

BAB V

ANALISIS HASIL PERCOBAAN

V.1 Analisis Pengaruh Penggunaan Nanofluida Pada Kualitas Permukaan Hasil Pemesinan.

Bagian ini merupakan penjabaran utama dalam rangka memenuhi tujuan penelitian—yaitu melihat pengaruh penggunaan nanofluida terhadap kualitas permukaan hasil pemesinan. Pada bagian ini akan dibahas mengenai data yang dihasilkan setelah pengujian beserta pengolahannya, dampak samping penggunaan nanofluida pada material uji dan analisa secara statistik sebagai sarana pengambilan kesimpulan yang valid dan dapat dipertanggung-jawabkan.

V.1.1 Deskripsi Data Penelitian

Dari pengujian yang telah dilakukan, didapatkan hasil berupa profil kekasaran permukaan hasil pemesinan pada kondisi variasi putaran mesin dan variasi jenis cairan pendingin. Berikut ditampilkan hasil penelitian :

Tabel V.1 Nilai rata-rata kekasaran permukaan pada penggunaan cooling fluids konvensional

		time (menit)			
		10	20	30	40
rpm	600	2.377	2.762	3.436	4.691
	1100	1.806	2.257	3.059	3.996
	2200	1.642	2.067	2.113	2.593

Dari tabel data yang ada diatas dapat kita lihat bahwa nilai kekasaran permukaan yang dihasilkan pada penggunaan *cooling fluids* jenis konvensional memiliki *range* nilai antara 1.6 μm hingga 4.69 μm . Nilai kekasaran permukaan

terkecil didapat pada kondisi pemotongan kecepatan putaran motor sebesar 2200 rpm dan waktu pemotongan 10 menit.

Tabel V.2 Rata-rata nilai kekasaran permukaan pada penggunaan cooling fluids nanofluids 1%

		time (menit)			
		10	20	30	40
rpm	600	3.266	4.334	5.306	5.39
	1100	2.468	3.092	4.387	4.25
	2200	2.027	2.551	2.445	2.8525

Pada penggunaan cooling fluids jenis nanofluida 1% murni didapatkan data bahwa nilai kekasaran permukaan terkecil ialah 2.02 μm dan nilai terbesar ialah 5.39 μm .

Tabel V.3 Rata-rata nilai kekasaran permukaan pada penggunaan cooling fluids nanofluids 1% + lubricant 3%

		time (menit)			
		10	20	30	40
rpm	600	1.804	2.397	2.855	2.768
	1100	1.535	2.37	2.86	2.331
	2200	1.428	1.951	1.798	2.225

Pada penggunaan cooling fluids jenis nanofluida 1% dengan pencampuran lubricant 3% didapatkan data bahwa nilai kekasaran permukaan terkecil ialah 1.428 μm dan nilai terbesar ialah 2.855 μm . Dengan nilai terkecil terdapat pada kondisi pemotongan saat putaran mesin sebesar 2200 rpm dan waktu pemesinan 10 menit, sedangkan nilai kekasaran permukaan terbesar terjadi pada kondisi pemotongan saat putaran mesin 600 rpm dan waktu pemesinan 30 menit.

Tabel V.4 Rata-rata nilai kekasaran permukaan pada penggunaan *cooling fluids*
Nanofluida 4%

		time (menit)			
		10	20	30	40
Rpm	600	3.242	3.128	4.314	6.364
	1100	2.076	2.786	3.135	3.366
	2200	1.846	2.184	2.204	2.407

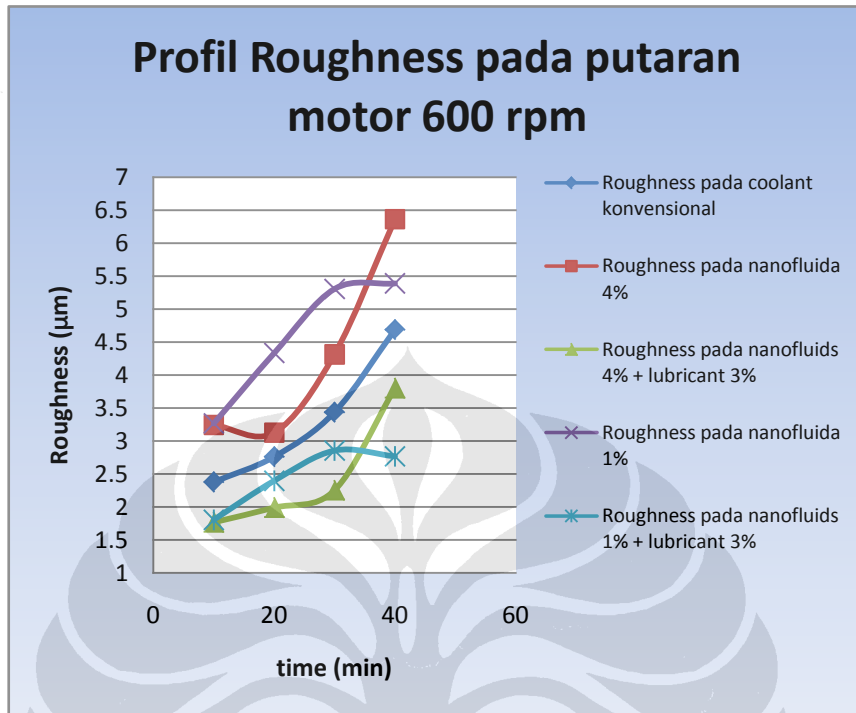
Pada penggunaan *cooling fluids* berupa nanofluida 4% didapatkan nilai kekasaran permukaan terkecil sebesar 1.86 μm dan nilai tertinggi ialah 6.34 μm .

Tabel V.5 Rata-rata nilai kekasaran pada penggunaan nanofluids 4% + lubricant 3%

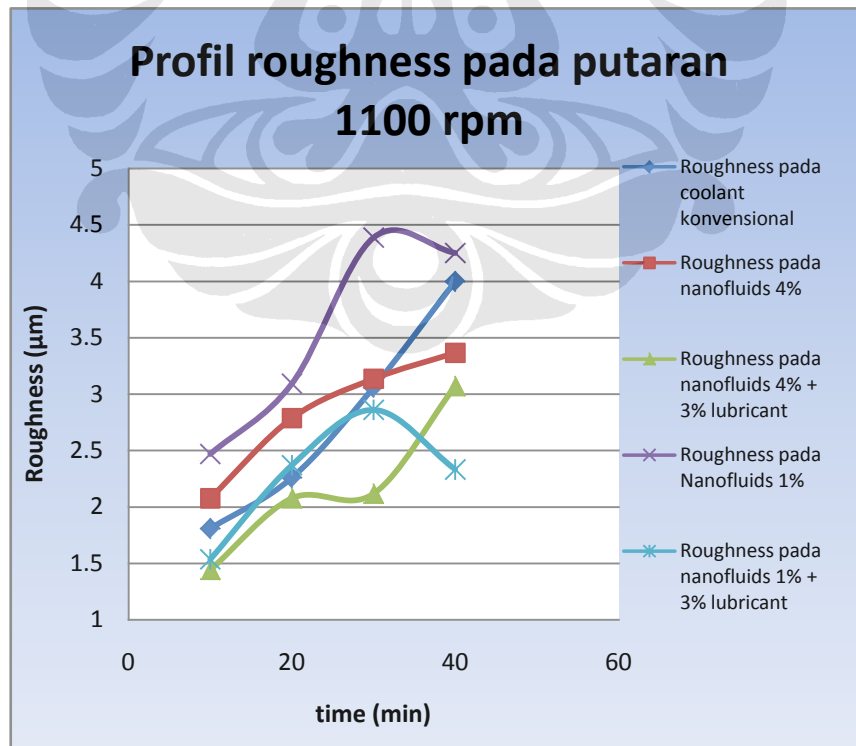
		time (menit)			
		10	20	30	40
Rpm	600	1.765	1.989	2.254	3.799
	1100	1.442	2.076	2.117	3.071
	2200	1.245	1.35	1.545	1.464

Pada penggunaan *cooling fluids* berupa nanofluida 4% + *lubricant* 3% ini didapatkan nilai kekasaran permukaan terkecil dari keseluruhan data pengujian sebesar 1.245 μm .

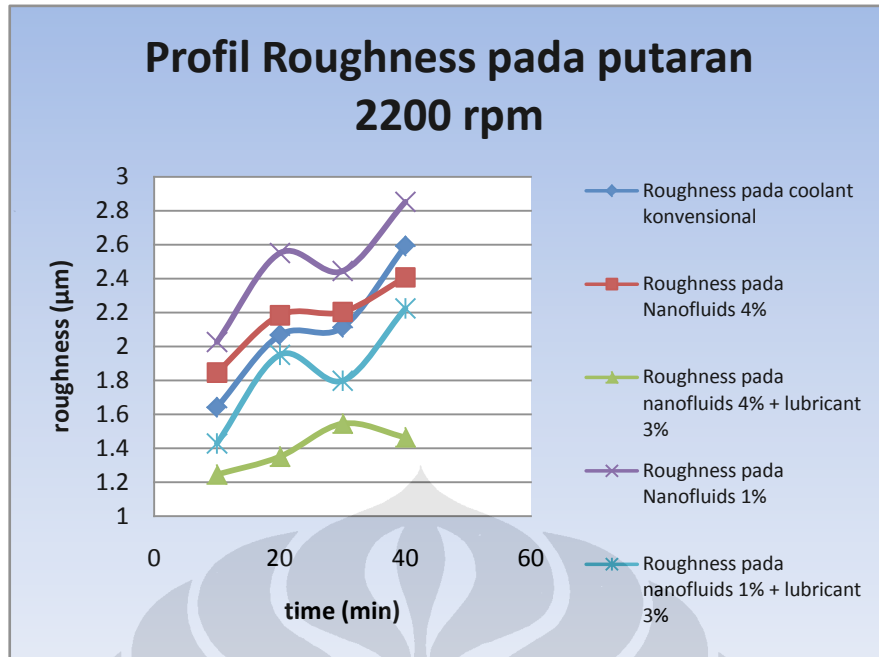
V.1.2 Hasil pengolahan data



Gambar V.1 Profil Roughness pada putaran mesin 600 rpm



Gambar V.2 Profil roughness pada putaran mesin 1100 rpm



Gambar V.3 Profil kekasaran permukaan pada putaran mesin 2200 rpm

Dari ketiga grafik di atas, dapat diambil dua analisa umum: (1) pengaruh parameter pemesinan terhadap kualitas kekasaran permukaan hasil pemesinan, yang diwakili oleh kekasaran (*roughness*), dan (2) pengaruh jenis fluida pendingin terhadap kekasaran permukaan material hasil pemesinan.

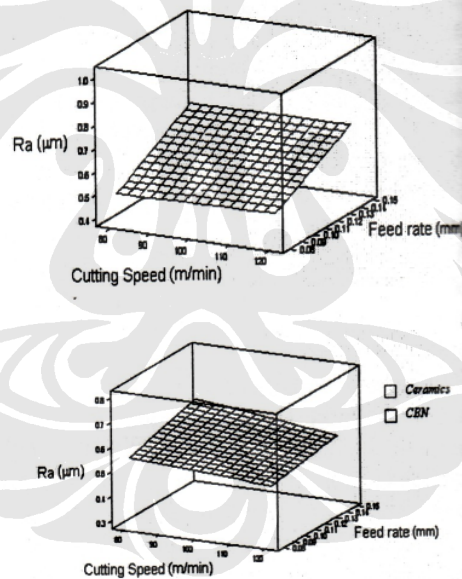
Pertama, dua parameter pemesinan yang digunakan untuk menganalisa adalah putaran *spindle* dan waktu pemesinan. Dari sisi putaran *spindle*, terlihat pola yang jelas bahwa makin tinggi putaran *spindle*, maka kekasaran permukaan semakin turun. Untuk menganalisa masalah ini kita tidak dapat melupakan pengaruh antara kecepatan potong dengan temperatur pada bidang sentuh pahat potong dan material. Dari literatur penelitian yang membahas masalah ini diperoleh pengetahuan yang dapat dijadikan acuan proses analisis [1].

Dari penelitian tersebut terlihat jelas bahwa semua parameter pemesinan berpengaruh terhadap kekasaran (kualitas) permukaan dengan tingkat keyakinan lebih dari 95%. Tingkat signifikansi dampak parameter secara berturut-turut adalah:

1. kecepatan potong (*cutting speed*),
2. laju pemakanan (*feed rate*),
3. kekerasan benda kerja (*material hardness*) dan
4. kedalaman potong (*depth of cut*).

Selain itu terlihat jelas bahwa dampak 'interaksi antar parameter' terhadap kekasaran permukaan (R_a) didominasi oleh interaksi :

- 1) Kecepatan potong dan kekerasan benda kerja
- 2) Laju pemakanan dan kecepatan potong dan
- 3) Interaksi antara 'kedalaman pemotongan dan kecepatan potong' dengan tingkat keyakinan rata-rata $> 99\%$. Interaksi ini dapat dilihat seperti pada Gambar V.4.



Gambar V. 4. Pengaruh interaksi parameter pemesinan terhadap kekasaran permukaan [13]

Dari penelitian diatas disebutkan bahwa seluruh parameter pemesinan berpengaruh pada nilai kekasaran permukaan dengan pengaruh terbesar ada pada kecepatan potong (V_c), hal ini disebabkan adanya peningkatan temperatur pada proses pemotongan. Namun pada penelitian yang dilakukan oleh penulis didapatkan bahwa semakin tinggi putaran spindle semakin rendah nilai kekasaran permukaan yang didapatkan. Hal ini dapat disebabkan karena spesifikasi

pemotongan yang dilakukan pada penelitian ini merupakan pemotongan jenis finishing dengan kedalaman potong sebesar 1.5 mm dan feed sebesar 0.1 mm/rev. Dengan spesifikasi seperti ini maka pengaruh gesekan paksa antara mata pahat dan material menjadi semakin berkurang dan menyebabkan temperatur yang ada pada *cutting zone* lebih rendah.

Sesuai dengan prinsip proses finishing dimana diperlukan putaran tinggi dan kedalaman potong yang rendah maka pemilihan mata pahat menjadi faktor krusial untuk mendapatkan nilai kekasaran permukaan yang rendah dikarenakan pada proses *turning* kualitas permukaan berhubungan langsung dengan nilai *feed* dan *nose radius* dari mata pahat. Selain itu faktor ketidakstabilan mesin potong dapat menjadi faktor penyebab tingginya nilai kekasaran roughness pada putaran spindel rendah. Selain itu pada penelitian ini *cutting speed* tidak dapat dijadikan sebagai parameter konstan, dikarenakan pada mesin turning maximat super 11 peneliti tidak dapat melakukan variasi putaran spindel yang sesuai dengan pengurangan diameter untuk mendapatkan nilai *cutting speed* yang konstan. Hal ini menjadi perbedaan mendasar bagi penelitian ini dengan penelitian lain mengenai pengaruh parameter pemesinan terhadap kualitas permukaan.

Kemudian, untuk waktu pemesinan, pola yang muncul adalah: kekasaran permukaan makin naik (baca:bertambah) dengan bertambahnya waktu pemesinan. Fenomena ini dikarenakan makin lama waktu pemesinan, kondisi mata pahat semakin menurun, dan semakin lama waktu pemesinan maka temperatur *cooling fluids* juga semakin bertambah sehingga proses pertukaran panas menjadi kurang efektif.

