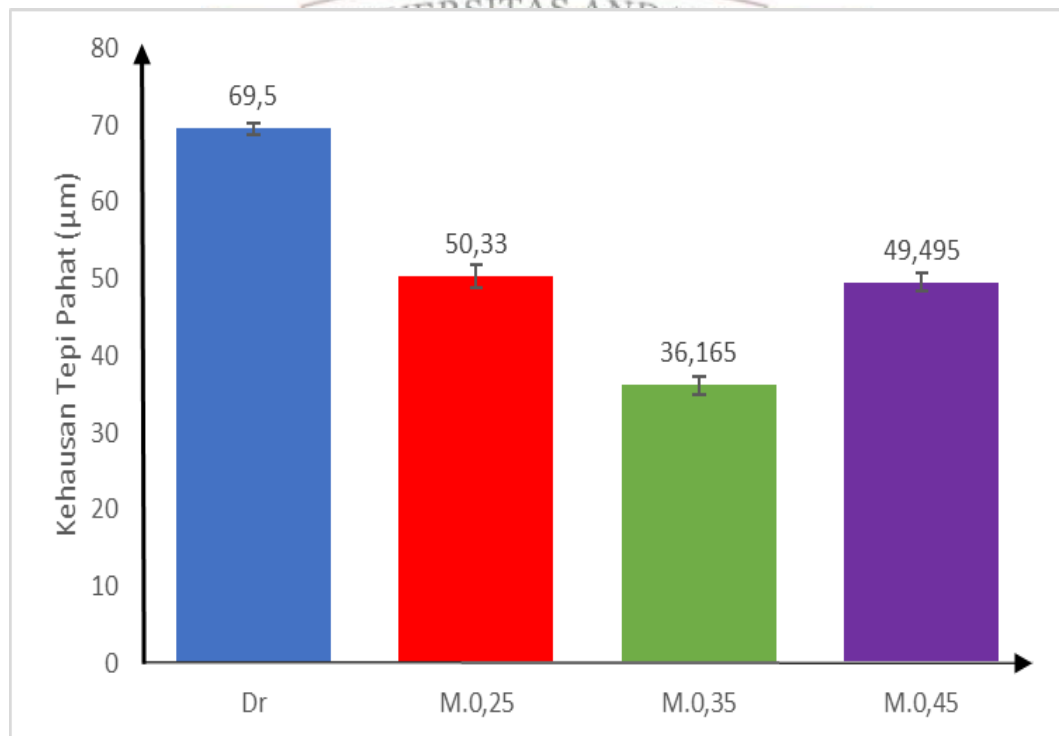


BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengaruh Konsentrasi Nanopartikel MXene Pada *Coolant* Berbasis WBL terhadap Keausan Pahat (VB)

Untuk mengetahui pengaruh variasi konsentrasi nanopartikel MXene dalam sistem MQL terhadap keausan pahat pada pemesian baja karbon menengah, dilakukan pengukuran keausan tepi (*flank wear*, VB) pada setiap kelompok *coolant*. Perbandingan nilai rata-rata VB antar kelompok *coolant* disajikan pada Gambar 4.1, sedangkan data hasil pengukuran lengkap disajikan pada Lampiran B.



Gambar 4.1 Perbandingan Keausan Pahat (VB) antar Kelompok *coolant*

Berdasarkan Gambar 4.1, terlihat adanya perbedaan nilai rata-rata keausan pahat (VB) pada setiap variasi *coolant* yang digunakan. Kelompok Dromus (kontrol) menunjukkan nilai rata-rata VB tertinggi, yang mengindikasikan tingkat keausan pahat paling besar selama proses pembubutan. Sebaliknya, penggunaan *coolant* berbasis *water-based lubricant* (WBL) yang ditambahkan nanopartikel MXene menghasilkan nilai keausan yang lebih rendah dibandingkan kelompok kontrol. Di antara seluruh variasi konsentrasi yang diuji, WBL+MXene 0,35% menghasilkan nilai rata-rata VB terendah, sedangkan WBL+MXene 0,25% dan

WBL+MXene 0,45% menunjukkan nilai keausan yang relatif berdekatan dan masih lebih rendah dibandingkan Dromus. Secara umum, pola pada grafik menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel MXene ke dalam *coolant* MQL mampu menurunkan keausan pahat, dengan konsentrasi 0,35% memberikan performa *coolant* yang paling optimum.

