15%. Nilai kekasaran yang terhasil juga melebihi 0.8 mm, iaitu nilai maksimum kekasaran permukaan yang diperlukan bagi kualiti akhir penghasilan komponen enjin pesawat (Kappmeyer et al. 2012). Pemesinan kaedah kering pula menghasilkan permukaan yang lebih baik terutamanya larian 2, 5, 6, 7, 8 dan 9.



RAJAH 2. Perbandingan kekasaran permukaan antara pemesinan kriogenik dan kering

Dapatan kajian ini didapati selari dengan pengkaji-pengkaji terdahulu dalam pemesinan larik Inkonel 718 menggunakan kaedah kriogenik dan kering (Fernandez et al. 2014; Pereira & Delijaicov 2019). Hal ini berlaku disebabkan kesan penyejukan kriogenik pada permukaan bahan kerja yang berterusan menjadikan ia lebih keras dan terkedap dan seterusnya lebih sukar untuk dimesin. Kesan dari pengerasan pada bahan kerja ini akan menghasilkan kekasaran permukaan yang tinggi. Menurut Pereira & Delijaicov (2019), pengerasan bahan kerja melalui penyejukan kriogenik menyebabkan daya pemotongan yang diperlukan adalah lebih tinggi. Fenomena ini memberikan kesan negatif terhadap keteguhan ketika pemesinan berjalan, yang mana menyebabkan getaran yang ketara dan menjejaskan kekasaran permukaan yang terhasil.

Bagi pemesinan kering pula, jelas pengerasan bahan kerja tidak berlaku. Tetapi, ia menyebabkan bahan kerja terdedah pada suhu pemotongan yang tinggi. Ini menyebabkan berlakunya darjah pelembutan haba yang tinggi yang melembutkan bahan kerja dan seterusnya memudahkan proses pemotongan. Bahan kerja yang lebih lembut dan mudah dipotong ini akan menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih baik (Kadam & Pawade 2017). Walau bagaimanapun, dapatan ini dilihat bertentangan dengan pengkaji terdahulu seperti Khanna et al. (2020), dan Musfirah et al. (2017) yang turut mengkaji kesan penyejukan kriogenik ke atas Inkonel 718. Ia dipercayai berlaku kerana di dalam kajian ini, semburan kriogenik dikenakan terus pada kawasan perantara rusuk mata alat dan bahan kerja. Disebabkan itu, bahan kerja mengalami kesan penyejukan melampau secara berterusan dan mengeras sepanjang proses pemesinan berjalan. Bagi pengkaji terdahulu pula, semburan penyejuk dihalakan terus pada kawasan perantara mata alat dan serpihan. Oleh itu, kesan penyejukan yang berterusan ke atas bahan kerja dapat dielakkan dan permukaan pemesinan yang lebih baik dapat dihasilkan. Jadi, kajian ini menunjukkan bahawa pemilihan kaedah penyemburan penyejukan kriogenik

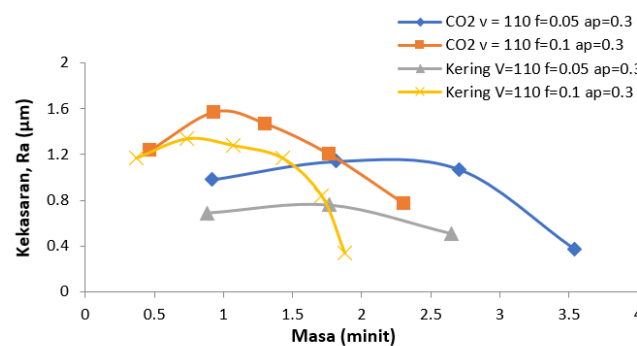
adalah amat penting dan perlu diberi perhatian bagi meminimumkan kesan negatifnya ke atas bahan kerja.