Kedua, lima jenis fluida pendingin yang digunakan pada percobaan ini ternyata memberikan pengaruh berbeda terhadap kekasaran permukaan material. Dari kelima jenis fluida yang digunakan, ternyata fluida campuran nanofluida 4% konsentrasi volume yang ditambah dengan *lubricant* 3.3 % memberikan pengaruh paling baik terhadap kekasaran permukaan hasil pemesinan. Disisi yang lain, nanofluida dengan konsentrasi volume 1% ternyata memberikan dampak paling buruk terhadap kekasaran permukaan hasil pemesinan. Jika fluida pendingin diurutkan berdasarkan kemampuannya menghasilkan kekasaran paling baik (halus) sampai paling jelek (kasar) adalah sebagai berikut:

1. nanofluida 4%+*lubricant* 3.3%
2. nanofluida 1% + *lubricant* 3.3%
3. pendingin konvensional (air + *lubricant*)
4. nanofluida 4%
5. nanofluida 1%.

Dibandingkan dengan pengaruh fluida pendingin terhadap temperatur pemotongan, hasil ini sedikit kontradiktif dengan hipotesis awal penelitian; penurunan sedikit temperatur pemotongan akan berpengaruh positif terhadap kualitas permukaan hasil pemesinan.

Nanofluida 4% yang memberikan hasil paling baik dalam hal menurunkan temperatur pemotongan justru kalah dalam performanya dibanding fluida pendingin konvensional dalam hal kekasaran permukaan. Menurut peneliti, kontradiksi ini terjadi dikarenakan beberapa hal berikut:

- (1) Nanofluida 4% menyebabkan material benda kerja berkarat sesaat setelah benda kerja dilepas dari spindle (analisa lebih jauh akan diberikan kemudian), dan
- (2) Pada proses pemesinan menggunakan nanofluida 4% ini di bak sirkulasi fluida pendingin timbul foam (sabun) yang menyebabkan performa sistem pendinginan menjadi tidak maksimal.

V.2 Dampak samping penggunaan Nanofluida

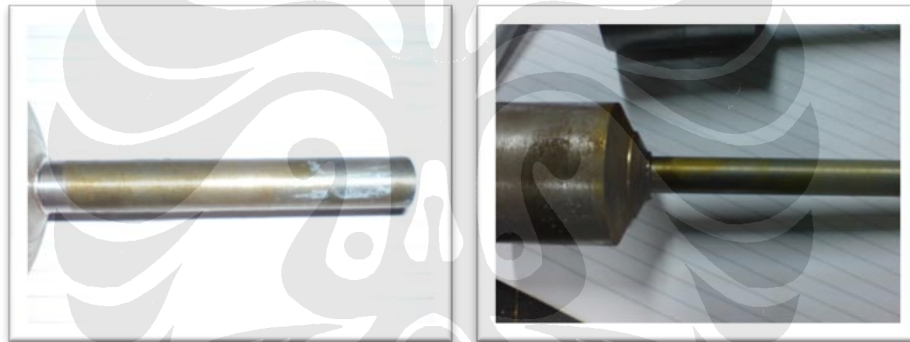
Pada proses penelitian yang telah berlangsung, ditemukan beberapa fenomena yang terjadi pada saat peneliti menggunakan *cooling fluids* nanofluida murni, beberapa fenomena yang teramati dengan jelas antara lain ialah timbulnya karat pada material uji dan pada bagian-bagian mesin lainnya. Selain fenomena timbulnya karat peneliti juga mendapati kondisi timbulnya *foam* pada nanofluida yang digunakan.

V.2.1 Timbulnya karat pada material kerja

Dari hasil percobaan yang digambarkan di atas, terlihat bahwa kemampuan pendingin jenis nanofluida lebih rendah dibanding dengan pendingin konvensional dalam hal pengaruh terhadap kualitas permukaan hasil pemesinan

yang diwakili oleh kekasaran permukaan, meskipun dari sisi penurunan temperatur pemotongan nanofluida lebih baik dibanding pendingin konvensional. Fenomena ini terjadi pada kedua jenis nanofluida yang digunakan; 4% dan 1% konsentrasi volume.

Menurut peneliti, hasil yang kontradiksi terhadap hipotesis awal ini disebabkan timbulnya karat (*rusting*) pada material benda kerja yang diproses menggunakan nanofluida. Karat dipastikan muncul karena penggunaan nanofluida, karena saat material benda kerja hanya dicelupkan kedalam larutan nanofluida selama 20 menit juga timbul karat pada material benda kerja (lihat gambar di bawah untuk membedakan material yang dicelup kedalam nanofluida dan material hasil pemesinan dengan nanofluida). Adanya karat ini menyebabkan kualitas permukaan hasil pemesinan turun—atau dengan kata lain permukaan hasil pemesinan menjadi lebih kasar.



Gambar V.5 Timbulnya karat pada material uji setelah pencelupan kedalam nanofluida

Timbulnya karat pada hasil pemesinan ini dapat disebabkan karena pengaruh dua jenis karat; *galvanic corrosion*, dan *erosion corrosion*. Karat (*corrosion*) didefinisikan sebagai kerusakan atau penurunan kualitas suatu material dikarenakan reaksi material dengan lingkungan [27]. Secara garis besar, karat dibagi menjadi delapan bagian besar: *uniform attack*, *galvanic*, *crevice*, *pitting*, *intergranular*, *selective leaching*, *erosion*, *stress*, dan *hydrogen damage* [27]. Menurut analisa peneliti, karat yang terjadi pada hasil pemesinan termasuk kedalam jenis *galvanic corrosion* dan *erosion corrosion*.

Pertama, *galvanic corrosion*. Karat jenis ini disebabkan adanya aliran elektron antara dua logam yang bersentuhan (bersinggungan) karena perbedaan potensial antara kedua logam tersebut. Proses pengurangan dari material yang lebih

tidak tahan karat (*less corrosion resistance*) meningkat, sedangkan pengkaratan pada material yang lebih tahan karat (*more corrosion resistance*) menurun, jika dibandingkan dengan kondisi jika tidak terjadi hubungan (*contact*) antara kedua logam ini. Pada percobaan ini, terjadi hubungan antara material kerja yang terbuat dari baja (*steel*) dan partikel logam Al_2O_3 yang tersuspensi pada fluida kerja sebagai pendingin. Al, sebagai logam yang lebih tidak tahan karat menjadi anode (*anodic*) dan *steel* sebagai logam yang lebih tahan karat menjadi katoda (*katodic*).

	Metal-metal ion equilibrium (unit activity)	Electrode potential vs. normal hydrogen electrode at 25°C, volts
Noble or cathodic ↑	Au-Au ³⁺	+1.498
	Pt-Pt ²⁺	+1.2
	Pd-Pd ²⁺	+0.987
	Ag-Ag ⁺	+0.799
	Hg-Hg ₂ ²⁺	+0.788
	Cu-Cu ²⁺	+0.337
	H ₂ -H ⁺	0.000
Active or anodic ↓	Pb-Pb ²⁺	-0.126
	Sn-Sn ²⁺	-0.136
	Ni-Ni ²⁺	-0.250
	Co-Co ²⁺	-0.277
	Cd-Cd ²⁺	-0.403
	Fe-Fe ²⁺	-0.440
	Cr-Cr ³⁺	-0.744
	Zn-Zn ²⁺	-0.763
	Al-Al ³⁺	-1.662
	Mg-Mg ²⁺	-2.363
	Na-Na ⁺	-2.714
	K-K ⁺	-2.925

Gambar V.6 Deret Volta [27]

Biasanya logam yang bersifat sebagai katoda sedikit sekali karat yang timbul atau bahkan tidak ada sama sekali, sedangkan karat lebih banyak timbul pada logam yang bersifat sebagai anoda [27]. Teori ini sesuai dengan hasil percobaan. Terlihat bahwa karat sebenarnya tidak terjadi di material benda kerja, baja, tetapi pada partikel Al yang menempel (tersisa) pada permukaan benda kerja. Adanya logam baru pada permukaan benda kerja ini yang menyebabkan terjadinya *galvanic erosion*. Keberadaan partikel Al pada permukaan benda kerja akan terlihat jelas pada hasil SEM (*Scanning Electron Microscope*) material benda kerja.

Kedua, karat yang muncul pada material benda kerja setelah dilakukan proses pemesinan dapat disebabkan oleh fenomena *erosion corrosion*. Karat jenis ini didefinisikan sebagai peningkatan percepatan atau kenaikan laju kerusakan logam dikarenakan pergerakan relatif antara fluida yang bersifat *korosif* dengan permukaan logam [27]. Pada banyak kasus kegagalan karena *erosion corrosion* terjadi pada waktu yang sangat singkat. Banyak jenis media yang dapat menyebabkan fenomena karat jenis ini. Media ini meliputi gas, sistem organik, dan *liquid metal*. Sebagai contoh, gas dengan temperatur tinggi dapat mengoksidasi logam dengan cepat. Selain itu, Fontana [27] menyebutkan bahwa logam pada (solid) yang tersuspensi pada cairan (*slurry*) merupakan media yang (sangat) merusak dari sudut pandang *erosion corrosion*. Teori ini juga mendukung analisa peneliti dikarenakan pada percobaan ini, peneliti menggunakan nano partikel (Al_2O_3) yang tersuspensi dalam air suling.

Dua faktor penting yang paling berpengaruh dalam menentukan laju korosivitas logam jenis ini adalah kecepatan aliran fluida dan jenis aliran fluida; laminar atau turbulen. Secara umum, kenaikan kecepatan aliran fluida akan menyebabkan peningkatan ‘serangan’ karat terhadap logam. Pada percobaan ini kecepatan fluida saat bersentuhan dengan material benda kerja bervariasi pada 1.57, 2.88, dan 5.75 m/s pada putaran *spindle* 600, 1100, dan 2200 rpm. Korelasi positif antara penambahan kecepatan aliran fluida terhadap pertumbuhan karat terlihat pada distribusi data kekasaran material untuk nanofluida 4 % dan 1%. Grafik tersebut menunjukkan bahwa makin tinggi putaran *spindle*, yang berarti makin tinggi kecepatan relatif fluida terhadap permukaan material benda kerja, menyebabkan kekasaran yang makin tinggi. Hal ini berarti pengaruh korosi terhadap kekasaran permukaan material benda kerja tidak terlalu signifikan dibanding dengan variasi parameter pemesinan yang dilakukan.

Selanjutnya, faktor jenis aliran yang terjadi pada pemesinan juga memengaruhi korosifitas jenis ini. Pada percobaan ini aliran bersifat turbulen (lihat pembahasan analisa termal proses pemesinan). Jenis aliran turbulen ini menyebabkan *agitation* fluida yang meningkat pada permukaan material. Peningkatan agitasi ini meningkatkan kontak antar kedua logam, aluminium (Al) dan baja (steel).

Kemudian, hasil percobaan menunjukkan bahwa nanofluida dengan konsentrasi 1% dan 4% yang dicampur dengan *lubricant* 3.3% mempunyai pengaruh lebih baik terhadap kualitas permukaan hasil pemesinan dibanding dengan nanofluida murni tanpa *lubricant*.



Gambar V.7 Material hasil pemesinan dengan fluida pendingin nanofluida 4%+ *lubricant* 3%

Fenomena ini disebabkan karena *lubricant* yang digunakan mempunyai sifat tahan karat. Hal ini menyebabkan ketika terjadi kontak antara fluida kerja dan material benda kerja, *lubricant* akan membentuk lapisan film yang mencegah terjadinya korosi di permukaan benda kerja. Selain itu lapisan ini mencegah fenomena *galvanic corrosion* karena memisahkan material benda kerja dengan partikel Al yang terkandung pada nanofluida. Kemampuan untuk mencegah munculnya karat dan juga menurunkan temperatur pemotongan (*cutting temperature*)—nanofluida 4%+*lubricant* mempunyai pengaruh lebih baik terhadap temperatur pemotongan dibanding fluida pendingin konvensional—ini yang menyebabkan nanofluida 4%+*lubricant* 3.3% mempunyai pengaruh paling baik terhadap kualitas permukaan hasil pemesinan.

V.2.2 Timbulnya *foam* pada nanofluida

Pada pengembangan pembuatan nanofluida 4% murni untuk penelitian, peneliti mendapati fenomena timbulnya *foam* atau timbulnya buih-buih pada saat diadakan pengadukan baik saat pengadukan awal menggunakan *mixer* yang ada

ataupun saat nanofluida telah digunakan. *Foam* yang terbentuk dapat disebabkan oleh beberapa hal yaitu :

1. Adanya gas atau uap yang terperangkap pada campuran fluida namun hal ini sulit terjadi akibat temperatur pada *reservoir* tidak memungkinkan terjadinya proses *boiling*.
2. Adanya pengaruh *aditif* atau campuran pada *lubricant* yang dapat menjadi foam saat *lubricant* tersebut mengalami proses *mixing*. Hal ini dapat terjadi namun pada dasarnya setiap *lubricant* pasti memiliki *aditif* anti *detergent* yang dapat menghindari adanya resiko pembentukan *foam* saat fluida tersebut mengalami kondisi kerja pada temperatur tinggi.
3. Adanya pengotor yang bukan merupakan komponen dari *lubricant* yang ikut masuk pada campuran *cooling fluids*, contohnya minyak-minyak pelumas yang ada pada bagian-bagian mesin *turning*.



Gambar V.8 Timbulnya foam pada reservoir

Dari ketiga kemungkinan penyebab terbentuknya foam tersebut, peneliti melihat bahwa penyebab ketiga sebagai alasan yang paling kuat sebagai penyebab utama pembentukan foam, namun tidak menuup kemungkinan adanya penyebab lain sebagai alasan mengapa timbul *foam* pada nanofluida 4%. Untuk menganalisa lebih jauh sebaiknya digunakan analisa unsur pada fluida untuk mengetahui komposisi fluida saat foam terbentuk.

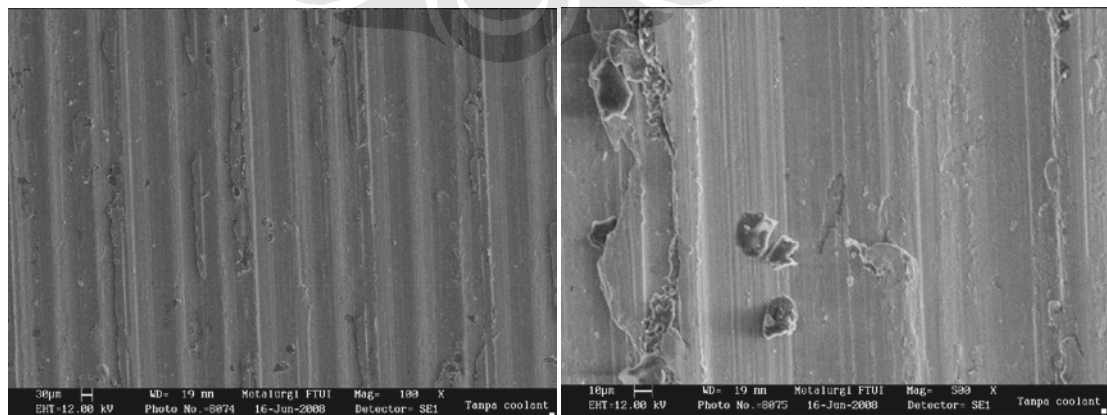
V.3 *Surface Integrity* Material dan Analisis *Tool Wear*

Salah satu proses analisa yang dilakukan pada penelitian ini ialah dengan melakukan analisa pada *surface integrity* dan analisa *tool wear* untuk melihat kondisi mata pahat dengan berbagai parameter pemesinan.

V.3.1 *Surface Integrity* Material

Dari hasil pemesinan yang telah dilakukan, kemudian diambil sampel yang akan dikenakan proses *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk mengetahui *surface integrity* material uji. Pada proses SEM ini peneliti mencoba membandingkan 3 buah sampel material uji dengan 2 *cooling fluid* berbeda, yaitu satu material dengan *cooling fluids* konvensional, satu material dengan *cooling fluids* nanofluida 4% + *lubricant* 3% dan satu material yang dikenakan *dry cutting* (Pada waktu pemesinan selama 20 menit). Selain tiga buah material uji, peneliti juga melakukan proses SEM pada tiga mata pahat yang digunakan dalam pemesinan yaitu mata pahat yang dipakai dalam proses *cutting* dengan *cooling fluids* konvensional, mata pahat saat pemotongan dengan *cooling fluids* nanofluida 4% + 3% *lubricant* (yang digunakan pada waktu pemesinan selama 20 menit) serta satu mata pahat baru atau belum dipakai dalam proses pemesinan. Hasil dari proses *scanning* yang dilakukan ialah seperti :

- Hasil SEM pada material uji yang dikenakan proses *dry cutting* pada putaran mesin 2200 rpm.