Meskipun secara visual perbedaan nilai rata-rata keausan pahat telah terlihat pada grafik, diperlukan analisis statistik untuk memastikan bahwa perbedaan tersebut benar-benar disebabkan oleh variasi konsentrasi nanopartikel MXene dan bukan oleh variasi acak hasil pengukuran. Oleh karena itu, dilakukan analisis ragam (*One-Way Analysis of Variance* atau ANOVA) untuk menguji pengaruh variasi konsentrasi MXene terhadap nilai keausan pahat (VB). Hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil ANOVA Satu Arah Keausan Pahat (VB)

Source	F-Value	P-Value
Perlakuan	568,88	0,00004

Hasil analisis ANOVA pada Tabel menunjukkan bahwa faktor perlakuan memiliki nilai Fhitung sebesar 568,88 dengan P-value sebesar 0,00004 ($4,0 \times 10^{-5}$). Nilai P-value tersebut jauh lebih kecil daripada taraf signifikansi yang digunakan ($\alpha = 0,05$), sehingga hipotesis nol (H_0) ditolak. Selain itu, apabila dibandingkan dengan Ftabel sebesar 6,591, diperoleh Fhitung (568,88) > Ftabel (6,591), yang semakin menguatkan keputusan untuk menolak H_0 . Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa variasi konsentrasi nanopartikel MXene memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai keausan pahat (VB). Hal ini menunjukkan bahwa perbedaan rata-rata nilai VB pada setiap variasi konsentrasi bukan terjadi karena variasi acak, melainkan dipengaruhi secara nyata oleh perlakuan yang diberikan. Hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil Uji Lanjut Tukey HSD Keausan Pahat (VB)

Perbedaan Tingkat	Perbedaan Rata-rata	P-Value
Dromus Vs MXene 0,25%	19,17	0,000
Dromus Vs MXene 35%	33,34	0,000
Dromus Vs MXene 45%	20,01	0,000
MXene 25% Vs MXene 35%	14,16	0,001
MXene 25% Vs MXene 45%	0,84	0,882
MXene 45% Vs MXene 35%	13,33	0,001

Untuk mengetahui kelompok perlakuan yang berbeda nyata, analisis dilanjutkan menggunakan uji lanjut Tukey Honestly Significant Difference (HSD) pada taraf kepercayaan 95%. Hasil uji Tukey menunjukkan bahwa kelompok Dromus (kontrol) memiliki nilai rata-rata keausan pahat tertinggi, yaitu 69,50 μm , dan berada pada kelompok A, sehingga berbeda nyata dengan seluruh perlakuan yang menggunakan *coolant* berbasis WBL+MXene. Kelompok WBL+MXene 0,25% memiliki rata-rata keausan pahat sebesar 50,33 μm , sedangkan WBL+MXene 0,45% sebesar 49,50 μm . Kedua perlakuan tersebut berada pada kelompok B, yang menunjukkan bahwa keduanya tidak berbeda nyata satu sama lain. Namun, kedua kelompok tersebut berbeda nyata terhadap kelompok Dromus (A) maupun WBL+MXene 0,35% (C).

Kelompok WBL+MXene 0,35% menghasilkan nilai rata-rata keausan pahat paling rendah, yaitu 36,17 μm , dan berada pada kelompok C. Pengelompokan ini menunjukkan bahwa perlakuan WBL+MXene 0,35% berbeda nyata terhadap seluruh perlakuan lainnya, sehingga memberikan performa terbaik dalam menekan keausan pahat pada kondisi pemotongan yang digunakan dalam penelitian ini. Perbedaan antarperlakuan ditunjukkan oleh notasi huruf pada hasil uji Tukey, di mana perlakuan yang memiliki huruf berbeda menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel MXene ke dalam *coolant* berbasis *Water Based Lubricant* (WBL) mampu meningkatkan kemampuan *coolant* pada proses pembubutan dengan *sistem minimum quantity lubrication* (MQL). Penurunan keausan pahat diduga terjadi karena MXene memiliki struktur berlapis (*layered structure*) dan koefisien gesek yang rendah, sehingga dapat membentuk tribofilm pada bidang kontak antara pahat dan benda kerja. Lapisan ini mengurangi kontak langsung antarpermukaan, menurunkan gaya gesek, serta menghambat peningkatan temperatur di zona pemotongan. Akibatnya, laju keausan pahat menjadi lebih rendah dibandingkan penggunaan *coolant* Dromus tanpa penambahan nanopartikel.

Berdasarkan hasil uji Tukey, konsentrasi MXene sebesar 0,35% merupakan konsentrasi yang memberikan performa *coolant* paling efektif, karena menghasilkan keausan pahat yang secara signifikan lebih rendah dibandingkan Dromus, WBL+MXene 0,25%, maupun WBL+MXene 0,45%. Sementara itu, penggunaan MXene pada konsentrasi 0,25% dan 0,45% memberikan tingkat keausan yang setara secara statistik, sehingga peningkatan konsentrasi dari 0,25% menjadi 0,45% belum memberikan penurunan keausan pahat yang signifikan pada kondisi pemotongan yang diterapkan dalam penelitian ini.