Rajah 3 hingga 6 menunjukkan perbandingan kekasaran permukaan pada nilai kadar suapan dan kelajuan pemotongan berbeza bagi kaedah kriogenik dan kering. Data ini direkodkan pada setiap hentian bermula dari awal pemotongan sehingga mata alat mencapai had haus $VB = 0.3$ mm. Dapat dilihat kekasaran permukaan sangat terkesan terhadap perubahan kadar suapan dan kelajuan pemotongan. Dari Rajah 3 dan 4, jelas terlihat peningkatan kadar suapan meningkatkan kekasaran permukaan, manakala pengurangan kadar suapan menghasilkan yang sebaliknya. Secara langsung, penghasilan kekasaran ini menurut pada asas Persamaan 1 bagi proses kisar:

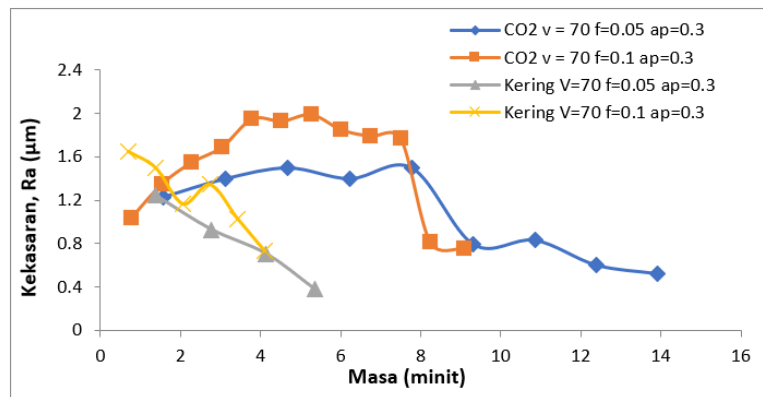
$$h = \frac{f^2}{8r} \quad (1)$$

di mana h adalah tinggi puncak pada jalur suapan atau maksimum kekasaran, f adalah kadar suapan, dan r adalah jejari muncung mata alat. Jelas secara teori, kekasaran permukaan amat bergantung pada nilai kadar suapan yang ditetapkan. Ini selari dengan Yazid (2014) yang turut mendapati apabila kadar suapan meningkat, tinggi puncak pada jalur suapan turut meningkat, maka menjadi punca peningkatan kekasaran permukaan. Menurut Patil et al. (2014), kekasaran permukaan tinggi pada kadar suapan yang tinggi adalah disebabkan berlakunya kerosakan permukaan yang ketara pada permukaan yang dimesin.

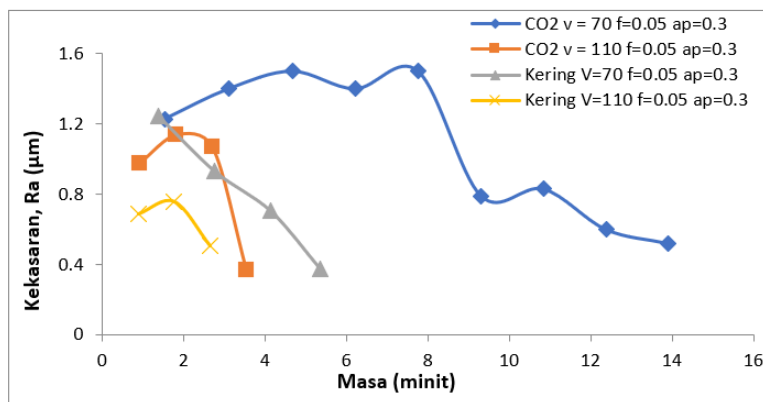
Namun begitu, tren berbeza didapati berlaku pada perubahan kelajuan pemotongan seperti dalam Rajah 5 dan 6. Peningkatan kelajuan pemotongan menghasilkan kekasaran permukaan yang rendah, manakala kelajuan yang rendah menghasilkan yang sebaliknya. Pada kelajuan yang tinggi, suhu pemotongan akan meningkat dan menyebabkan pelembutan haba terjadi ke atas bahan kerja. Permukaan bahan yang telah melembut ini akan menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih rendah (Kadam & Pawade 2017; Othman et al. 2022).