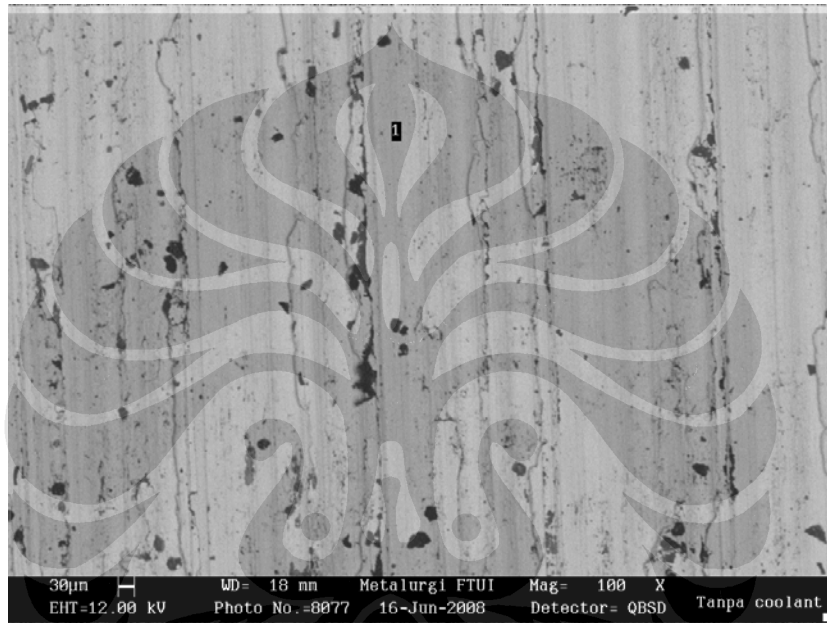


(a)

(b)

Gambar V.9 a)Perbesaran 100 kali; b)Perbesaran 500 kali

Kedua gambar diatas diambil dengan menggunakan *detector* SE1 yang berfungsi untuk mengetahui keadaan permukaan dari material. Dari gambar dapat kita lihat topografi permukaan material yang melalui proses pemesinan tanpa coolant dimana terlihat dengan jelas adanya permukaan yang kurang rata ditandai dengan adanya kerutan-kerutan pada permukaan material uji. Hal ini dapat disebabkan adanya *deformasi plastis* yang terjadi tanpa pendinginan mata pahat sehingga kinerja mata pahat menjadi tidak optimum.



Gambar V.10 Perbesaran 100 kali proses *dry cutting* dengan *detector* QBSD

Pada gambar diatas dapat kita lihat proses SEM dilakukan menggunakan *detector* QBSD yang dapat digunakan untuk menganalisa unsur-unsur yang ada pada permukaan material uji. Bagian berwarna hitam yang ada pada gambar dapat berupa kotoran yang ada pada permukaan ataupun lubang yang ada pada permukaan. Dari hasil penelusuran di titik 1 pada gambar didapatkan data sebagai berikut :

SEMQuant results. Listed at 15:27:29 on 16/06/08
 Operator: jaya
 Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: Tanpa coolant - 01

System resolution = 60 eV

Quantitative method: ZAF (2 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

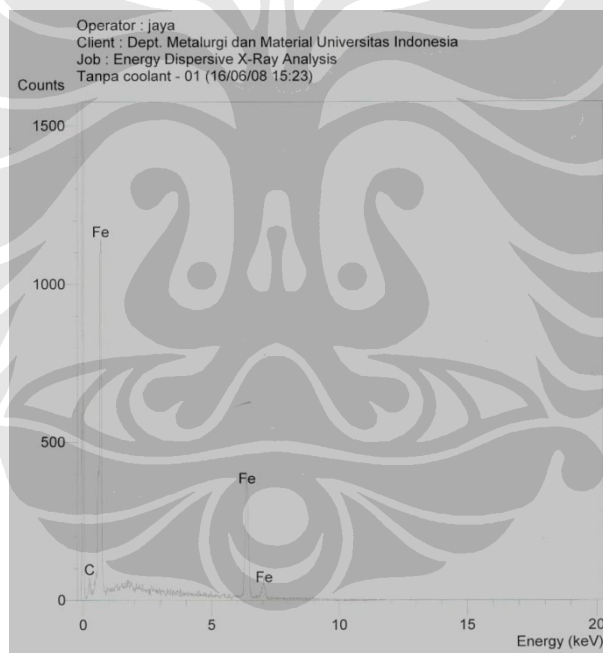
1 peak possibly omitted: 5.48 keV

Standards :
 C K Carbon Low 13/09/06
 Fe K FeS2 22/03/06

Elmt	Spect.	Element	Atomic
	Type	%	%
C K	ED	2.46	10.49
Fe K	ED	97.54	89.51
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

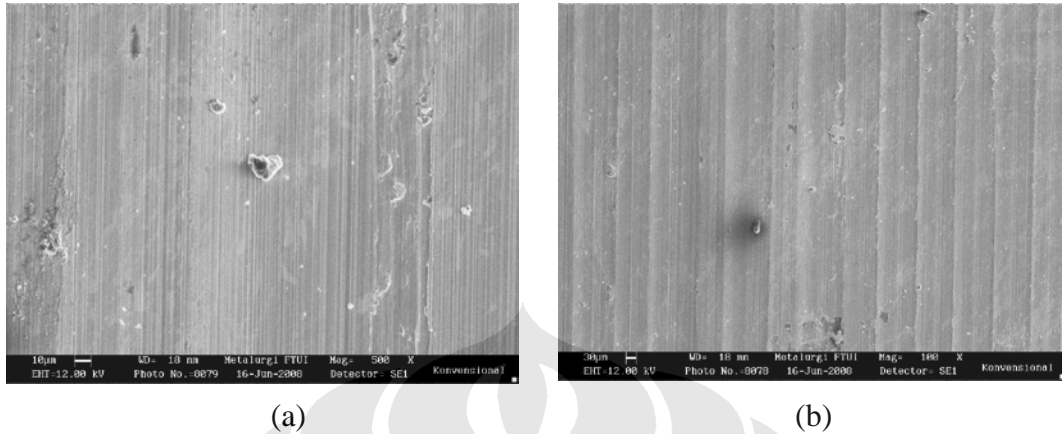
Gambar V.11 Data hasil analisa unsur material uji pada proses dry cutting



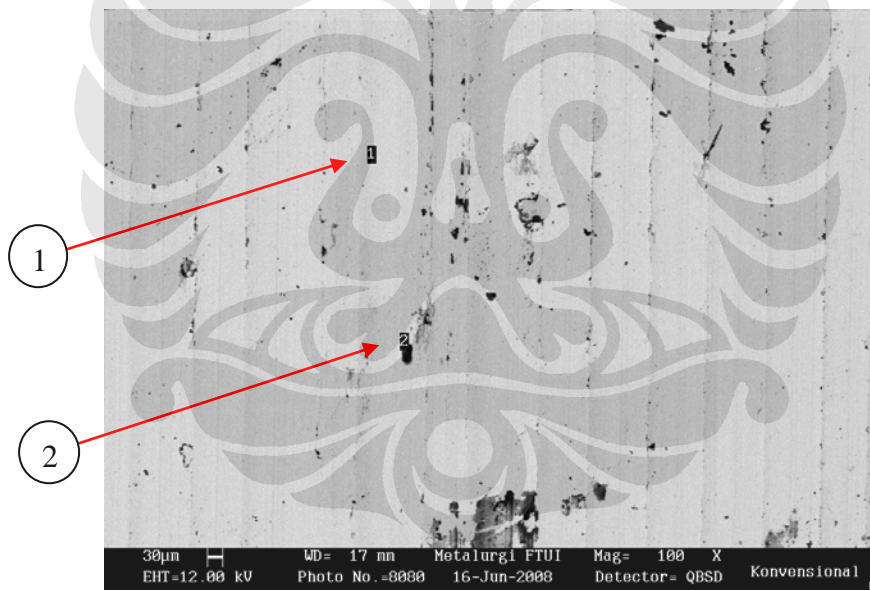
Gambar V.12 grafik hasil analisa unsur material uji pada proses dry cutting

Dari hasil analisa unsur didapatkan unsur pembentuk yang ada di titik 1 didominasi oleh unsur Fe sebanyak 97.54 % sedangkan sisanya unsur C dengan prosentase 2.46 %. Terdapat pula unsur-unsur lain dalam jumlah yang kecil.

- Hasil SEM pada material uji pada proses pemesinan dengan cooling fluids konvensional.



Gambar V.13 Hasil SEM pada proses pemesinan dengan cooling fluids konvensional
a)Perbesaran 100 kali; b)Perbesaran 500 kali



Gambar V.14 Hasil SEM pada pemesinan dengan cooling fluid konvensional menggunakan detector QBSD

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa permukaan material uji yang dikenakan pemesinan dengan *cooling fluids* konvensional memiliki tekstur permukaan yang relatif lebih rata dan halus bila dibandingkan dengan hasil pemesinan secara *dry cutting*. Pada gambar V.13 dapat kita lihat permukaan material uji dengan konvensional cooling fluids lebih bersih, ditandai dengan

sedikitnya bagian berwarna hitam. Pada material ini dilakukan dua buah penelusuran pada permukaan untuk mengetahui unsur-unsur yang ada pada permukaan (pada titik 1 dan 2 yang ada pada gambar V.14).

```
SEMQuant results. Listed at 15:46:08 on 16/06/08
Operator: jaya
Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
Spectrum label: Konvensional - 01

System resolution = 60 eV

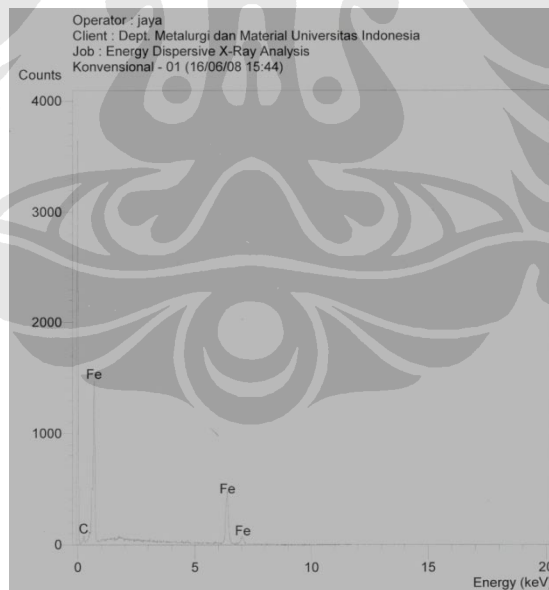
Quantitative method: ZAF ( 2 iterations).
Analysed all elements and normalised results.

Standards :
C K      Carbon Low 13/09/06
Fe K     FeS2 22/03/06

Elmt  Spect. Element  Atomic
      Type      %        %
C K   ED        0.36   1.66
Fe K  ED        99.64  98.34
Total                100.00 100.00

* = <2 Sigma
```

Gambar V.15 Data hasil analisa unsur pada pemesinan menggunakan cooling fluid konvensional di titik 1 pada gambar V.14



Gambar V.16 Grafik hasil analisa unsur pada pemesinan menggunakan cooling fluid konvensional di titik 1 pada gambar V.14

Pada penelusuran di titik satu didapatkan data bahwa unsur pembentuk utama permukaan di titik satu didominasi oleh unsur Fe dan C. Tidak jauh berbeda dengan hasil yang didapatkan pada pengamatan material uji yang

mengalami *dry cutting*. Sedangkan untuk pengamatan di titik kedua hasil yang didapat ialah :

```
SEMQuant results. Listed at 15:52:31 on 16/06/08
Operator: jaya
Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
Spectrum label: Konvensional - 02

System resolution = 61 eV

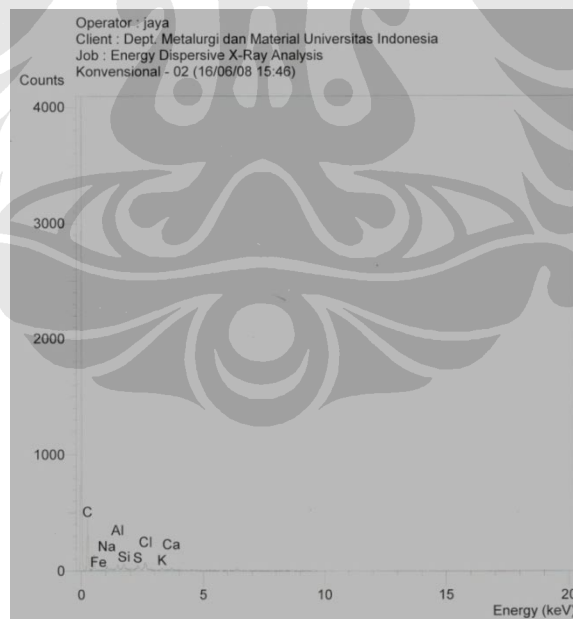
Quantitative method: ZAF ( 3 iterations).
Analysed all elements and normalised results.

Standards :
C K Carbon Low 13/09/06
Na K Orthoclase 22/03/06
Al K CeAl2 03/03/07
Si K Low Carbon Steel 13/09/06
S K FeS2 22/03/06
Cl K KCl 15/02/94
K K Orthoclase 22/03/06
Ca K Orthoclase 22/03/06
Fe K FeS2 22/03/06

Elmt Spect. Element Atomic
Type % %
C K ED 46.26 72.29
Na K ED 3.34 2.73
Al K ED 2.56 1.78
Si K ED 1.86 1.24
S K ED 3.07 1.80
Cl K ED 24.62 13.04
K K ED 3.29 1.58
Ca K ED 3.81 1.78
Fe K ED 11.19 3.76
Total 100.00 100.00

* = <2 Sigma
```

Gambar V.17 Data hasil analisa unsur pada pemesian menggunakan cooling fluid konvensional di titik 2 pada gambar V.14

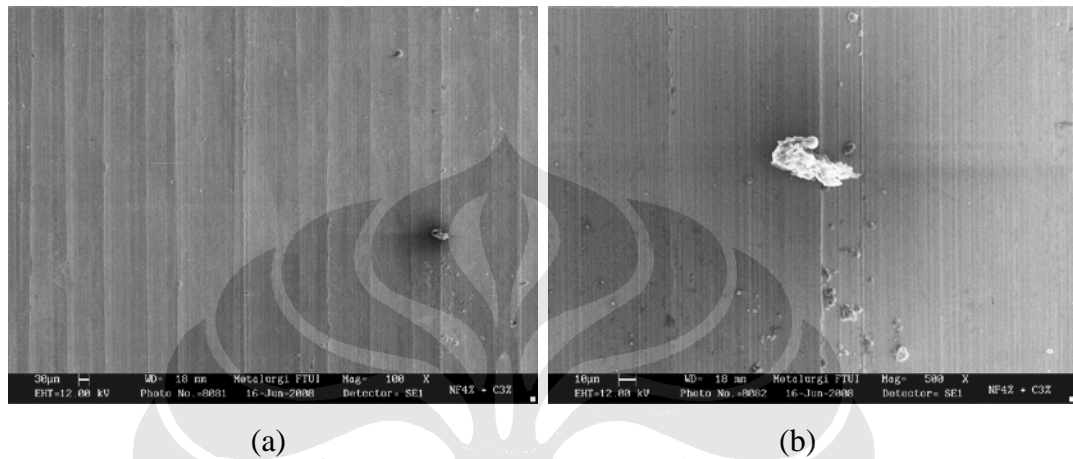


Gambar V.18 Grafik hasil analisa unsur pada pemesian menggunakan cooling fluid konvensional di titik 2 pada gambar V.14