Penurunan keausan pahat pada kelompok WBL+MXene 0,25% dan 0,35% dibandingkan Dromus dapat dijelaskan melalui mekanisme tribologi yang berkaitan dengan karakteristik struktur MXene itu sendiri. MXene memiliki struktur berlapis (*layered structure*) yang antarlapisnya memiliki gaya ikat lemah sehingga mudah mengalami pergeseran (*shear*) satu sama lain ketika berada di antara dua permukaan yang saling bergesekan. Sifat inilah yang mendasari kemampuan

MXene membentuk tribofilm pada bidang kontak antara pahat dan benda kerja. Tribofilm yang terbentuk berfungsi sebagai lapisan pemisah yang mengurangi kontak logam-ke-logam secara langsung, sehingga koefisien gesek pada zona pemotongan menurun. Penurunan koefisien gesek ini berdampak langsung pada penurunan panas yang dihasilkan akibat gesekan, sehingga temperatur pemotongan dapat ditekan. Mengingat keausan tepi sangat dipengaruhi oleh kombinasi gesekan mekanis dan degradasi termal pada material pahat, penurunan temperatur dan gesekan ini secara langsung berkontribusi pada perlambatan laju keausan. Penjelasan mekanistik ini konsisten dengan hasil penelitian ini, di mana kelompok 0,25% dan 0,35% yang keduanya berbeda nyata terhadap Dromus pada uji Tukey menunjukkan bahwa mekanisme pembentukan tribofilm dan penurunan gesekan tersebut memang benar-benar terjadi dan berdampak nyata terhadap penurunan keausan pahat, bukan sekadar prediksi teoritis semata.

Fenomena menariknya adalah peningkatan konsentrasi MXene dari 0,35% menjadi 0,45% justru tidak memberikan perbaikan lebih lanjut, melainkan membuat nilai keausan kembali meningkat hingga setara dengan konsentrasi 0,25%, sebagaimana dikonfirmasi oleh uji Tukey. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui mekanisme yang berkaitan dengan perilaku dispersi nanopartikel pada konsentrasi tinggi. Pada konsentrasi nanopartikel yang lebih tinggi, kecenderungan terjadinya aglomerasi antarpartikel MXene menjadi lebih besar akibat gaya tarik-menarik antarpartikel (*van der Waals*) yang semakin dominan ketika jarak antarpartikel dalam suspensi semakin rapat. Aglomerat yang terbentuk berukuran jauh lebih besar dibandingkan partikel individual, sehingga kemampuannya untuk masuk ke celah kontak yang sangat sempit antara pahat dan benda kerja menjadi berkurang. Akibatnya, pembentukan tribofilm yang seragam pada bidang kontak menjadi terganggu, dan distribusi nanopartikel pada zona pemotongan menjadi kurang merata dibandingkan pada konsentrasi 0,35%, meskipun jumlah total nanopartikel yang ditambahkan justru lebih banyak. Sebagai konsekuensinya, kemampuan penetrasi *coolant* ke daerah kontak pahat-benda kerja yang sangat sempit turut menurun, sehingga efektivitas pelumasan dan pendinginan pada konsentrasi 0,45% tidak lagi optimum.

Penjelasan mekanistik di atas didukung oleh hasil pengujian konduktivitas termal yang dilakukan menggunakan *Thermal Conductivity Analyzer C-THERM TCi* pada masing-masing kelompok *coolant*. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai konduktivitas termal meningkat dari 0,599 W/mK pada konsentrasi 0,25% menjadi 0,609 W/mK pada konsentrasi 0,35%, sebelum akhirnya menurun kembali menjadi 0,580 W/mK pada konsentrasi 0,45%. Pola perubahan konduktivitas termal ini sejalan dengan pola yang teramati pada nilai keausan pahat (VB), di mana konsentrasi 0,35% memberikan performa terbaik sedangkan konsentrasi 0,45% justru mengalami penurunan performa. Pada konsentrasi 0,35%, nanopartikel MXene yang terdispersi secara relatif merata dalam *coolant* mampu meningkatkan kemampuan hantar panas fluida secara keseluruhan, sehingga panas yang timbul akibat gesekan pada zona pemotongan dapat dilepaskan dari bidang kontak pahat-benda kerja secara lebih efektif, yang pada akhirnya menekan laju keausan pahat. Sebaliknya, penurunan nilai konduktivitas termal pada konsentrasi 0,45% konsisten dengan dugaan terjadinya aglomerasi nanopartikel pada konsentrasi tinggi, di mana partikel yang teraglomerasi tidak lagi terdispersi secara efektif dalam fluida sehingga jalur hantaran panas antarpartikel menjadi terputus, alih-alih membentuk jaringan konduktif yang menerus di dalam *coolant*. Dengan demikian, data konduktivitas termal ini memberikan bukti kuantitatif tambahan yang memperkuat kesimpulan bahwa penurunan kemampuan pelepasan panas pada konsentrasi 0,45% turut berkontribusi terhadap kembali meningkatnya keausan pahat dibandingkan konsentrasi 0,35%, sehingga terdapat suatu titik optimum konsentrasi, yaitu 0,35%, di mana jumlah nanopartikel cukup untuk membentuk tribofilm dan jaringan konduktif secara efektif tanpa menimbulkan hambatan aglomerasi yang muncul pada konsentrasi berlebih.