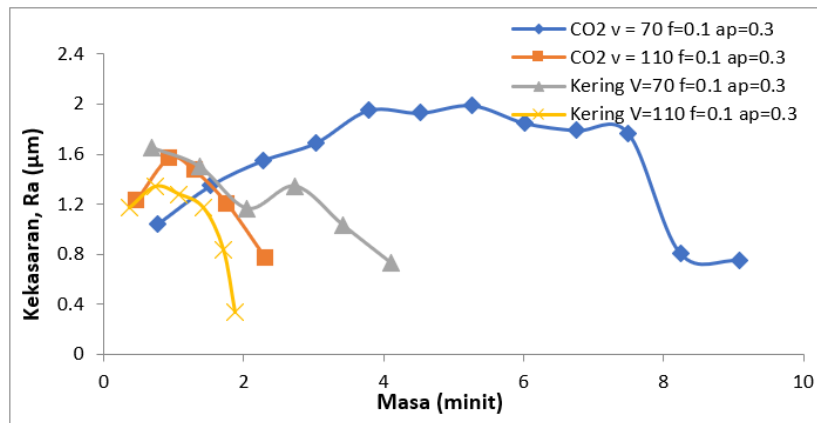
RAJAH 3. Kesan kadar suapan terhadap kekasaran permukaan pada $V_c = 110$ m/min



RAJAH 4. Kesan kadar suapan terhadap kekasaran permukaan pada $V_c = 70$ m/min



RAJAH 5. Kesan kadar suapan terhadap kekasaran permukaan pada $f = 0.05$ mm/pusingan



RAJAH 6. Kesan kadar suapan terhadap kekasaran permukaan pada $f = 0.1$ mm/pusingan

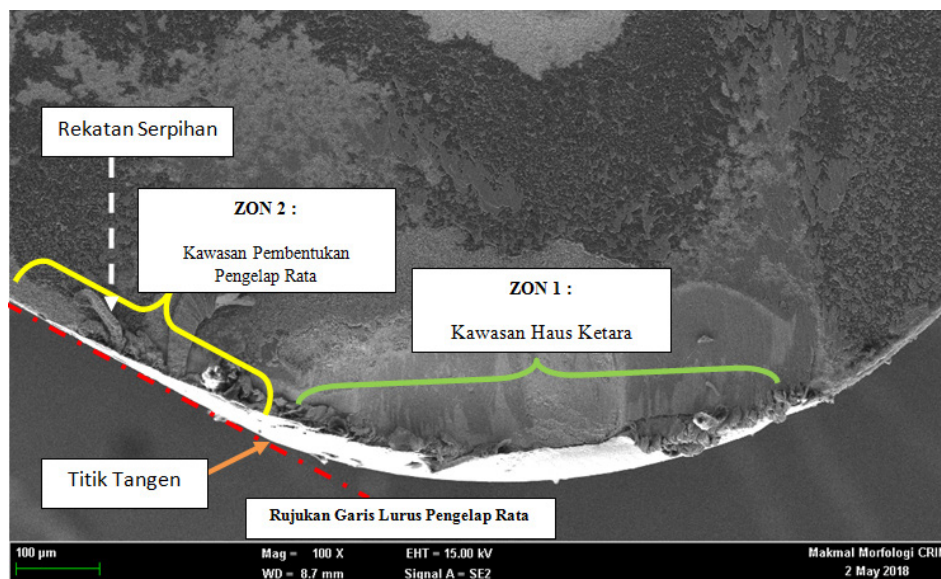
Selain itu, dapat dilihat dari Rajah 3 hingga 6, rekod perjalanan kekasaran ini cenderung untuk meningkat pada awal pemesinan. Ini disebabkan rekatan mata alat yang telah mula terbentuk di awal pemesinan. Pembentukan lapisan rekatan yang ketara berlaku sepanjang pemotongan turut menyebabkan pembentukan kekasaran yang kurang stabil pada jangka masa pertengahan pemesinan. Turut

dapat dilihat bacaan kekasaran permukaan di awal pemotongan adalah lebih tinggi daripada nilainya di akhir pemesinan. Menurut Yazid (2014), ini disebabkan jejari lengkungan muncung mata alat menjadi lebih besar dan pinggir pemotongan lebih licin menyebabkan kekasaran menjadi lebih rendah. Tambahan pula, rekatan bahan kerja pada muncung mata alat turut memberikan kesan terhadap