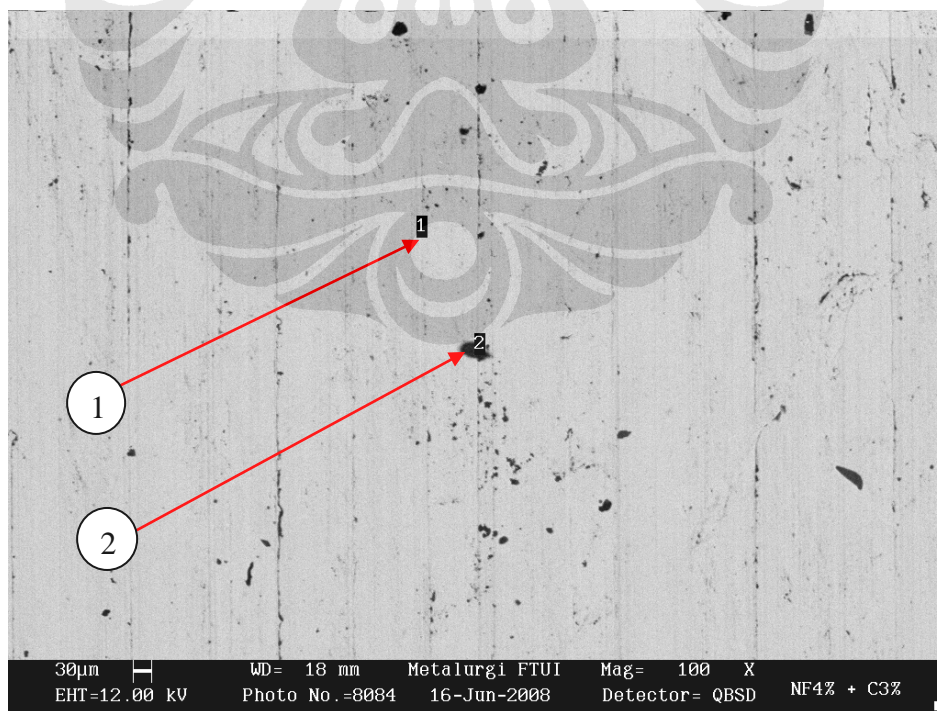
Pada pengamatan yang dilakukan di titik kedua permukaan material uji, dapat dilihat bahwa terjadi perubahan komposisi unsur yang ada di permukaan

dimana unsur C dan Cl memiliki prosentase terbesar, ini mungkin disebabkan adanya kotoran atau penambahan partikel yang bukan penyusun utama dari material uji hal ini dapat kita lihat dengan rendahnya nilai Fe pada titik 2.

- Hasil SEM pada material uji dengan cooling fluid Nanofluida 4% + 3.3 % *lubricant*.



Gambar V.19 Hasil SEM pada proses pemesinan dengan cooling fluids Nanofluida 4%+Lubricant 3%; a)Perbesaran 100 kali; b)Perbesaran 500 kali



Gambar V.20 Hasil SEM pada pemesinan dengan cooling fluid nanofluida 4%+Lubricant 3% dan detector QBSD

SEMQuant results. Listed at 16:52:57 on 16/06/08
 Operator: jaya
 Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: NF4%+C3% - 01

System resolution = 60 eV

Quantitative method: ZAF (2 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 1.76 keV

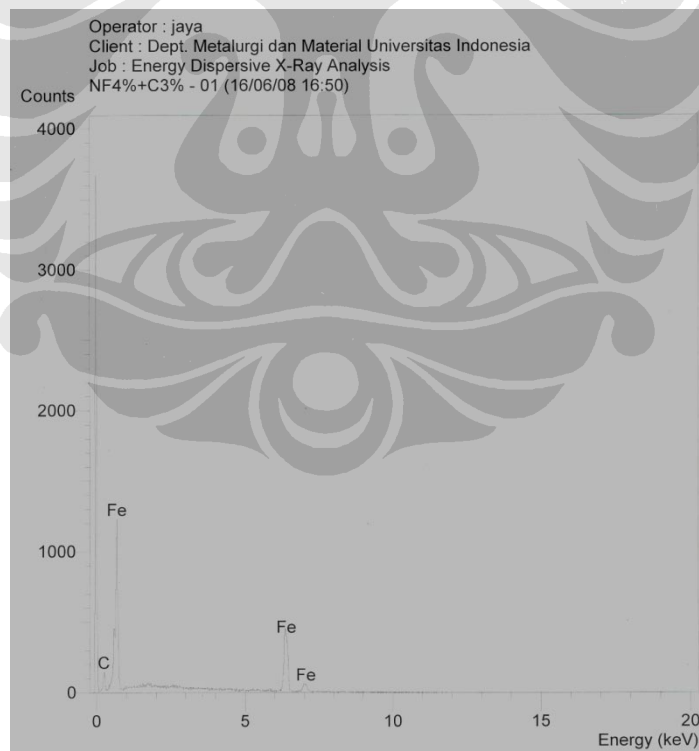
Standards :

C K Carbon Low 13/09/06
 Fe K FeS2 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.74	3.35
Fe K	ED	99.26	96.65
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

Gambar V.21 Data hasil analisa unsur pada pemesinan menggunakan cooling fluids nanofluida 4%+lubricant 3% di titik 1 pada gambar V.20



Gambar V.22 Grafik hasil analisa unsur pada pemesinan menggunakan cooling fluids nanofluida 4%+lubricant 3% di titik 1 pada gambar V.20

SEMQuant results. Listed at 17:01:34 on 16/06/08
 Operator: jaya
 Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: NF4%+C3% - 02

System resolution = 59 eV

Quantitative method: ZAF (3 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 3.70 keV

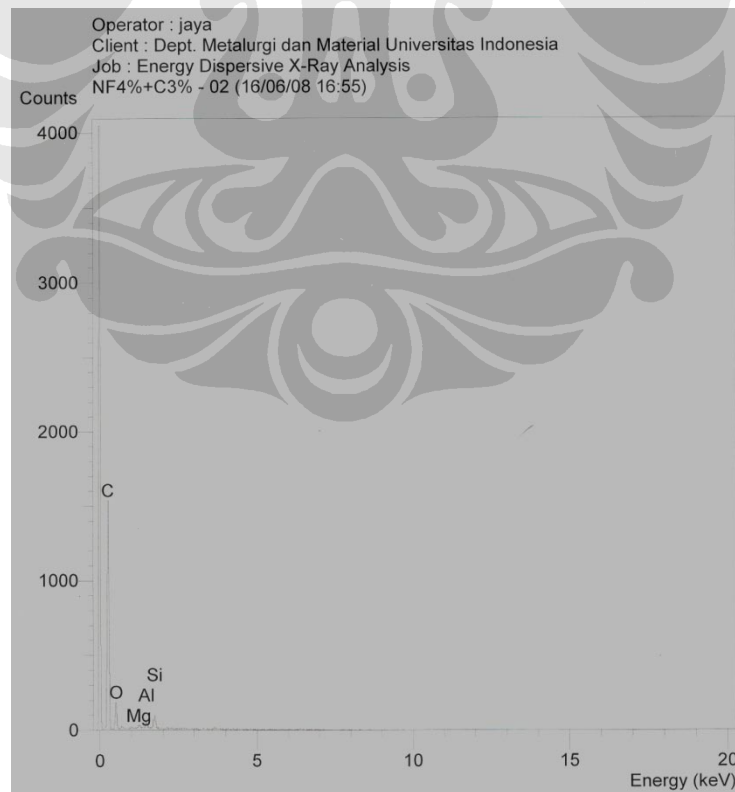
Standards :

C K Carbon Low 13/09/06
 O K AL2O3 22/03/06
 Mg K MagOxide 22/03/06
 Al K CeAl2 03/03/07
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	41.49	50.85
O K	ED	45.99	42.32
Mg K	ED	2.16	1.31
Al K	ED	4.36	2.38
Si K	ED	6.01	3.15
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

Gambar V.23 Data hasil analisa unsur pada pemesinan menggunakan cooling fluids nanofluida 4%+lubricant 3% di titik 2 pada gambar V.20



Gambar V.24 Grafik hasil analisa unsur pada pemesinan menggunakan cooling fluids nanofluida 4%+lubricant 3% di titik 2 pada gambar V.20

Dari hasil proses SEM yang dilakukan pada material uji yang menggunakan *cooling fluids* nanofluida 4% + *lubricant* 3% didapatkan hasil bahwa permukaan material uji lebih halus bila dibandingkan dengan dengan dua sampel uji lainnya dimana pada permukaan material uji terlihat sedikitnya kotoran yang ada di permukaan. Ini memperkuat hasil pengukuran *roughness* yang menunjukkan nilai *roughness* pada penggunaan *cooling fluids* nanofluida 4% + *lubricant* 3% memiliki pengaruh terbaik dalam hal untuk menghasilkan nilai kekasaran permukaan terbaik.

V.3.2 Analisa Tool Wear

Analisa terhadap parameter kerusakan mata pahat merupakan salah satu jenis analisa yang digunakan dalam tiap proses manufaktur untuk melihat kerusakan yang terjadi akibat deformasi plastis yang terjadi terutama pada *cutting edge* sebuah *insert*. Dari analisa sebuah mata pahat dapat diketahui perkiraan umur mata pahat sehingga memudahkan dalam proses kontrol manufaktur terutama pada bagian kualitas produk pemesinan. *Tool failure* atau kerusakan mata pahat umumnya dibagi menjadi dua jenis yaitu :

- *Slow death mechanism* : Kerusakan secara kontinu pada bagian *flank* atau dibawah *cutting edge* atau kerusakan pada bagian *rake face insert*.
- *Sudden-death mechanism* : Termasuk kerusakan yang terjadi secara cepat tanpa didahului timbulnya gejala *slow death mechanism*.

Kerusakan secara kontinu seperti yang telah disebutkan diatas dapat mempengaruhi besar gaya potong, tenaga yang dibutuhkan sistem dalam proses dan yang paling penting ialah pengaruh terhadap ketepatan dimensional yang berhubungan dengan profil permukaan.

Penentuan mengenai kriteria umur pahat merupakan hal yang penting dalam proses manufaktur, sayangnya penentuan kriteria umur mata pahat ini merupakan sebuah proses yang sangat bergantung pada proses yang digunakan dan banyak faktor-faktor lainnya [28]. Pendekatan yang umumnya banyak digunakan dalam sebuah estimasi umur pahat ialah melalui beberapa besaran yang menggambarkan besar dari kerusakan pada bagian mata pahat. Besaran tersebut ialah :

Tabel V.6 Batas kerusakan Insert [28]

Material Insert	Besaran kerusakan (mm)
HSS Tools, Roughing	$V_b \text{ max} = 1.5$
HSS Tools, Finishing	$V_b = 0.75$
Carbide Tools	$V_b \text{ max} = 0.7$ atau $V_b = 0.4$
Ceramic tools	$V_b \text{ max} = 0.6$

Dengan nilai V_b dan $V_b \text{ max}$ merupakan interpretasi gambar dibawah ini :



Gambar V.25 Nilai kerusakan mata pahat

Prediksi dari umur sebuah mata pahat pada dasarnya merupakan hal yang sangat kompleks untuk dilakukan. Salah satu parameter yang mempengaruhi umur mata pahat ialah temperatur yang terjadi pada *cutting zone* saat pemakanan berlangsung, hal ini dapat diartikan bahwa umur mata pahat bergantung pada proses pendinginan yang terjadi saat *material removal* berlangsung. Sedangkan temperatur yang ada pada *cutting zone* selain dipengaruhi oleh pendingin yang digunakan juga dipengaruhi oleh besarnya *cutting speed* dari proses. Dari persamaan dibawah ini dapat kita lihat pengaruh *cutting speed* pada temperatur :

Dari persamaan diatas dapat kita lihat pengaruh *cutting speed* terhadap temperatur antara material dan insert saat pemotongan berlangsung. Untuk memprediksi umur matapahat yang dipakai dalam pengujian kita dapat menggunakan persamaan taylor yang menyatakan :

$$vt^n = C \dots\dots\dots(V.2)$$

Dimana :

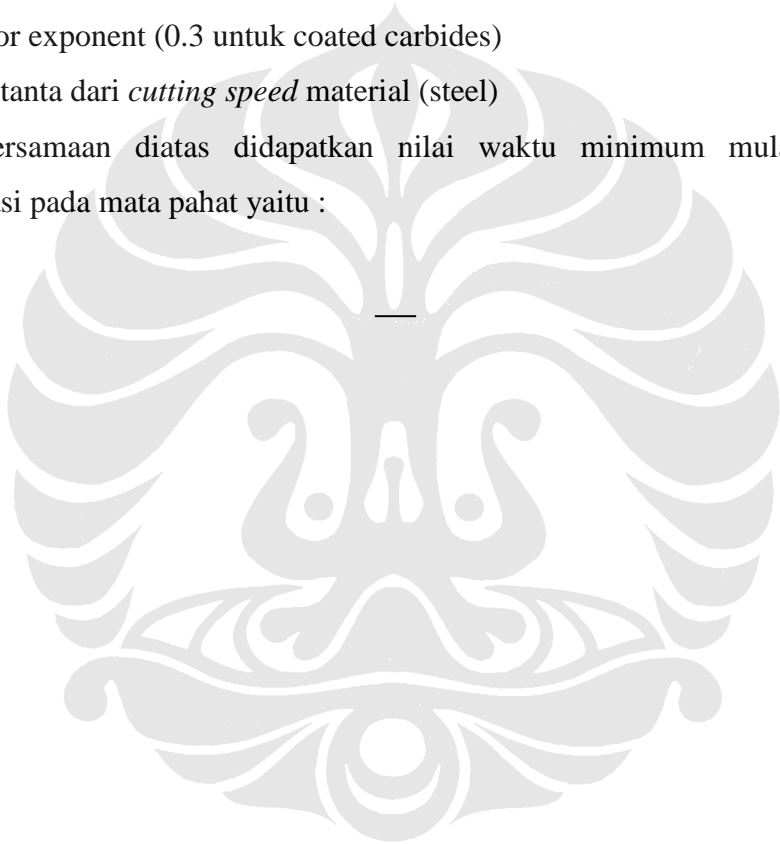
v : Rekomendasi *cutting speed* (m/min) pada material kerja

t : *tool life* (min)

n : Taylor exponent (0.3 untuk coated carbides)

C: Konstanta dari *cutting speed* material (steel)

Dari persamaan diatas didapatkan nilai waktu minimum mulai terjadinya deformasi pada mata pahat yaitu :



/

terdapat pengembangan dari persamaan Taylor yang telah mengakomodasi parameter-parameter lain yang dapat mempengaruhi prediksi umur mata pahat. Persamaan yang dimaksud pada dasarnya tidak berbeda jauh dengan persamaan Taylor namun dengan menggantikan konstanta C dengan nilai konstanta baru yaitu konstanta K.

$$vt^n = K \dots\dots\dots(V.4)$$

Dimana nilai konstanta K merupakan penggabungan pengaruh antara *feed, depth of cut* dan nilai kekasaran permukaan). Atau dapat kita tuliskan bahwa nilai konstanta K ialah :

$$K = VT^n F^m d^p \dots\dots\dots(V.5)$$

Permasalahan yang menjadi kendala dalam proses estimasi umur mata pahat ialah dalam menentukan faktor exponent dari tiap-tiap variabel diatas yang memerlukan penelitian terpisah lebih lanjut. Sehingga sebagai pembanding dalam proses estimasi umur mata pahat yang digunakan dalam penelitian, peneliti akan membandingkannya dengan estimasi umur mata pahat yang digunakan pada proses *dry cutting* pada stainless steel dimana nilai K telah diketahui dengan material *insert* berupa carbida. (A.R Konecny, *ASTME Fundamental of Tool Design*) pada [6]. Dari perhitungan menggunakan persamaan (V.4):

$$vt^n = K$$

Dimana nilai K untuk kondisi pemotongan stainless steel pada proses *dry cutting* sebesar 560 dan besar exponent Taylor 0.167 dengan *depth of cut* 0.25 inch. Dimana nilai *cutting speed* yang digunakan ialah nilai *cutting speed* pada proses pemesinan yaitu pada pemesinan dengan putaran mesin 600, 1100 dan 2200 rpm. Nilai *cutting speed* pada putaran mesin tersebut berturut-turut ialah : 94.2 m/min; 172.7 m/min; 345.4 m/min.