Perbedaan tingkat keausan pahat yang teramati pada setiap variasi konsentrasi MXene tidak hanya mencerminkan perbedaan besarnya kerusakan pada permukaan pahat, tetapi juga mengindikasikan adanya perubahan mekanisme pemotongan yang terjadi selama proses pembubutan pada masing-masing kelompok *coolant*. Perubahan kemampuan pelumasan dan pendinginan yang telah dibahas sebelumnya diperkirakan turut memengaruhi karakteristik geram yang terbentuk, karena geram merupakan hasil langsung dari interaksi antara pahat,

benda kerja, dan kondisi gesekan-termal di zona pemotongan. Oleh karena itu, analisis karakteristik geram berikut ini diperlukan sebagai bukti pendukung yang memperkuat penjelasan mengenai mekanisme penurunan keausan pahat yang telah diuraikan, sehingga pembahasan keausan pahat dan pembahasan geram menjadi satu kesatuan analisis yang saling melengkapi, Hasilnya ditunjukkan pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Karakteristik Jenis Geram

Variasi <i>Coolant</i>	Foto Geram	Keterangan
Dromus		Geram dominan kontinu; warna hitam hingga coklat tua (indikasi temperatur pemotongan tinggi)
WBL+MXene 0,25%		Sebagian geram terputus; warna kuning kecoklatan (temperatur mulai terkendali)
WBL+MXene 0,35%		Geram seragam dan mudah patah; warna abu-abu gelap hingga keunguan tipis (temperatur paling terkendali)
WBL+MXene 0,45%		Geram lebih kontinu; warna coklat tua hingga kehitaman (temperatur kembali meningkat)

Selain keausan pahat dan kekasaran permukaan, karakteristik geram (*chip morphology*) hasil proses pembubutan pada setiap kelompok *coolant* juga diamati secara visual untuk mengevaluasi pengaruh penambahan nanopartikel MXene terhadap mekanisme pembentukan geram selama proses pemesinan. Parameter yang diamati meliputi bentuk geram, ukuran, tingkat kontinuitas, serta perubahan warna geram sebagai indikator tidak langsung kondisi termal pada daerah pemotongan. Dokumentasi hasil pengamatan geram disajikan pada Tabel 4.3 dan Lampiran D.

Perubahan warna geram yang teramati pada Tabel 4.3 sejalan dengan mekanisme yang telah dilaporkan pada literatur terdahulu, bahwa warna permukaan geram terbentuk akibat lapisan oksida (terutama Fe_2O_3 hingga Fe_3O_4) yang komposisinya berubah seiring meningkatnya temperatur pada bidang kontak pahat–geram, sehingga geram yang lebih gelap (coklat tua hingga kehitaman) mengindikasikan temperatur pemotongan yang lebih tinggi dibandingkan geram berwarna terang (kuning kecoklatan hingga abu-abu) [51].

Pada Dromus (kontrol) geram yang dihasilkan didominasi oleh geram berbentuk pita panjang (*continuous ribbon chip*) disertai beberapa geram spiral pendek (*short spiral chip*). Bentuk geram yang cenderung kontinu menunjukkan bahwa deformasi plastis material berlangsung secara stabil tanpa terjadi pematahan geram yang signifikan. Dari segi warna, geram didominasi oleh warna hitam hingga coklat tua yang mengindikasikan terjadinya oksidasi akibat temperatur yang relatif tinggi pada zona geser primer dan antarmuka pahat–geram. Warna tersebut menunjukkan bahwa panas hasil proses pemotongan belum sepenuhnya dapat dilepaskan selama pembentukan geram. Meskipun masih ditemukan beberapa geram spiral pendek, dominasi geram kontinu mengindikasikan bahwa mekanisme pematahan geram belum berlangsung secara optimal.

Pada WBL+MXene 0,25%, bentuk geram didominasi oleh geram spiral pendek hingga geram melengkung (*arc chip*), dengan sebagian geram masih mempertahankan bentuk yang relatif pendek. Morfologi ini menunjukkan bahwa proses deformasi plastis berlangsung lebih terkendali sehingga geram lebih mudah mengalami pematahan dibandingkan geram kontinu. Namun demikian, warna geram berubah menjadi kuning kecoklatan yang mengindikasikan adanya peningkatan temperatur pada daerah pemotongan akibat proses oksidasi ringan selama pembentukan geram. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa meskipun penambahan MXene mampu menghasilkan geram dengan tingkat pematahan yang lebih baik, kemampuan *coolant* dalam mengendalikan temperatur pemotongan pada konsentrasi ini belum sepenuhnya optimal.