kekasaran permukaan. Namun begitu, Sharman et al. (2006) dan Soo et al. (2016) mendapati bahawa kekasaran permukaan yang rendah pada akhir pemesisan berlaku disebabkan fenomena pembentukan pengelap rata (*wiper flat formation*) pada muncung mata alat. Kawasan pengelap rata ini berada jauh dari muncung yang telah haus. Kesan puncak suapan pada permukaan terhasil dari muncung yang telah haus kemudiannya mengurang setelah kawasan pengelap rata memotong permukaan tersebut. Apabila puncak kesan suapan mengurang, kekasaran permukaan menjadi lebih rendah.

Penelitian terhadap mata alat dilakukan pada pandangan sadak mata alat seperti dalam Rajah 7. Pembentukan pengelap rata mata alat ini didapati berlaku pada zon 2 muncung mata alat. Geometri muncung pada zon 2 didapati keseluruhannya menyentuh rujukan garis lurus dan garisan tersebut tidak menjadi tangen dari muncung mata alat. Ini menunjukkan bahawa kawasan tersebut adalah rata dan lurus. Zon 2 terpisah apabila rujukan garisan lurus menjadi tangen dengan muncung mata alat, bermula dari pertemuan

rujukan garis lurus dan titik tangen. Zon 1 adalah kawasan berlakunya haus rusuk yang dominan dan mencapai had haus mata alat. Pada setiap larian pemotongan, ia didahului dengan pemotongan dari muncung berada pada zon 1. Setelah itu, pemotongan diekori muncung alat pada zon 2 yang kemudiannya membersihkan permukaan terdahulu dengan rata dan kekasaran permukaan menjadi rendah. Pemotongan berlaku pada zon 2 dapat dibuktikan dengan kehadiran rekatan serpihan terkimpal sepanjang muncung mata alat pada kawasan tersebut. Penjelasan ini menunjukkan bahawa pembentukan pengelap rata ini adalah seiring dengan Sharman et al. (2006) dan Soo et al. (2016). Tambahan pula, ukuran jejari muncung menjadi lebih besar dan permukaan sentuhan antara mata alat dan bahan kerja meningkat apabila muncung alat menjadi rata. Melalui rujukan pada Persamaan 1 menunjukkan apabila ukuran jejari muncung meningkat, kekasaran permukaan akan menjadi lebih rendah. Hal ini juga menjadi faktor kekasaran permukaan yang rendah didapatkan pada mata alat yang telah haus seperti dari kajian (Abu Yazid 2014).

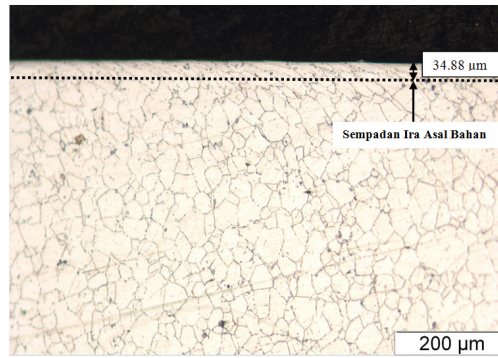


RAJAH 7. Pembentukan pengelap rata pada muncung mata alat

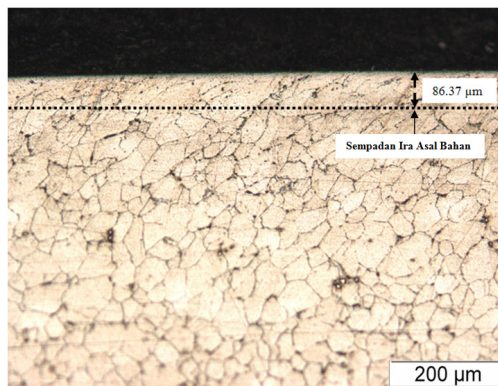
UBAH BENTUK SUB-PERMUCAAAN DALAM PEMESINAN KRIOGENIK DAN KERING

Penilaian terhadap perubahan sub-mikro permukaan termesin adalah penting disebabkan sifat bahan Inkonel 718 yang cenderung berlaku pengerasan kerja. Rajah 8 hingga 11 jelas menunjukkan berlakunya perubahan pada sub-mikro permukaan Inkonel 718 pada kesemua sampel