Menggunakan persamaan (V.4) dan dengan besaran yang telah disebutkan sebelumnya maka didapatkan estimasi waktu umur mata pahat ialah :

- Pada putaran mesin 600 rpm, umur mata pahat sekitar 700 jam.
- Pada putaran mesin 1100 rpm, umur mata pahat sekitar 18.92 jam.
- Pada putaran mesin 2200 rpm, umur mata pahat sekitar 0.29 jam.

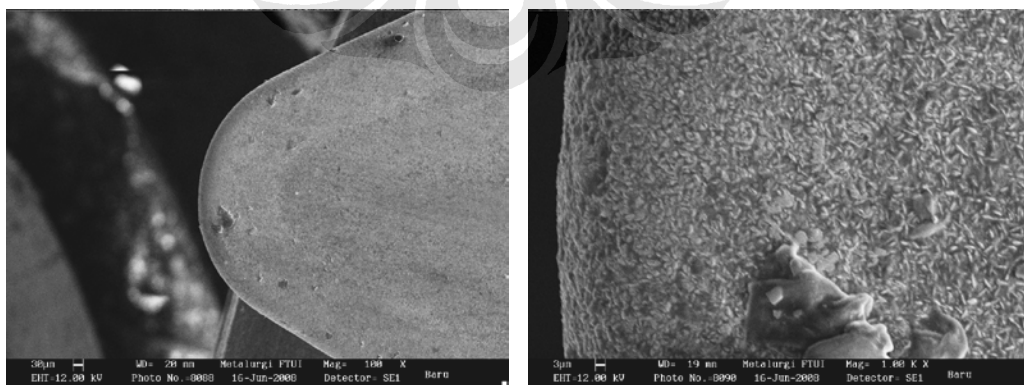
Dari perhitungan diatas terlihat bahwa kenaikan nilai *cutting speed* merupakan faktor yang dominan pada umur mata pahat. Bila dibandingkan dengan parameter pemesinan yang dilakukan pada penelitian maka dapat dilihat umur mata pahat yang digunakan akan berada diatas umur mata pahat dari hasil perhitungan pada proses *dry cutting*. Dikarenakan pada penelitian digunakan *cooling fluids* yang selain dapat menurunkan temperatur mata pahat juga dapat memberikan efek pelumasan pada bidang sentuh antara *insert* dan material kerja, sehingga dapat mengurangi friksi pada proses pemesinan dan mengurangi *cutting force*.

Selain faktor waktu pemesinan, kualitas mata pahat juga dapat dilihat melalui beberapa parameter lain yaitu :

- Jumlah material removed dalam interval waktu tertentu.
- Pengamatan langsung melalui mikroskop atau alat bantu lainnya seperti alat *scanning electron microscope*.

Dalam penelitian yang telah dilakukan, didapatkan gambar bentuk permukaan dari *cutting tools* yang dipakai dalam proses pemesinan. Sampel yang digunakan pada proses SEM ini ialah *cutting tools* yang dipakai pada proses :

- Pemesinan dengan *cooling fluids* Nanofluida 4 % + *lubricant* 3%
- Pemesinan dengan *cooling fluids* Konvensional
- Mata pahat baru (belum pernah digunakan sebelumnya)



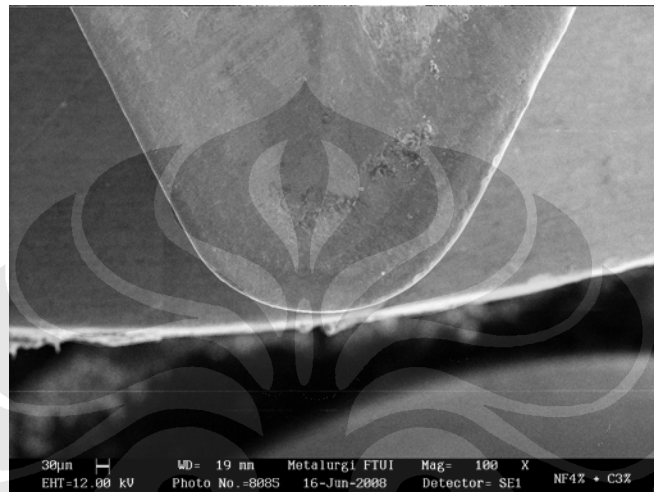
(a)

(b)

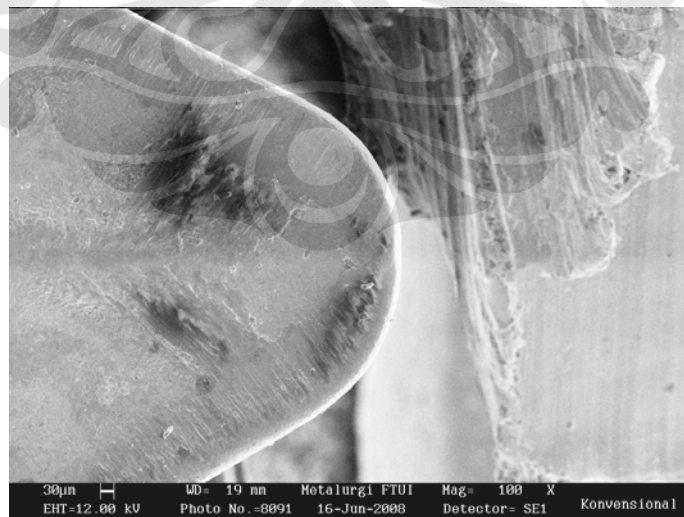
Gambar V.26 Hasil SEM pada *cutting tools* baru

a) Perbesaran 100 kali; b) Perbesaran 1000 kali

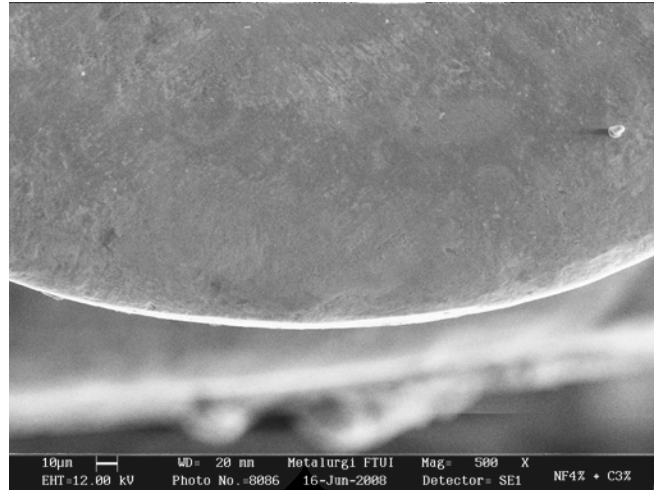
Pada gambar diatas terlihat permukaan mata pahat baru yang belum pernah digunakan sebelumnya, gambar a) merupakan gambar permukaan material baru yang pada sisinya belum terlihat adanya pengikisan dikarenakan belum pernah digunakan pada proses pemesinan. Sedangkan pada gambar b) terlihat permukaan material mata pahat baru dengan perbesaran sekitar 1000 kali sehingga dapat dilihat susunan terluar dari *coating* yaitu susunan unsur TiN.



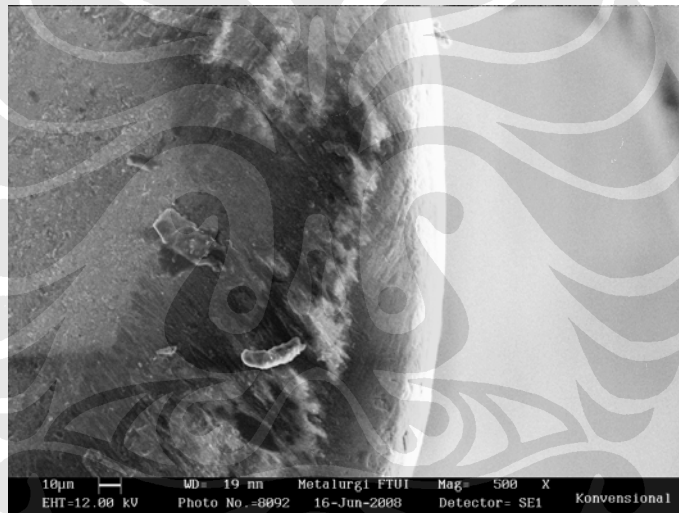
Gambar V.27 Hasil SEM pada mata pahat pemesinan dengan cooling fluids Nanofluida 4% + lubricant 3 % dengan perbesaran 100 kali



Gambar V.28 Hasil SEM pada mata pahat pemesinan dengan cooling fluids konvensional dengan perbesaran 100 kali



Gambar V.29 Hasil SEM pada mata pahat pemesinan dengan cooling fluids Nanofluida 4% + lubricant 3 % dengan perbesaran 500 kali



Gambar V.30 Hasil SEM pada mata pahat pemesinan dengan cooling fluids konvensional dengan perbesaran 500 kali

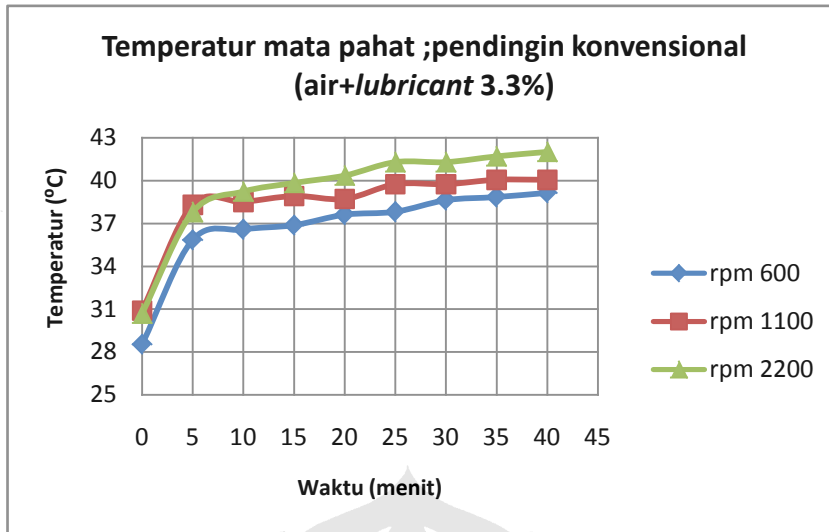
Pada gambar diatas dapat dilihat perbandingan antara permukaan mata pahat yang digunakan pada pemesinan dengan *cooling fluids* nanofluid 4% + *lubricant* 3% dan *cooling fluids* konvensional pada perbesaran 100 kali. Dari gambar terlihat pada penggunaan *cooling fluids* konvensional terdapat kerutan atau bekas gesekan yang berada pada bagian samping *cutting edge*. Bila dibandingkan dengan gambar mata pahat yang menggunakan *cooling fluids* nanofluida 4% + *lubricant* 3% dapat dilihat pada permukaannya relatif lebih bersih dari bekas gesekan. Untuk selanjutnya merupakan gambar perbesaran 500

kali dari mata pahat dengan *cooling fluids* konvensional dan mata pahat dengan *cooling fluids* nanofluida 4% + *lubricant* 3%. Dari Gambar dibawah ini kita dapat melihat lebih jelas bahwa pada penggunaan *cooling fluids* konvensional terdapat banyak bekas gesekan. Dengan membandingkan 4 gambar tersebut kita dapat melihat pengaruh *cooling fluids* terhadap keadaan mata pahat untuk memprediksi batas usia dari mata pahat tersebut, kesimpulan yang dapat diambil ialah bahwa pada penelitian yang telah dilakukan *cooling fluids* nanofluida memberikan efek yang lebih baik bila dibandingkan dengan *cooling fluids* konvensional. Untuk mengetahui pengaruh penggunaan nanofluida terhadap temperatur di mata pahat maka kita dapat melihat analisisnya sebagai berikut.

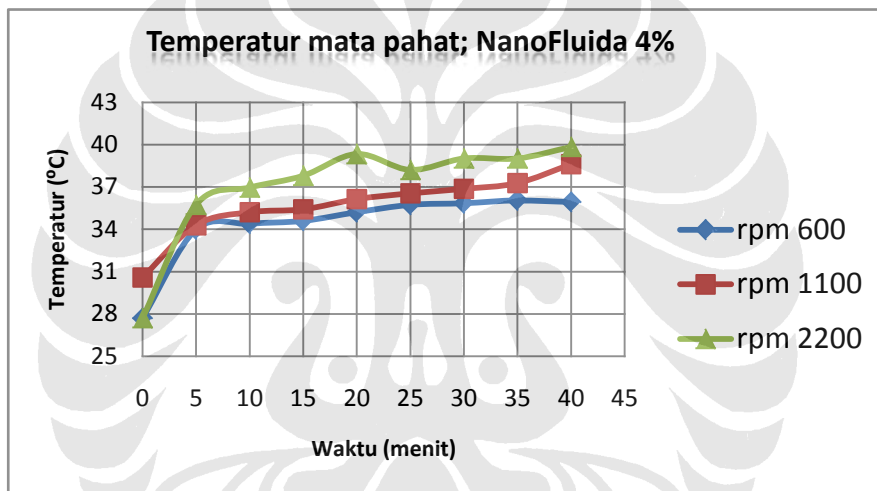
V.3.3 Pengaruh Nanofluida Terhadap Temperatur Pemotongan

Untuk mencapai tujuan akhir penelitian, melihat pengaruh penggunaan nanofluida terhadap kualitas permukaan hasil pemesinan, maka lebih baik kalau kita melakukan investigasi pengaruh penggunaan nanofluida terhadap temperatur pemotongan (*cutting temperature*) yang terjadi. Seperti yang telah dijelaskan pada bagian awal laporan penelitian, bahwa sedikit penurunan temperatur pemotongan, diharapkan akan berdampak signifikan terhadap kualitas permukaan hasil pemesinan. Selain itu, penurunan temperatur pemotongan diharapkan mampu meningkatkan umur mata pahat, sehingga secara tidak langsung memberikan (sedikit) keuntungan ekonomis.

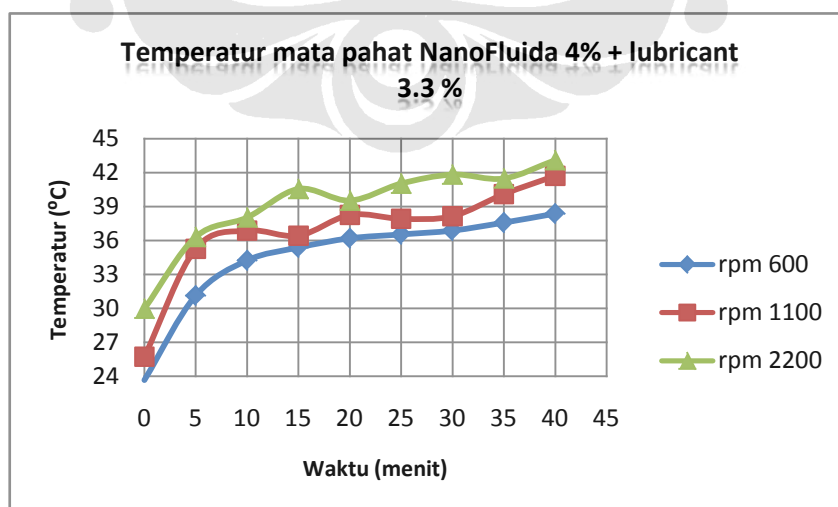
Berikut ditampilkan hasil percobaan pergerakan temperatur pemotongan—diukur pada mata pahat—pada berbagai variasi putaran motor (rpm) *spindle*, waktu pemesinan (t), dan kedalaman pemotongan (*depth of cut*) yang dijaga konstan pada 1.5 mm untuk masing-masing jenis sistem pendingin yang digunakan dalam percobaan ini.