Pada WBL+MXene 0,35%, geram didominasi oleh bentuk spiral pendek dan setengah lingkaran (*half-turn spiral chip*) dengan ukuran yang relatif seragam. Morfologi geram yang seragam menunjukkan bahwa proses pembentukan geram

berlangsung secara lebih stabil dengan deformasi plastis yang konsisten sepanjang proses pemotongan. Warna geram yang cenderung abu-abu gelap hingga keunguan tipis mengindikasikan bahwa temperatur pemotongan berada pada tingkat yang lebih terkendali dibandingkan kelompok lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel MXene sebesar 0,35% mampu meningkatkan kemampuan *coolant* dalam membentuk lapisan pelindung (*tribofilm*) pada daerah kontak pahat–geram sehingga gesekan dan panas yang dihasilkan selama proses pemesinan dapat dikurangi. Akibatnya, proses pematahan geram berlangsung lebih efektif dan kondisi pemotongan menjadi lebih stabil.

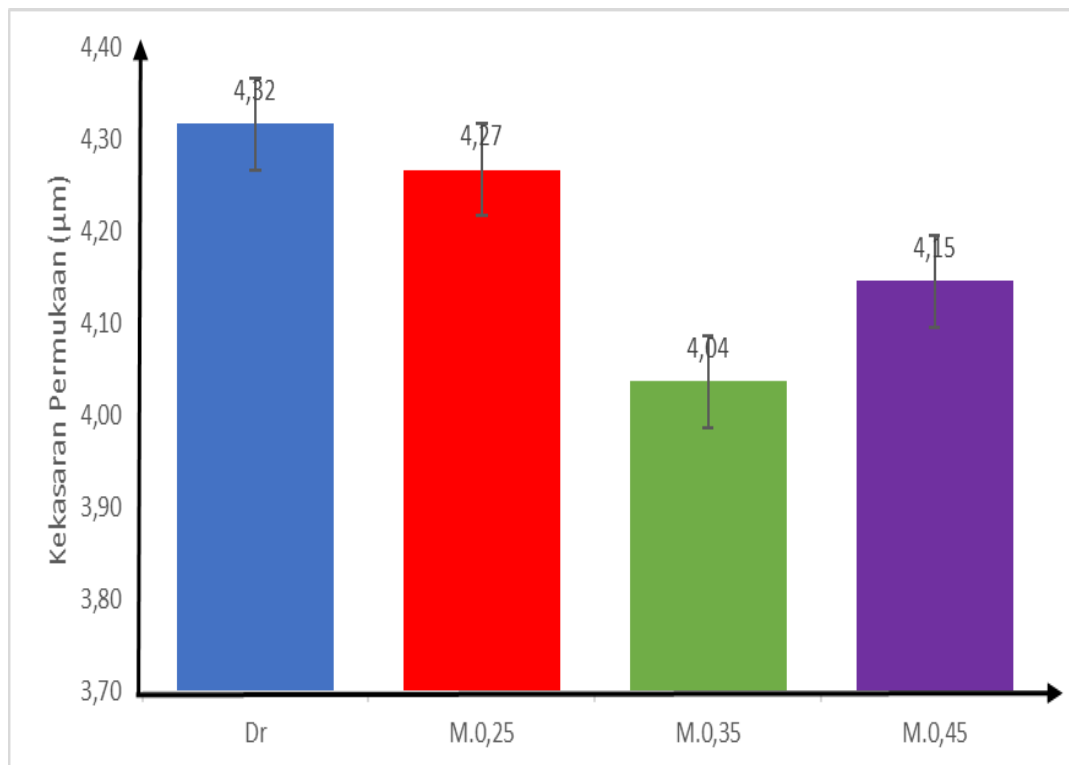
Pada WBL+MXene 0,45% geram menunjukkan kombinasi antara geram spiral panjang (*continuous spiral chip*) dan geram spiral pendek. Munculnya geram spiral panjang menunjukkan bahwa material mengalami deformasi plastis yang lebih besar sehingga geram menjadi lebih ulet dan cenderung tidak mudah terputus selama proses pembentukan. Warna geram didominasi oleh coklat tua hingga kehitaman yang mengindikasikan temperatur pemotongan relatif lebih tinggi dibandingkan variasi WBL+MXene 0,35%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi MXene hingga 0,45% tidak lagi memberikan peningkatan performa *coolant* secara proporsional. Konsentrasi nanopartikel yang terlalu tinggi berpotensi memicu aglomerasi antarpartikel MXene, sehingga distribusi nanopartikel pada zona pemotongan menjadi kurang merata dan kemampuannya membentuk *tribofilm* yang seragam menurun. Akibatnya, penetrasi *coolant* ke daerah kontak pahat–geram berkurang sehingga kemampuan pendinginan dan pelumasan *coolant* menurun, yang ditunjukkan oleh terbentuknya geram yang lebih kontinu dan meningkatnya temperatur pemotongan.

Secara keseluruhan, hasil pengamatan morfologi geram menunjukkan bahwa variasi jenis *coolant* memberikan pengaruh terhadap karakteristik geram yang dihasilkan selama proses pembubutan. Variasi WBL+MXene 0,35% menghasilkan morfologi geram yang paling seragam dengan dominasi geram spiral pendek yang mudah terputus serta warna geram yang mengindikasikan temperatur pemotongan lebih terkendali. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi tersebut mekanisme *coolant* dan pendinginan berlangsung paling efektif, sehingga mampu menurunkan gesekan pada antarmuka pahat–geram, menjaga kestabilan

proses pemotongan, serta mendukung pencapaian nilai keausan pahat dan kekasaran permukaan yang lebih baik dibandingkan variasi *coolant* lainnya.