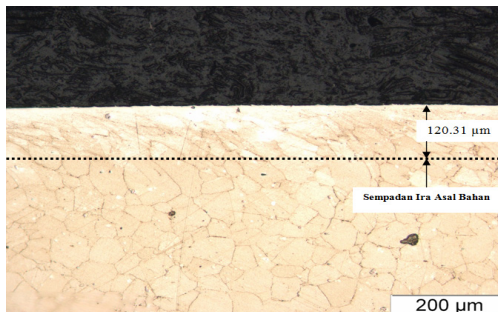
pemesisan kriogenik dan kering dengan perubahan arah herotan hablur atau ira bahan. Hal ini berlaku disebabkan geseran antara permukaan sadak dan rusuk mata alat pada permukaan baru bahan kerja dan menyebabkan berlaku herotan hablur (Zhou et al. 2011). Perbezaan kedalaman ubah bentuk plastik ini dipermudahkan dengan jelas merujuk pada Rajah 12.



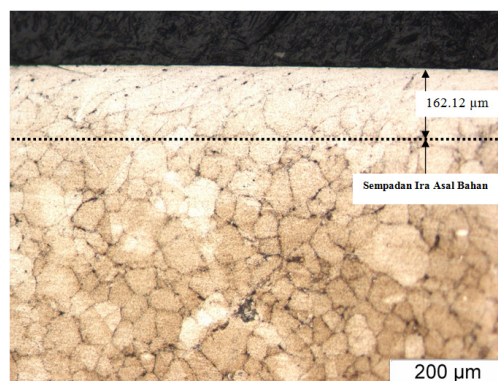
RAJAH 8. Ubah bentuk sub-permukaan pemesinan kriogenik pada $V_c = 70$ m/min, $f = 0.05$ mm/pusingan dan $ap = 0.3$ mm



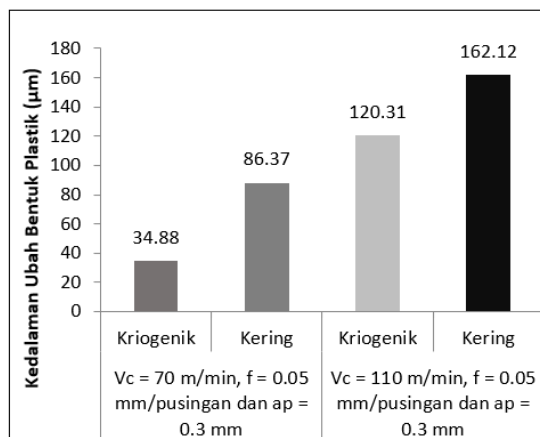
RAJAH 9. Ubah bentuk sub-permukaan pemesinan kering pada parameter $V_c = 70$ m/min, $f = 0.05$ mm/pusingan dan $ap = 0.3$ mm



RAJAH 10. Ubah bentuk sub-permukaan pemesinan kriogenik pada parameter $V_c = 110$ m/min, $f = 0.05$ mm/pusingan dan $ap = 0.3$ mm



RAJAH 11. Ubah bentuk sub-permukaan pemesinan kering pada parameter $V_c = 110$ m/min, $f = 0.05$ mm/pusingan dan $ap = 0.3$ mm



RAJAH 12. Perbezaan kedalaman ubah bentuk plastik sub-permukaan

Kedalaman ubah bentuk plastik didapati lebih kecil pada pemesinan kriogenik berbanding kering. Ubah bentuk plastik pada pemesinan kering berlaku sehingga kedalaman 86.37 µm (Rajah 9) dan 162.12 µm (Rajah 11). Manakala bagi pemesinan kriogenik pula antara 34.88 µm (Rajah 8) dan 120.31 µm (Rajah 10). Jelas disini pemesinan kriogenik dapat mengurangkan kesan ubah bentuk plastik melalui kesan penyejukan yang disalurkan ketika pemesinan. Suhu pemesinan yang lebih tinggi beserta tekanan dari mata alat yang telah haus adalah penyebab utama kepada ubah bentuk plastik yang lebih dalam selepas pemesinan kering. Dapatan ini seiring dengan pengkaji lain yang menjalankan pemesinan kriogenik bahan Inkonel 718 seperti Haron et al. (2021), dan Musfirah et al. (2017).