Gambar V.31 Temperatur mata pahat-pendingin konvensional (air+lubricant 3.3%)

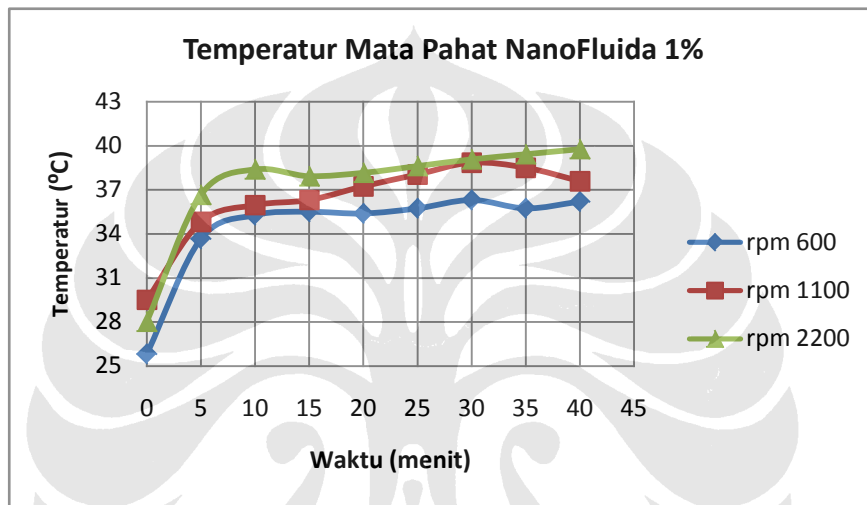


Gambar V.32 Profil temperatur mata pahat; Nanofluida konsentrasi 4%

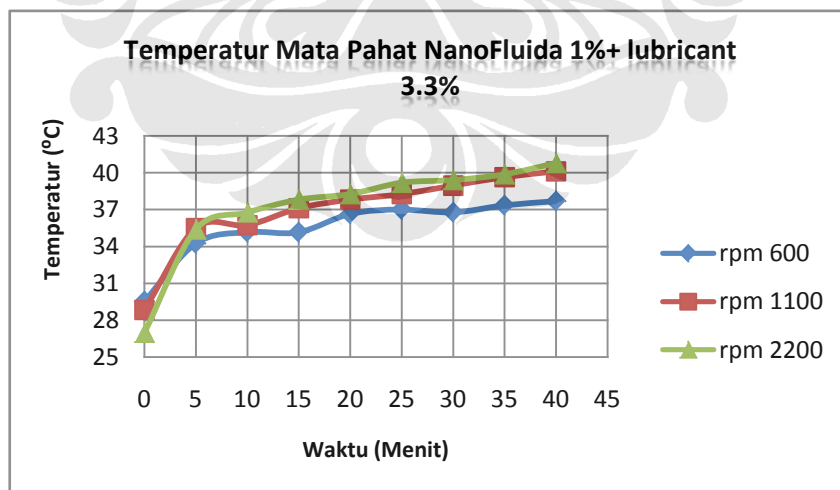


Gambar V.33 Profil temperatur mata pahat pada penggunaan
Nanofluida konsentrasi 4% + lubricant 3.3%.

Dari ketiga gambar di atas terlihat jelas bahwa pola yang terbentuk adalah temperatur mata pahat semakin tinggi (meningkat) seiring bertambah cepatnya putaran motor (rpm) *spindle* mesin yang digunakan. Pola ini berlaku untuk setiap jenis sistem pendingin yang digunakan. Selain itu, terlihat bahwa fluida pendingin nanofluida 4% konsentrasi mempunyai kemampuan penghantar kalor paling baik diantara ketiganya (terlihat menghasilkan temperatur mata pahat yang paling rendah). Fenomena terakhir akan terlihat jelas pada gambar-gambar berikutnya.



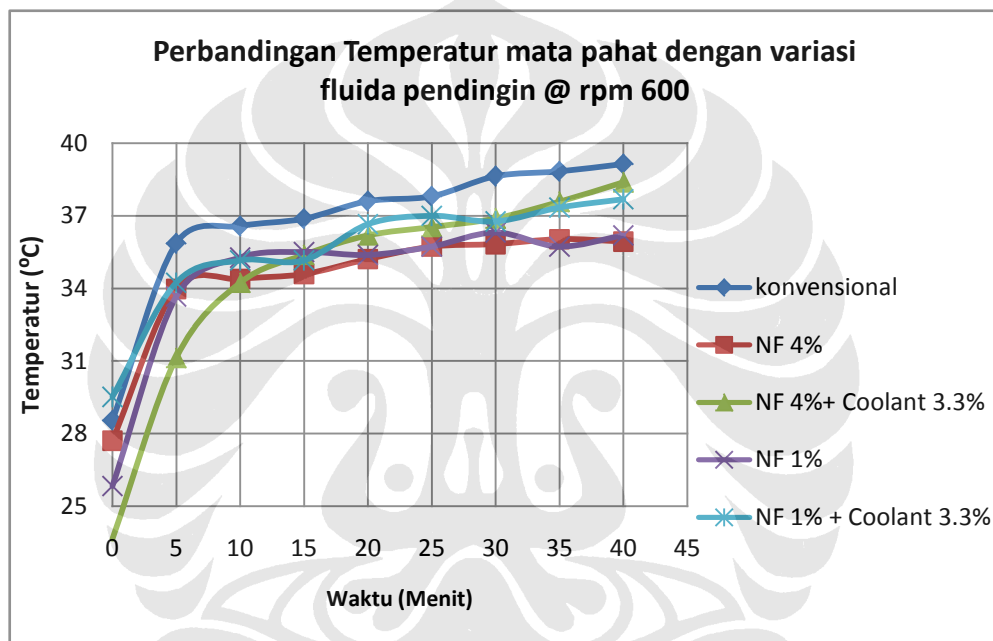
Gambar V.34 Pergerakan temperatur mata pahat; Nanofluida konsentrasi 1%



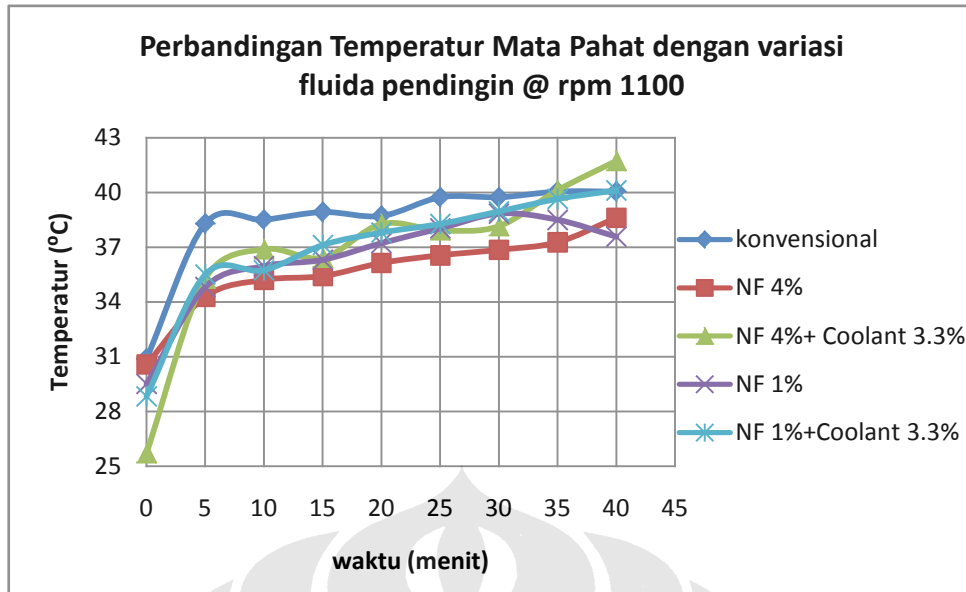
Gambar V.35 Profil temperatur mata pahat pada penggunaan Nanofluida konsentrasi 1%+lubricant 3.3%.

Pola yang sama juga, kecenderungan meningkatnya temperatur seiring bertambahnya kecepatan putar (rpm) *spindle* motor mesin, masih terlihat pada sistem pendingin dengan nanofluida 1% dan nanofluida 1% yang ditambahkan dengan *lubricant* dengan konsentrasi 3.3%.

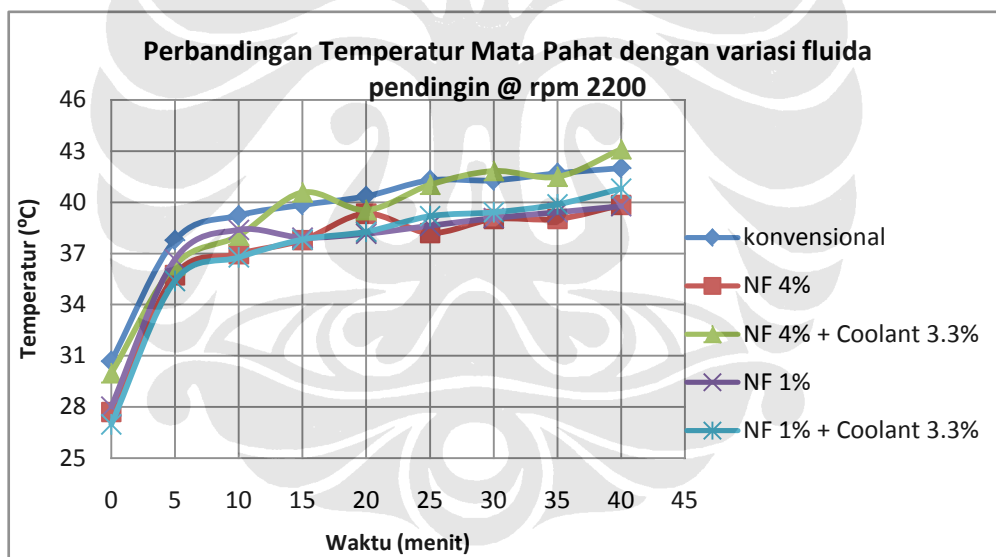
Selanjutnya, untuk melihat perbedaan kemampuan sistem pendingin yang digunakan, maka lebih baik untuk membandingkan semua sistem pendingin yang digunakan pada parameter pemesinan—kecepatan putar *spindle*, waktu pemesinan, dan kedalaman pemakanan (*depth of cut*)—yang sama.



Gambar V.36 Perbandingan temperatur mata pahat yang terbentuk pada variasi sistem pendingin pada putaran *spindle* (rpm) 600.



Gambar V.37 Profil temperatur mata pahat yang terbentuk pada variasi sistem pendingin pada putaran spindle (rpm) 1100



Gambar V.38 Perbandingan temperatur mata pahat yang terbentuk pada variasi sistem pendingin pada putaran spindle (rpm) 2200

Meskipun sedikit sulit untuk membedakan kemampuan masing-masing kemampuan sistem pendingin, dari ketiga gambar di atas (V.36-V.38), namun jika dilihat lebih teliti maka ada pola identik yang terbentuk pada masing masing kecepatan putar *spindle*. Jika diurutkan kemampuan sistem pendingin dari yang paling baik ke paling jelek—dengan parameter temperatur yang terjadi di mata

pahat (*cutting temperature*) selama proses pemesinan—adalah sebagai berikut: Nanofluida 4% > Nanofluida 1% > Nanofluida 4% + *lubricant* 3.3% > Nanofluida 1% + *lubricant* 3.3% > pendingin konvensional (air + *lubricant* 3.3%). Dengan kata lain, dilihat dari kemampuannya menghantarkan kalor pada proses pemesinan, sistem pendingin yang menggunakan nanofluida konsentrasi 4% mempunyai kemampuan yang paling baik, dan pendingin konvensional paling buruk jika dibandingkan dengan sistem pendingin lain yang diuji pada penelitian ini.

Fenomena ini dapat disebabkan karena konsentrasi nano partikel paling tinggi terdapat pada nano fluida 4%. Kandungan nano partikel (berupa Al_2O_3) ini dengan sendirinya meningkatkan konduktifitas termal konduksi dan *heat transfer coefficient* (koefisien perpindahan panas) pada konveksi paksa (*forced convection*). Hasil percobaan ini sesuai dengan beberapa penelitian pendahuluan yang memperlihatkan kenaikan konduktifitas termal dan koefisien perpindahak panas pada nanofluida dengan konsentrasi 4%.

Dengan menggunakan model yang diformulasikan oleh Li dan Peterson [2006] untuk menghitung kenaikan konduktivitas termal pada nanofluida air- Al_2O_3 , maka kenaikan konduktivitas termal yang terjadi berkisar antara 27% sampai 35%.

$$\frac{k_{eff} - k_f}{k_f} = 0.764481\phi + 0.018688867t - 0.4214717 \quad (V.6)$$

Disini, ϕ adalah fraksi volume partikel dan t adalah temperature (dalam celcius). K_{eff} adalah konduktivitas termal nanofluida, dan k_f adalah konduktivitas termal fluida dasar

V.3.4 Perhitungan *Local Nusselt Number*

Selanjutnya, kenaikan konduktivitas termal fluida pendingin (jenis nanofluida) belum cukup membuktikan kemampuan menghantarkan kalor nanofluida [18]. Untuk menunjukkan bahwa nanofluida mempunyai kemampuan menghantarkan kalor yang (jauh) lebih tinggi dibanding dengan pendingin konvensional, maka parameter yang perlu ditinjau adalah koefisien perpindahan

kalor konveksi yang terjadi saat proses pemesinan. Nilai koefisien ini, h ($W/m^2.K$), penting ditinjau karena kondisi fluida kerja adalah dengan proses konveksi paksa (*forced convection*). Nilai h tidak pernah konstan, tetapi tergantung pada karakter fluida, geometri aliran, jenis aliran (turbulent/laminar), kecepatan aliran, serta kondisi lingkungan perpindahan panas berlangsung. Persamaan yang memodelkan nilai h adalah [29]:

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (V.7)$$

Dari sini, dapat dilihat kalau nilai h sebanding dengan bilangan Nusselt (*Nusselt number*) dan konduktivitas termal fluida yang bersangkutan pada kondisi kerja tertentu. Untuk jenis aliran pada percobaan ini, aliran di luar pipa, *Nusselt number* didefinisikan sebagai [29] yang merujuk pada [Churcill dan Bernstein, 1977]:

$$Nu_D = 0.3 + \frac{0.62Re^{1/2}Pr^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282,000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (V.8)$$

Dengan Re adalah *Reynold number* dan Pr adalah *Prandtl number*. *Reynold number* didefinisikan sebagai [29]:

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (V.9)$$

Dengan Re , ρ , V , D dan μ berturut-turut adalah *Reynold number*, kerapatan fluida, kecepatan aliran fluida, diameter pipa, dan kekentalan (*viscosity*). Semua *properties* tersebut dilihat pada temperatur lapisan (*film temperature*), $T_f = (T_a + T_s)/2$, T_a adalah temperatur lingkungan dan T_s adalah temperatur di permukaan pipa (*tube*).