4.2 Pengaruh Konsentrasi Nanopartikel MXene Coolant Berbasis WBL terhadap Kekasaran Permukaan (Ra)

Hasil pengukuran kekasaran permukaan (Ra) pada setiap kelompok *coolant* disajikan dalam bentuk nilai rata-rata pada Gambar 4.2, sedangkan data lengkapnya dapat dilihat pada Lampiran C



Gambar 4.2 Perbandingan Kekasaran Permukaan (Ra) Kelompok *coolant*

Berdasarkan Gambar 4.2, Terlihat adanya sedikit perbedaan nilai rata-rata kekasaran permukaan (Ra) antar variasi *coolant* yang digunakan. Kelompok WBL+MXene 0,35% menunjukkan nilai rata-rata Ra terendah (4,04 μm), diikuti oleh WBL+MXene 0,45% (4,15 μm), WBL+MXene 0,25% (4,27 μm), dan Dromus (kontrol) yang tertinggi (4,32 μm). Meskipun demikian, rentang nilai rata-rata keempat kelompok tersebut relatif berdekatan (sekitar 4,04–4,32 μm) dan variasi data pada masing-masing kelompok (ditunjukkan oleh *error bar* pada Gambar 4.2) cukup besar, terutama pada kelompok WBL+MXene 0,25%. Pola ini mengindikasikan bahwa perbedaan rata-rata Ra yang tampak pada grafik

kemungkinan belum tentu bersifat signifikan secara statistik, sehingga diperlukan pengujian lebih lanjut.

Meskipun secara visual perbedaan nilai rata-rata kekasaran permukaan telah terlihat pada grafik, diperlukan analisis statistik untuk memastikan bahwa perbedaan tersebut benar-benar dipengaruhi oleh variasi konsentrasi nanopartikel MXene dan bukan akibat variasi acak hasil pengukuran. Oleh karena itu, dilakukan analisis ragam (*One-Way Analysis of Variance* atau ANOVA) untuk menguji pengaruh variasi konsentrasi MXene terhadap nilai kekasaran permukaan (R_a). Hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil ANOVA Satu Arah Kekasaran Permukaan (R_a)

Source	F-Value	P-Value
Perlakuan	1,73	0,187

Hasil analisis varians (ANOVA) menunjukkan bahwa nilai F_{hitung} sebesar 1,73, sedangkan nilai F_{tabel} pada taraf signifikansi 5% dengan derajat bebas (3;24) sebesar 3,01. Karena $F_{hitung} (1,73) < F_{tabel} (3,01)$, serta diperoleh P-value sebesar 0,187 yang lebih besar daripada taraf signifikansi ($\alpha = 0,05$), maka hipotesis nol (H_0) gagal ditolak. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa variasi konsentrasi nanopartikel MXene tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai kekasaran permukaan (R_a) pada kondisi pemotongan yang digunakan dalam penelitian ini.

Meskipun hasil pengukuran menunjukkan adanya perbedaan nilai rata-rata kekasaran permukaan (R_a) antarperlakuan, berdasarkan hasil ANOVA perbedaan tersebut tidak signifikan secara statistik. Hal ini menunjukkan bahwa variasi nilai R_a yang diamati masih berada dalam rentang variasi yang dapat disebabkan oleh galat eksperimen atau variasi acak selama proses pengujian. Oleh karena itu, secara statistik belum dapat dinyatakan bahwa perubahan konsentrasi nanopartikel MXene memberikan pengaruh nyata terhadap kekasaran permukaan hasil pembubutan.

Tabel 4.5 Hasil Uji Lanjut Tukey HSD Kekasaran Permukaan (Ra)

Perbedaan Tingkat	Perbedaan Rata-rata	P-Value
Dromus Vs MXene 25%	0,050	0,982
Dromus Vs MXene 35%	0,280	0,191
Dromus Vs MXene 45%	0,171	0,591
MXene 25% Vs MXene 35%	0,230	0,345
MXene 25% Vs MXene 45%	0,121	0,806
MXene 45% Vs MXene 35%	0,109	0,852

Karena hasil analisis ANOVA menunjukkan bahwa variasi konsentrasi nanopartikel MXene tidak berpengaruh signifikan terhadap nilai kekasaran permukaan (Ra), maka dilakukan uji lanjut Tukey HSD untuk mengonfirmasi perbedaan antarperlakuan. Hasil uji Tukey menunjukkan bahwa seluruh perlakuan, yaitu Dromus (kontrol), WBL+MXene 0,25%, WBL+MXene 0,45%, dan WBL+MXene 0,35%, berada pada kelompok yang sama (A). Pengelompokan tersebut menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan antar seluruh perlakuan pada taraf kepercayaan 95%.