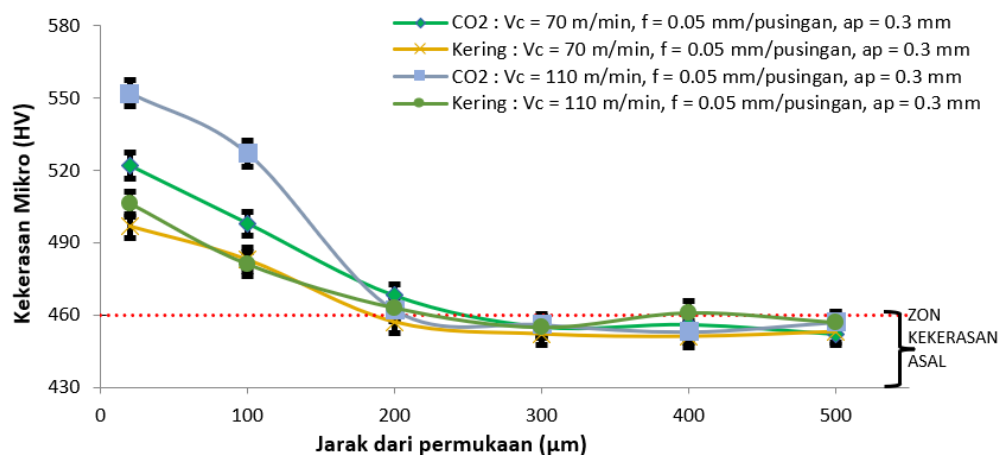
Turut didapati, kedalaman ubah bentuk plastik meningkat seiring dengan peningkatan kelajuan pemotongan pada kedua-dua kaedah pemesinan. Pada laju tinggi, lebih haba yang terjana yang meningkatkan suhu di sekitar kawasan pemotongan. Inkonel 718 yang

mempunyai kekonduksian haba yang rendah menyebabkan ia mengalami pelembutan haba yang tinggi di mana herotan ira struktur mikro bahan lebih mudah berlaku. Jelas di sini, ubah bentuk plastik semasa pemesinan dapat dikurangkan melalui penyejukan kriogenik yang seterusnya menambahbaik kualiti akhir produk.

KEKERASAN SUB-MIKRO PERMUKAAN TERMESIN

Menurut Ulutan & Ozel (2011), peningkatan kekerasan permukaan selepas pemesinan adalah permasalahan yang rumit terhasil dari kesan ubah bentuk plastik selepas pemesinan. Jadi, penilaian keatas kekerasan mikro di sub-permukaan Inkonel 718 selepas pemesinan adalah penting kerana sifatnya yang cenderung mengeras kerja. Dengan merujuk pada Rajah 13, didapati nilai pertambahan kekerasan mikro bahan kerja menurun dengan peningkatan jarak dari permukaan dimesin, hingga ia mencapai kekerasan asal bahan iaitu antara 450 hingga 460 HV. Kekerasan mikro selepas pemesinan kriogenik adalah lebih tinggi iaitu meningkat sehingga 16.67% berbanding kekerasan asalnya. Manakala pemesinan kering pula meningkat sehingga 9.09%. Hal ini disebabkan berlakunya pelembutan haba yang rendah dan pemulihan ira bahan kerja apabila penyejukan CO₂ disalurkan, lalu permukaan bahan menjadi lebih keras. Nilai yang lebih rendah selepas pemesinan kering pula kerana bahan kerja mengalami pelembutan haba yang ketara dan mudah berlaku perubahan pada mikrostrukturnya.

Kebanyakan pengkaji bersetuju peningkatan kekerasan mikro bahan Inkonel 718 selepas pemesinan adalah baik kerana ia meningkatkan sifat rintangan haus serta hayat lesu sesuatu komponen dan seterusnya memanjangkan lagi jangka hayatnya (Pawade et al. 2008; Touazine et al. 2017).