Pada pembahasan ini, peneliti akan memberikan distribusi koefisien perpindahan panas (h) untuk proses pemesinan dengan pendingin: (1) konvensional, (2) nanofluida 4%, dan (3) nanofluida 4% + *lubricant* 3.3% pada putaran *spindle* 600, 1100, dan 2200 rpm (*rotation per minute*) serta waktu pemesinan 10 menit. Sebagai contoh perhitungan, peneliti akan memberikan gambaran proses penghitungan koefisien perpindahan panas pada fluida pendingin jenis nanofluida 4% dengan putaran *spindle* 600 rpm, dan waktu pemesinan 10 menit. Untuk nilai koefisien perpindahan panas selanjutnya, peneliti hanya akan

memberikan distribusi nilainya saja berupa tabel dan grafik tanpa perhitungan yang spesifik.

Untuk proses pemesinan dengan pendingin nanofluida 4% pada putaran *spindle* 600 rpm dan waktu pemesinan 10 menit, kondisi yang terjadi adalah sebagai berikut:

- Temperatur lingkungan, $T_a = 30\text{ }^\circ\text{C} = 303.15\text{ K}$.
- Temperatur permukaan material, $T_s = 530.384\text{ K}$.
- *Film temperature*, $T_f = (300.65+530.384)/2 = 416.767$
- Kerapatan nanofluida, ρ_{nf} , didapatkan dengan menghitung kerapatan gabungan nano partikel dengan air ρ_{nf} dimodelkan sebagai [30]:

$$\rho_{nf} = \frac{m_{nf}}{\frac{m_p}{\rho_p} + \frac{m_w}{\rho_w}} \quad (\text{V. 10})$$

Dengan m_{nf} (massa nanofluida) = 20.053 kg, m_p (massa nano partikel Al_2O_3) = 0.053 kg, m_w (massa air yang digunakan) = 20 kg, ρ_p (kerapatan nano partikel) = 66.7 kg/m^3 dan ρ_w (kerapatan air) = 827.427 kg/m^3 . Semua properties tersebut dilihat pada *film temperature*. Dengan mensubstitusikan nilai-nilai ini pada persamaan (5.5), maka didapatkan kerapatan campuran nanofluida adalah 803.08 kg/m^3 .

- Kekentalan (*viscosity*) nanofluida 4% dapat dimodelkan menurut *Einsterein Equation* [18]:

$$\mu = \mu_L(1 + 2.5\varepsilon_p) \quad (\text{V. 11})$$

Dengan μ_L kekentalan air = 0.000185 Pa.s [29], dan ε_p adalah fraksi volume partikel, 4%. Sehingga, nilai kekentalan nanofluida 4% yang didapat pada film temperatur tersebut adalah 0.0002035 Pa.s .

- *Prandtl number* diasumsikan melebihi 1.6 (*Prandtl fluida dasar* pada kondisi yang sama). Hal ini didasarkan pada kenyataan bahwa bilangan tak berdimensi ini didefinisikan sebagai :

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (\text{V. 12})$$

Dengan C_p adalah panas spesifik nanofluida (kJ/kg.K), μ kekentalan nanofluida (Pa.s), dan k adalah konduktivitas termal nanofluida (W/m.K). Dengan mengasumsikan C_p nanofluida adalah 30% lebih baik dibanding dengan air pada *film temperature*, maka C_p nanofluida = C_p air + 30% . C_p air = 4.29 + (0.3 x 4.29) = 5.57 kJ/kg.K (5570 J/kg.K). Kemudian, kekentalan nanofluida adalah 0.0002035 (dari pendekatan poin sebelumnya), dan konduktivitas termal nanofluida diasumsikan 20% lebih tinggi dibanding air pada *film temperature* yang sama, $k_{nf} = k_{air} + 20\% \times k_{air} = 0.688 + 0.688 \times 0.2 = 0.825$ W/m.K. Sehingga nilai *Prandtl number* nanofluida 4% adalah $(5570 \times 0.0002035)/0.825 = 1.37$. Sehingga, dengan mensubstitusikan nilai-nilai yang sudah didapat ke persamaan (5.4), *Reynold number* nanofluida 4% adalah:

$$Re = \frac{803.08 \times 1.2 \times 0.038}{0.0002035} = 1.79 \times 10^5$$

Dan, *Nusselt number* untuk nanofluida 4% dapat dihitung dengan menggunakan persamaan V.3, meskipun persamaan tersebut berlaku untuk $100 < Re < 105$. Hal ini dikarenakan peneliti belum menemukan persamaan lain yang dapat memodelkan bilangan Nusselt yang lebih baik dibanding persamaan V.3 untuk jenis aliran *circular tube flow*

$$Nu_D = 0.3 + \frac{0.62(1.79 \times 10^5)^{1/2}(1.37)^{1/3}}{[1 + (0.4/1.37)^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{1.79 \times 10^5}{282,000} \right)^{5/8} \right]^{4/5}$$

$$= 418.759$$

Dari sini, didapatkan nilai koefisien perpindahan kalor konveksi adalah:

$$h = \frac{Nu \ k}{D} = \frac{418.759 \times 0.825}{0.038} = 9098.101 \text{ W/m}^2\text{K}$$

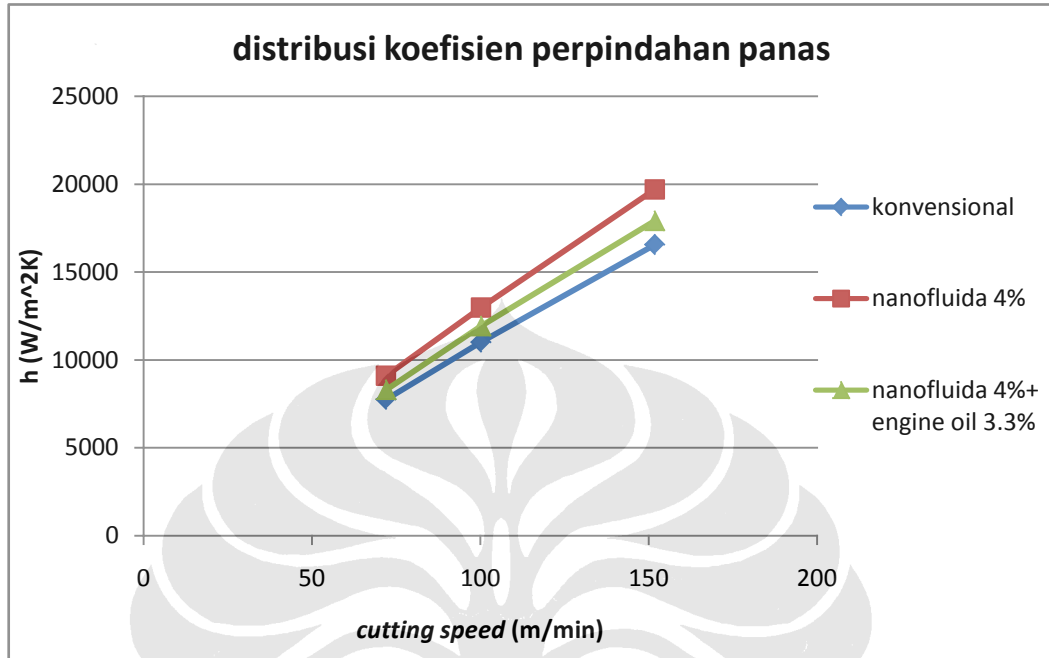
Tabel V.7 Distribusi nilai koefisien perpindahan panas pada jenis fluida pendingin yang berbeda

Cooling Fluid	rpm	Vc	Ts (K)	Tf (K)	ρ (kg/m ³)	μ (Pa.s)	Pr	Re	Nu	h
Konvensional (air + <i>lubricant</i> 3.3%)	600	72	620.384	461.767	814.9864978	0.0002422	1.70143801	153440.8931	405.46035	7755.38949
	1100	100. 2	641.4494	472.2997	810.2706539	0.0002124	1.51908046	184752.3906	443.2096402	11009.3275
	2200	151. 8	679.9946	491.5723	801.9401052	0.0001871	1.40468702	238567.5374	518.0567509	16556.1518
Nanofluida 4%	600	72	530.384	416.767	803.0842	0.0002035	1.37466025	179954.0025	418.7595176	9098.10152
	1100	100. 2	555.4494	429.2997	798.0420325	0.0001782	1.22030146	216886.5075	457.8432561	12977.4882
	2200	151. 8	585.9946	444.5723	791.8501495	0.0001573	1.09763015	280193.1298	531.1389184	19700.4253
Nanofluida 4% + <i>eng. Oil</i> 3.3%	600	72	577.384	440.267	809.8579924	0.0002239	1.55918632	164937.5813	412.8495492	8298.71052
	1100	100. 2	603.4494	453.2997	804.5981129	0.0001905	1.35371949	204549.536	456.5200359	11918.6362
	2200	151. 8	647.9946	475.5723	798.250364	0.0001711	1.26309569	259676.3019	529.6815514	17905.1626

Rpm: putaran spindle, Vc: cutting speed (m/min) Ts : surface temperature, Tf : film temperature, ρ : kerapatan, μ : kekentalan (viscosity)



Dari tabel V.7 di atas, distribusi koefisien perpindahan kalor untuk ketiga jenis fluida pendingin yang berbeda tersebut dapat digambarkan secara grafik sebagai berikut:



Gambar V.39 Distribusi koefisien perpindahan panas

Gambar V.39 di atas dengan jelas menunjukkan bahwa nanofluida dengan konsentrasi volume 4% mempunyai koefisien perpindahan panas yang lebih tinggi dibanding dengan dua jenis fluida pendingin yang lainnya. Grafik ini menguatkan temuan sebelumnya yang menunjukkan bahwa nanofluida 4% konsentrasi volume adalah fluida pendingin yang paling baik diantara kelima jenis fluida pendingin yang digunakan pada penelitian ini, tentu saja dari sudut pandang pengaruhnya terhadap temperatur pemotongan (*cutting temperature*).

V.4 *Analysis of Varian* Pengaruh Fluida Pendingin Pada Kekasaran Permukaan.

Design of experiment dari penelitian ini digunakan untuk melihat signifikansi pengaruh *independent variable* penelitian terhadap kekasaran permukaan sebagai *dependent variable*. *Independent variable* yang kita gunakan, atau umum disebut faktor, berjumlah tiga, yaitu:

(1) Jenis fluida pendinginan dengan 5 level yaitu :

- Nanofluida 1% (jenis 1)
- Nanofluida 4% (jenis 2)
- Konvensional (jenis 3)
- Nanofluida 1%+*lubricant* 3.3% (jenis 4)
- Nanofluida 4%+*lubricant* 3.3% (jenis 5)

(2) Putaran spindle dengan 3 level (600, 1100, dan 2200 rpm)

(3) Waktu pemesinan dengan 4 level (10, 20, 30, dan 40 menit)

Untuk melihat signifikansi pengaruh ketiga faktor yang digunakan terhadap *response (dependent variable)* berupa kekasaran permukaan dapat digunakan *design of experiment* dengan dasar *Analysis of Varian* dengan perbedaan level masing-masing faktor seperti yang telah disebutkan diatas. Perbedaan level dari tiap faktor yang ada menyebabkan banyaknya n percobaan ialah :

$$5^1 \times 4^1 \times 3^1 = 60 \text{ buah percobaan}$$

Sebagai salah satu contoh dari sebuah pengujian hipotesis, maka kita perlu untuk mendefinisikan hipotesa awal (H_0) dan (H_1).

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \text{ dan,}$$

$$H_1 = \text{penolakan terhadap } H_0$$

Dimana (H_0) yang ditetapkan ialah bahwa faktor berpengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan, sedangkan hipotesis alternatif (H_1) yang

ditetapkan ialah penolakan terhadap H_0 , dimana H_0 ditolak jika $P < \alpha$ dan H_0 diterima (yang berarti menerima H_1) jika $P > \alpha$ atau apabila nilai F melebihi nilai $F_{\alpha, df-num, df-den}$ [15] dimana:

- Analisa ini menggunakan tingkat kepercayaan 95 %, yang berarti nilai *level of significance* dari pengujian hipotesis $\alpha = 0.05$.
- $df-num$ adalah derajat kebebasan yang digunakan sebagai pembilang.

Selanjutnya untuk menganalisa dan mengolah data hasil pengujian akan digunakan software statistik Minitab 15. Sehingga akan dihasilkan plot interaksi antara ketiga faktor dengan dependent *variable* berupa kekasaran permukaan. Hasil dari pengolahan data yang dihasilkan ialah sebagai berikut :

General Linear Model: Roughness versus Cooling, RPM, TIME

Factor	Type	Levels	Values
Cooling	fixed	5	1, 2, 3, 4, 5
RPM	fixed	3	600, 1100, 2200
TIME	fixed	4	10, 20, 30, 40

Analysis of Variance for Roughness, using Adjusted SS for Tests

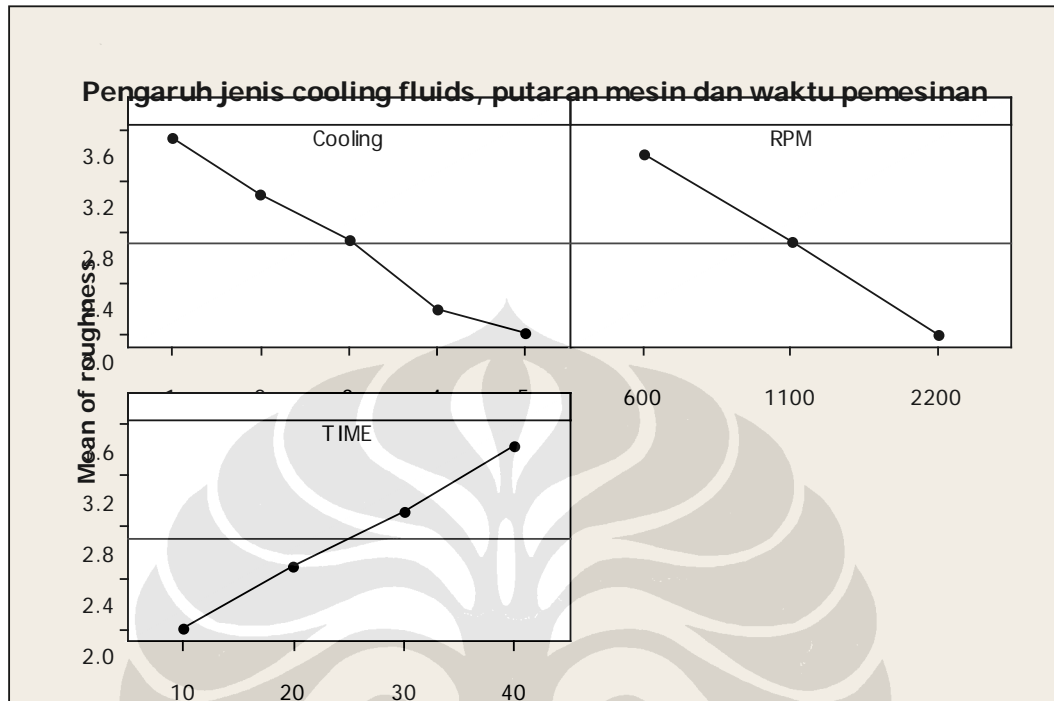
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Cooling	4	188.862	188.862	47.216	1131.04	0.000
RPM	2	200.323	200.323	100.161	2399.35	0.000
TIME	3	169.758	169.758	56.586	1355.51	0.000
Cooling*RPM	8	41.349	41.349	5.169	123.81	0.000
Cooling*TIME	12	23.655	23.655	1.971	47.22	0.000
RPM*TIME	6	38.901	38.901	6.484	155.31	0.000
Cooling*RPM*TIME	24	27.093	27.093	1.129	27.04	0.000
Error	540	22.542	22.542	0.042		
Total	599	712.484				

S = 0.204316 R-Sq = 96.84% R-Sq(adj) = 96.49%

Gambar V.40 General linear model Roughness Vs Cooling,RPM,Time

Dari hasil analisis data menggunakan penekatan *General Linear Model* (GLM), atau *Design of Experiment* (DOE) dapat dilihat bahwa baik jenis pendingin (*cooling*), putaran spindle (*rpm*), dan waktu (*time*) mempunyai peran signifikan terhadap kekasaran permukaan (*roughness*). Hal ini dibuktikan dengan nilai $P \ll \alpha$. Yang berarti hipotesis yang diterima merupakan hipotesis awal (H_0).