Secara deskriptif, kelompok WBL+MXene 0,35% menghasilkan nilai rata-rata kekasaran permukaan terendah, yaitu 4,0371 μm , diikuti oleh WBL+MXene 0,45% sebesar 4,1457 μm , WBL+MXene 0,25% sebesar 4,2671 μm , dan Dromus (kontrol) sebesar 4,3171 μm . Meskipun demikian, karena seluruh perlakuan berada dalam kelompok huruf yang sama pada uji Tukey HSD, perbedaan nilai rata-rata tersebut belum dapat dinyatakan berbeda nyata secara statistik. Dengan demikian, kecenderungan penurunan nilai Ra yang diperoleh hanya bersifat deskriptif dan belum dapat dikaitkan secara langsung dengan pengaruh variasi konsentrasi nanopartikel MXene secara statistik.

Secara teoritis, penambahan nanopartikel MXene berpotensi meningkatkan kemampuan *coolant* melalui pembentukan tribofilm pada bidang kontak antara pahat dan benda kerja. Namun, pada penelitian ini mekanisme tersebut belum dapat dibuktikan secara statistik karena hasil ANOVA dan uji Tukey HSD menunjukkan bahwa seluruh perlakuan tidak berbeda nyata terhadap nilai kekasaran permukaan.

Meskipun perbedaan antarperlakuan tidak signifikan secara statistik, kecenderungan (*trend*) deskriptif yang terlihat pada Gambar 4.2 tetap relevan untuk dibahas secara teoritis, mengingat pola penurunan-kenaikan nilai Ra terhadap peningkatan konsentrasi MXene konsisten dengan mekanisme yang umum dilaporkan pada penelitian *nanofluid coolant* lain.

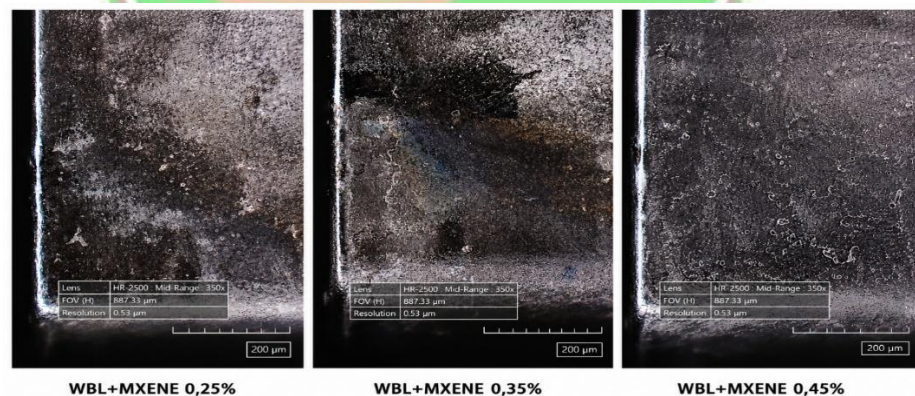
Secara teoritis, penambahan nanopartikel MXene ke dalam *coolant* berbasis WBL berpotensi meningkatkan kemampuan pelumasan melalui pembentukan tribofilm tipis pada bidang kontak antara pahat dan benda kerja. Struktur MXene yang berlapis (2D) memungkinkan lapisan tersebut bergeser satu sama lain (*self lubricating*), sehingga menurunkan koefisien gesek dan mengurangi adhesi material pada mata pahat. Pada konsentrasi 0,25%, jumlah nanopartikel yang tersedia dalam *coolant* masih relatif rendah, sehingga lapisan tribofilm yang terbentuk pada zona kontak belum merata dan belum cukup tebal untuk melindungi permukaan benda kerja secara konsisten. Akibatnya, penurunan nilai Ra pada konsentrasi ini hanya sedikit lebih baik dibandingkan Dromus (kontrol), karena efek pelumasan MXene baru mulai bekerja namun belum optimal.

Pada konsentrasi 0,35%, jumlah nanopartikel MXene diperkirakan berada pada titik optimum, yaitu cukup untuk membentuk lapisan tribofilm yang lebih merata dan stabil pada permukaan kontak pahat–benda kerja, tanpa menimbulkan penggumpalan (*agglomeration*) partikel yang berarti. Lapisan ini efektif menurunkan gesekan dan panas pada zona pemotongan, sehingga mengurangi keausan mikro pada mata pahat serta mencegah pembentukan *built-up edge* yang dapat memperkasir permukaan hasil pembubutan. Kondisi inilah yang menyebabkan konsentrasi 0,35% menghasilkan nilai Ra rata-rata terendah di antara seluruh kelompok yang diuji.

Pada konsentrasi 0,45% nilai Ra kembali meningkat dibandingkan 0,35%, meskipun masih lebih rendah dibandingkan Dromus dan WBL+MXene 0,25%.