RAJAH 13. Kekerasan mikro permukaan bahan

KESIMPULAN

Penilaian terhadap keutuhan permukaan bagi kekasaran permukaan mendapati pemesinan kriogenik menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih tinggi berbanding pemesinan kering sehingga 42.15%. Pada pemesinan kriogenik, kekasaran permukaan yang terhasil adalah antara 0.81 μm dan 1.92 μm . Pada pemesinan kering pula antara 0.65 μm dan 1.34 μm . Kekerasan permukaan yang lebih rendah dalam pemesinan kering disebabkan peningkatan kekerasan permukaan yang berlaku pada keadaan pemesinan kriogenik. Ini kerana kaedah semburan CO_2 dilakukan pada kawasan perantara muka rusuk dan bahan kerja. Perkara ini meningkatkan kecenderungan untuk bahan kerja mengeras, memburukkan haus mata alat dan seterusnya menghasilkan kekasaran permukaan yang tinggi. Namun begitu, kesan pemesinan terhadap ubah bentuk plastik sub-permukaan bahan kerja adalah dapat ditambahbaik melalui pemesinan kriogenik berbanding pemesinan kering. Dalam pada itu, penilaian terhadap kekerasan mikro sub-permukaan menunjukkan pemesinan kriogenik menghasilkan permukaan yang lebih keras sehingga 16.67% berbanding kekerasan asal bahan kerja. Manakala pemesinan kering meningkat sehingga 9.09%. Ini menunjukkan kesan yang baik daripada pemesinan kriogenik, di mana penjanaan permukaan yang lebih tinggi akan memberikan rintangan haus dan meningkatkan hayat lesu bagi komponen enjin pesawat.

PENGHARGAAN

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) atas sokongan terhadap kertas penyelidikan ini melalui geran penyelidikan GUP-2017-094.

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Abu Yazid, M.Z. 2014. *Kebolehmesinan Inconel 718 pada Pemesinan Laju Tinggi dalam Keadaan Kuantiti Pelincir Minima*. Jabatan Mekanikal dan Bahan: Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Ahmad, Ahsana Aqilah, Jaharah, A. Ghani, & Che Hassan Che Haron. 2022. Potential of bio-metal cutting fluid from treated recycled cooking oil for metal cutting fluid application. *Journal of Mechanical Engineering* 19(1): 83–97.
- A.H. Musfirah, Jaharah Abdul Ghani & Che Hassan Che Haron. 2017. Tool wear and surface integrity of inconel 718 in dry and cryogenic coolant at high cutting speed. *Wear* 376–377: 125–133. DOI:http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164817301060.
- Araoyinbo, Alaba Oladeji et al. 2022. Influence of cutting fluid on machining processes: A review. *Jurnal Kejuruteraan* 34(3): 365–73.
- Bagherzadeh, Amin, & Erhan Budak. 2018. Investigation of machinability in turning of difficult-to-cut materials using a new cryogenic cooling approach. *Tribology International* 119: 510–520. DOI:https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.11.033.
- Behera, Bikash Chandra, Habtamu Alemayehu, Sudarsan Ghosh & Venkateswara R.P. 2017. A comparative study of recent lubri-coolant strategies for turning of ni-based superalloy. *Journal of Manufacturing Processes* 30: 541–552. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.10.027.
- Cantero José Luis et al. 2018. High speed finish turning of inconel 718 using PCBN tools under dry conditions. *Metals* 8(3).
- Chaabani, S. et al. 2020. Comparison between cryogenic coolants effect on tool wear and surface integrity in finishing turning of inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology* 285: 116780.
- Che Hassan Che Haron, Jaharah Abdul Ghani, Nurul Hayati Abdul Halim & Badroush, N. 2021. Microstructure and microhardness alterations of inconel 718 under cryogenic cutting. *Journal of Mechanical Engineering* 18(2): 51–64.
- Fernandez, David, Virginia Garcia Navas, Alejandro Sanda, & Ion Bengoetxea. 2014. Comparison of machining inconel 718 with conventional and sustainable coolant. *MM Science Journal* 4: 506–510. DOI:http://www.mmscience.eu/december-2014.html#201415.
- Jawahir, I.S. et al. 2016. Cryogenic manufacturing processes. *CIRP Annals Manufacturing Technology* 65(2): 713–36. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.007.
- Kadam, Ganesh S. & Raju, S. Pawade. 2017. Surface integrity and sustainability assessment in high-speed machining of inconel 718: An eco-friendly green approach. *Journal of Cleaner Production* 147: 273–83. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.104.
- Kappmeyer, Gregor et al. 2012. Modern machining of advanced aerospace alloys-enabler for quality and performance. *Procedia CIRP* 1(1): 28–43.