Selanjutnya, untuk melihat pengaruh dari faktor-faktor yang digunakan terhadap kekasaran permukaan, dapat dilihat pada gambar di bawah ini :

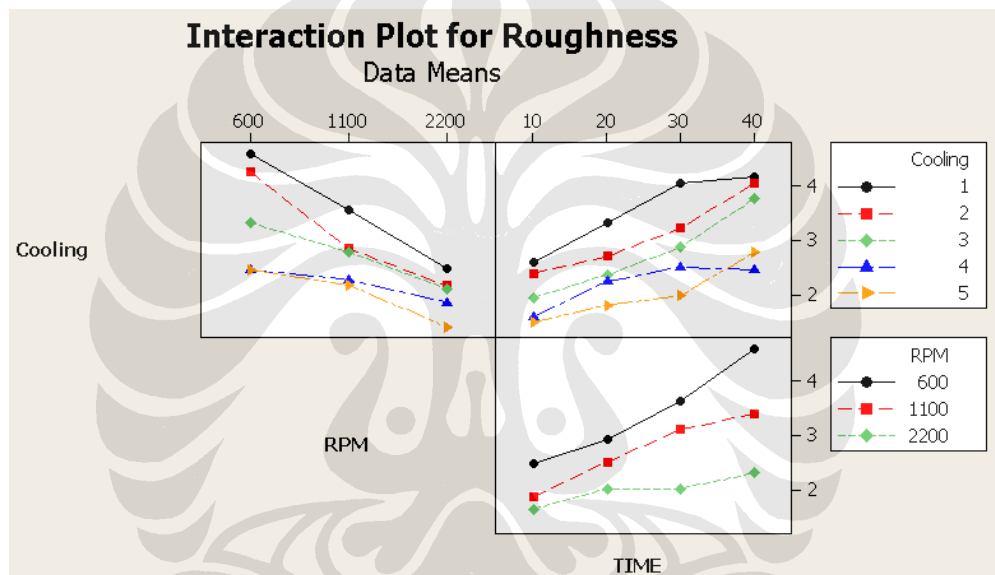


Gambar V.41 Main effect plot pengaruh faktor-faktor terhadap kekasaran permukaan
Dimana :

- Nanofluida 1% (jenis 1)
- Nanofluida 4% (jenis 2)
- Konvensional (jenis 3)
- Nanofluida 1%+*lubricant* 3.3% (jenis 4)
- Nanofluida 4%+*lubricant* 3.3% (jenis 5)

Gambar di atas menunjukkan pengaruh masing-masing faktor terhadap kekasaran permukaan hasil pemesinan. Untuk jenis pendinginan terdapat hubungan linear negatif terhadap nilai kekasaran permukaan dimana terlihat jelas bahwa pendingin jenis kelima yaitu nanofluida 4%+*lubricant* 3.3%, menunjukkan pengaruh paling baik terhadap nilai kekasaran permukaan. Sedangkan pendingin jenis pertama yaitu nanofluida 1%, adalah jenis paling buruk dalam hal pengaruh pada kekasaran permukaan. Penjelasan fenomena ini dapat dilihat dari analisa pertumbuhan karat pada bagian sebelumnya.

Hasil analisa ini memperkuat hasil pengolahan data yang ada pada pembahasan sebelumnya mengenai peringkat jenis pendingin yang paling baik terhadap kekasaran permukaan. Efek faktor kecepatan putaran *spindle* menunjukkan hubungan yang linear negatif terhadap kekasaran permukaan hasil pemesinan. Dengan kata lain, makin besar putaran *spindle*, maka kekasaran permukaan yang terbentuk semakin kecil. Hubungan yang linear namun positif terlihat pada efek waktu pemesinan terhadap kekasaran permukaan hasil pemesinan. Untuk melihat interaksi antara faktor-faktor terhadap *response* yang ditentukan kita dapat melihatnya pada gambar dibawah ini :

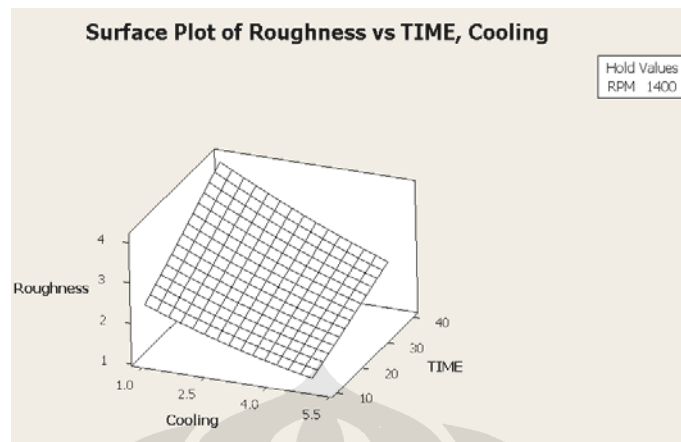


Gambar V.42 Interaksi antar faktor terhadap response yang ditentukan

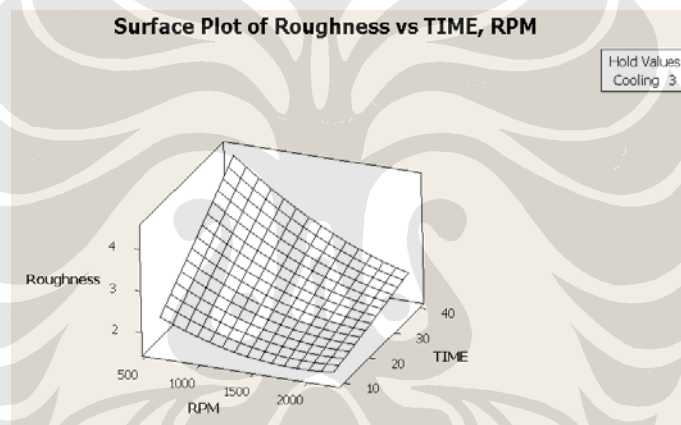
Gambar di atas menunjukkan interaksi antar faktor (*independent variable*) terhadap kekasaran permukaan hasil pemesinan (*response*). Dari grafik di atas, dapat dilihat dengan jelas bahwa untuk menghasilkan kekasaran permukaan yang paling rendah, maka kombinasi antara faktor yang dapat digunakan adalah :

1. Pendingin jenis kelima yaitu nanofluida 4%+*lubricant* 3.3% dan putaran spindle paling tinggi yaitu 2200 rpm.
2. Pendingin jenis kelima yaitu nanofluida 4%+*lubricant* 3.3% dan waktu pemesinan paling rendah 10 menit.
3. Putaran *spindle* paling tinggi yaitu 2200 rpm dan waktu pemesinan paling rendah 10 menit.

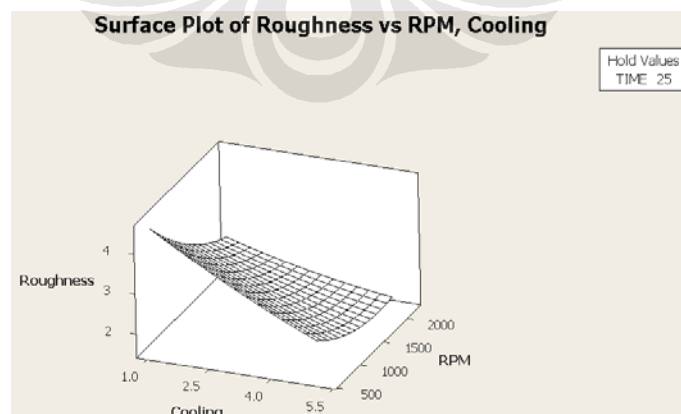
Untuk gambaran 3 dimensi dari interaksi antara 2 buah faktor dan *response* dapat dibuat plot seperti gambar dibawah ini :



Gambar V.43 Interaksi antar faktor cooling fluids dan waktu pemesinan terhadap *response* yang ditentukan



Gambar V.44 Interaksi antar faktor putaran mesin dan waktu pemesinan terhadap *response* yang ditentukan



Gambar V.45 Interaksi antar faktor jenis cooling fluids dan putaran mesin terhadap *response* yang ditentukan

Dari beberapa grafik dan hasil pengolahan data secara statistik dapat diambil kesimpulan bahwa kombinasi faktor yang menghasilkan temperatur pemotongan yang paling baik adalah: nanofluida 4% +*lubricant* 3.3% dan waktu pemesinan 10 menit serta putaran *spindle* 2200 rpm.

V.5 Analisa Efisiensi penggunaan Nanofluida

Efisiensi fluida pendingin dalam proses pemesinan paling banyak dinyatakan dengan kapasitas termal dan konduktivitas termal fluida tersebut [6]. Namun, pada analisis ini penulis akan menambahkan analisis *durability* (ketahanan) dan analisis ekonomi penggunaan nanofluida pada proses pemesinan turning.

Pertama, kapasitas panas dan konduktivitas termal nanofluida. Seperti yang telah digambarkan pada bagian sebelumnya, bahwa penggunaan nanofluida pada proses pemesinan meningkatkan konduktivitas termal sampai dengan 35%. Selain itu, nilai koefisien perpindahan panas (*h*) konveksi nanofluida juga lebih baik dibanding dengan pendingin konvensional 17- 19 %. Artinya, dilihat dari segi ini, nanofluida jauh lebih menguntungkan dibanding penggunaan fluida konvensional yang banyak digunakan saat ini.

Kedua, *durability* (ketahanan) nanofluida sebagai fluida pendingin. Faktor kedua ini dapat dilihat dari perubahan konsentrasi volume nanopartikel yang terlarut dalam fluida dasar, konduktivitas termal nanofluida, serta kekentalan (*viscosity*) nanofluida setelah digunakan dalam proses pemesinan dalam jangka waktu lama. Merupakan hal yang (sangat) penting untuk mengetahui ketahanan nanofluida, dinyatakan sebagai waktu ketahanan (menit), pada proses pemesinan. Hal ini untuk memastikan bahwa nanofluida yang digunakan tetap pada *performance* terbaiknya dilihat dari ketiga faktor yang mempengaruhi *durability* nanofluida itu sendiri.

Pada penelitian ini, waktu pemesinan terlama yang dicoba adalah 40 menit. Dan sampai dengan jangka waktu tersebut, konduktivitas termal nanofluida tetap pada *performance* terbaiknya. Namun untuk konsentrasi nano partikel yang larut pada fluida dasar dan kekentalan nanofluida, penulis sedikit mengalami kesulitan untuk menguantifikasinya; terutama untuk menentukan konsentrasi nano

partikel yang masih tersisa selama t waktu pemesinan dilakukan. Untuk konsentrasi nano partikel yang tersisa, ada dua kemungkinan yang terjadi; konsentrasi bertambah tinggi atau bertambah rendah. Kemungkinan pertama mungkin terjadi mengingat bahwa ada sebagian fluida yang terbuang saat proses pemesinan (volume fluida dasar berkurang). Sedangkan kemungkinan kedua dapat terjadi jika ada partikel nano yang menempel pada permukaan benda kerja dan bagian mesin lainnya (konsentrasi nano partikel berkurang). Kesulitan yang dihadapi ini menuntut pencarian model baru untuk mengidentifikasi *durability* penggunaan nanofluida pada proses pemesinan.

Ketiga, analisis ekonomi. Parameter yang paling mudah untuk dilihat dari segi ini adalah harga yang dibutuhkan untuk memproduksi jenis pendingin dengan volume tertentu. Untuk membuat nanofluida dengan volume 400 L, dibutuhkan paling tidak 1 kg nano partikel dengan harga US\$210 (Rp 1.932.000) ditambah dengan harga air suling ($400 \times \text{Rp } 2000/\text{L} = 800.000$). Sehingga total harga yang dibutuhkan untuk pembuatan nanofluida 400 L adalah Rp. 2.732.000,-. Sedangkan untuk jenis pendingin lainnya, sistem *cryogenic cooling*, yang menggunakan nitrogen cair dibutuhkan harga US\$ 800 atau setara dengan Rp 7.360.000,- untuk volume yang sama, 40L. Dan untuk pendingin konvensional, dibutuhkan 13.2 L *lubricant* untuk menghasilkan fluida pendingin 400 L. Dengan harga perliter *lubricant* mencapai Rp 80.000,- maka total dibutuhkan Rp. 1.056.000,-. Sehingga dari sisi ekonomi untuk pembuatan fluida pendingin umumnya fluida pendingin konvensional lebih menguntungkan dibanding nanofluida. Namun, selain dari sisi harga pembuatan nanofluida kita juga dapat melihat efek penggunaan nanofluida bila diterapkan langsung pada produksi beberapa part yang ada di dunia industri, sehingga dapat dilihat tingkat signifikansi penggunaan nanofluida pada kualitas hasil pemesinan, dalam hal ini pengaruhnya terhadap kekasaran permukaan produk terhadap total investasi yang dibutuhkan untuk mengaplikasikan nanofluida pada proses pemesinan. Dari penelitian ini, didapatkan bahwa nanofluida dengan konsentrasi volume 4% yang ditambah dengan *lubricant* 3.3% mampu menurunkan kekasaran permukaan produk hasil pemesinan, dengan nilai rata-rata kekasaran permukaan yang didapat untuk pemesinan *turning* baja AISI-4140 adalah 2 μm . Signifikansi penggunaan nanofluida pada proses pemesinan ini

dapat kita lihat jika kita membandingkan hasil yang didapat dengan proses umum yang ada di industri—dalam hal ini peneliti mengambil contoh ruang bakar mesin kapal laut (*ship combustion chamber*). Pada pembuatan ruang bakar pada mesin kapal laut digunakan proses boring yaitu proses yang termasuk pada internal turning, sesuai dengan literatur yang diperoleh penulis, proses pembuatan *combustion chamber* pada mesin kapal laut dilakukan dengan menggunakan pendingin konvensional dan mempunyai kekasaran permukaan rata-rata (*mean roughness*) $2.02 \mu\text{m}$ [31]. Sementara kekasaran permukaan yang dihasilkan pada penelitian ini adalah sebesar $2 \mu\text{m}$. Sehingga jika kita mengasumsikan bahwa proses pemesinan *turning* sebanding dengan *boring*, maka penggunaan nanofluida jelas lebih efisien dibanding pendingin konvensional. Kemudian, jika melihat fakta bahwa nanofluida dapat menurunkan *cutting temperatur* dan kekasaran permukaan hasil pemesinan, dan bila kita ambil kesetaraan kemampuan nanofluida pada proses *turning* dan *boring*, maka dapat dipastikan penggunaan nanofluida pada proses *boring combustion chamber* akan memberikan dampak yang signifikan pada kekasaran permukaan yang dihasilkan, sehingga dapat meningkatkan kualitas produk yang dihasilkan dan memberikan efisiensi di bidang ekonomi yaitu dengan mengurangi cost dari pembelian mata pahat.

Dengan berbagai keuntungan dan kerugian yang didapat dari masing-masing penggunaan nanofluida, *trade off* terhadap jenis pendingin yang akan digunakan menjadi sesuatu yang perlu dicermati secara mendalam. Meskipun harga yang diperlukan untuk nanofluida lebih mahal dibanding pendingin konvensional, namun kualitas permukaan yang didapatkan dan umur alat (*tool life*) yang lebih panjang dapat menjadi pertimbangan tersendiri.