Kenaikan ini diduga terkait dengan mulai terjadinya penggumpalan (*agglomeration*) partikel MXene akibat konsentrasi yang terlalu tinggi. Penggumpalan tersebut dapat membentuk partikel berukuran lebih besar yang tidak lagi terdistribusi secara homogen dalam *coolant*, sehingga lapisan *tribofilm* yang terbentuk menjadi tidak optimal, tidak merata, bahkan berpotensi bersifat abrasif pada bidang kontak. Selain itu, peningkatan viskositas *coolant* akibat konsentrasi partikel yang lebih tinggi dapat menurunkan kemampuan *coolant* untuk menjangkau dan membasahi seluruh zona pemotongan secara merata, sehingga efek pendinginan dan pelumasan menjadi kurang efektif dibandingkan pada konsentrasi 0,35%. Kombinasi kedua faktor tersebut menjelaskan mengapa nilai Ra pada konsentrasi 0,45% cenderung meningkat kembali dibandingkan konsentrasi optimalnya.

Pola perubahan nilai Ra terhadap peningkatan konsentrasi Mxene menurun hingga mencapai titik optimum pada 0,35%, kemudian meningkat kembali pada 0,45% menunjukkan hubungan tidak linear yang sejalan dengan karakteristik umum nanofluid, yaitu terdapat konsentrasi optimum di mana manfaat pelumasan partikel nano mencapai maksimum sebelum efek negatif penggumpalan mulai mendominasi



Gambar 4.3 Kondisi Permukaan Flank Pahat setelah Proses Pembubutan pada Berbagai Konsentrasi Nanopartikel MXene

Hasil pengamatan permukaan *flank* pahat menggunakan mikroskop digital dengan perbesaran 140x pada Gambar 4.3 memberikan gambaran kualitatif yang mendukung kecenderungan nilai Ra pada Gambar 4.2. Pada kelompok WBL+MXene 0,25%, tampak area gelap (deposit/material yang teradhesi) yang

cukup luas menutupi bagian bawah bidang *flank*, mengindikasikan tingkat adhesi material benda kerja pada permukaan pahat yang relatif tinggi. Kondisi ini konsisten dengan penjelasan sebelumnya bahwa pada konsentrasi rendah, lapisan *tribofilm* MXene belum terbentuk secara merata, sehingga kontak logam-ke-logam (*metal-to-metal contact*) antara pahat dan benda kerja masih cukup dominan dan berkontribusi terhadap nilai R_a yang relatif lebih tinggi dibandingkan kelompok 0,35% dan 0,45%.

Pada kelompok WBL+MXene 0,35%, area teradhesi tampak lebih terlokalisasi dengan warna kehitaman disertai semburat warna kebiruan/pelangi yang umum diasosiasikan dengan lapisan oksida atau *tribofilm* tipis akibat panas gesek pada zona kontak. Munculnya lapisan tipis yang lebih terkonsentrasi pada satu area, dibandingkan sebaran deposit yang lebih luas pada kelompok 0,25%, mengindikasikan bahwa *tribofilm* MXene pada konsentrasi ini bekerja lebih efektif dalam melokalisasi gesekan dan melindungi sebagian besar permukaan pahat. Hal ini sejalan dengan nilai R_a terendah yang diperoleh pada kelompok 0,35%, karena permukaan pahat yang lebih terlindungi cenderung menghasilkan permukaan benda kerja yang lebih halus.

Pada kelompok WBL+MXene 0,45%, permukaan *flank* pahat terlihat relatif lebih bersih dengan area gelap yang lebih sedikit dibandingkan dua kelompok lainnya, namun terdapat gradasi bayangan yang lebih menyebar. Meskipun secara visual tampak lebih bersih, hal ini tidak serta-merta berarti performa permukaan yang dihasilkan lebih baik dibandingkan 0,35%, karena berkurangnya deposit yang teramati dapat pula berkaitan dengan mekanisme keausan yang berbeda, misalnya potensi keausan abrasif akibat partikel MXene yang mengalami penggumpalan sebagaimana dibahas sebelumnya. Partikel yang tergumpal dapat bertindak sebagai partikel abrasif berukuran lebih besar pada bidang kontak, alih-alih membentuk lapisan pelumas yang merata, sehingga tetap menghasilkan nilai R_a yang sedikit lebih tinggi dibandingkan kelompok 0,35% meskipun secara visual keausan/adhesi tampak lebih rendah.

Secara keseluruhan, pengamatan pada Gambar 4.3 memperkuat indikasi bahwa kecenderungan nilai kekasaran permukaan (R_a) pada Gambar 4.2 berkaitan dengan kondisi permukaan pahat, khususnya tingkat adhesi material dan efektivitas

pembentukan tribofilm MXene pada masing-masing konsentrasi. Meskipun demikian, karena pengamatan ini bersifat kualitatif dan belum didukung oleh pengukuran keausan pahat secara kuantitatif (misalnya VB atau volume keausan), hubungan antara kondisi permukaan pahat dan nilai Ra tersebut masih perlu dikonfirmasi melalui penelitian atau pengujian lebih lanjut.