- Khanna, Navneet, Prassan Shah & Chetan. 2020. Comparative analysis of dry, flood, MQL and cryogenic CO₂ techniques during the machining of 15-5-ph SS alloy. *Tribology International* 146: 106196. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106196>.
- Liu, Chun, Min Wan, Weihong Zhang & Yun Yang. 2021. Chip formation mechanism of inconel 718: A review of models and approaches. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)* 34(1).
- Nurul Hayati Abdul Halim, Che Hassan Che Haron, Jaharah Abdul Ghani & M.F. Azhar. 2019. Tool wear and chip morphology in high-speed milling of hardened inconel 718 under dry and cryogenic CO₂ conditions. *Wear* 426–427: 1683–90.
- Nurul Hayati Abdul Halim, Che Hassan Che Haron & Jaharah Abdul Ghani. 2020. Sustainable machining of hardened inconel 718: A comparative study. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 21: 1375–1387.
- Patil, N.G. et al. 2014. Comparative study of high speed machining of inconel 718 in dry condition and by using compressed cold carbon dioxide gas as coolant. *Procedia CIRP* 24: 86–91.
- Pawade, R.S., Suhas, S.J & Brahmanekar, P.K. 2008. Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity of high-speed turned inconel 718. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 48(1): 15–28.
- Pereira, Willians Heleno & Sergio Delijaicov. 2019. Surface integrity of inconel 718 turned under cryogenic conditions at high cutting speeds. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 104(5–8): 2163–2177.
- Pusavec, F., Hamdi, H., Kopac, J. & Jawahir, I.S. 2011. Surface integrity in cryogenic machining of nickel based alloy: Inconel 718. *Journal of Materials Processing Tech.* 211(4): 773–783. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.013>.
- Sein Leung Soo et al. 2016. High speed turning of inconel 718 using PVD-coated PCBN tools. *CIRP Annals: Manufacturing Technology* 65(1): 89–92. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.044>.
- Sharman, A.R.C., Hughes, J.I. & Ridgway, K. 2006. An analysis of the residual stresses generated in inconel 718 when turning. *Journal of Materials Processing Technology* 173(3): 359–367.
- Shokrani, A., Dhokia, V. & Newman, S.T. 2012. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 57: 83–101.
- Shokrani, A., Ihsan Al-Samarrai & Stephen, T.N. 2019. Hybrid cryogenic MQL for improving tool life in machining of ti-6al-4v titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes* 43: 229–243. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.05.006>.
- Tahrin Othman et al. 2022. Surface roughness in high speed turning of alloy steel m303 using carbide tools in dry cutting condition. *Jurnal Kejuruteraan* 34(6): 1169–1173.
- Thakur, D.G., Ramamoorthy, B. & Vijayaraghavan, L. 2009. Machinability investigation of inconel 718 in high-speed turning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 45(5–6): 421–429.
- Touazine, Heithem, Mohammad Jahazi & Philippe Bocher. 2017. Accurate determination of damaged subsurface layers in machined inconel 718. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 88(9–12): 3419–3427. DOI:<http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9039-9>.
- Ulutun, Durul & Tugrul Ozel. 2011. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51(3): 250–280. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.11.003>.
- Yusuf Kaynak. 2014. Evaluation of machining performance in cryogenic machining of inconel 718 and comparison with dry and MQL machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 72(5): 919–933.
- Zhou, J.M. et al. 2011. Effects of tool wear on subsurface deformation of nickelbased superalloy. *Procedia Engineering* 19: 407–413. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.133>.