

BAB V

ANALISA HASIL PERCOBAAN

Pada bagian ini penulis akan memberikan analisis penggunaan nanofluida pada proses pemesinan dalam hal pengaruhnya terhadap temperatur pemotongan (*cutting temperature*), dan memberi gambaran pengaruh temperatur pemotongan ini terhadap kualitas permukaan hasil pemesinan.

V.1 Pengaruh Penggunaan Nanofluida terhadap Temperatur Pemotongan

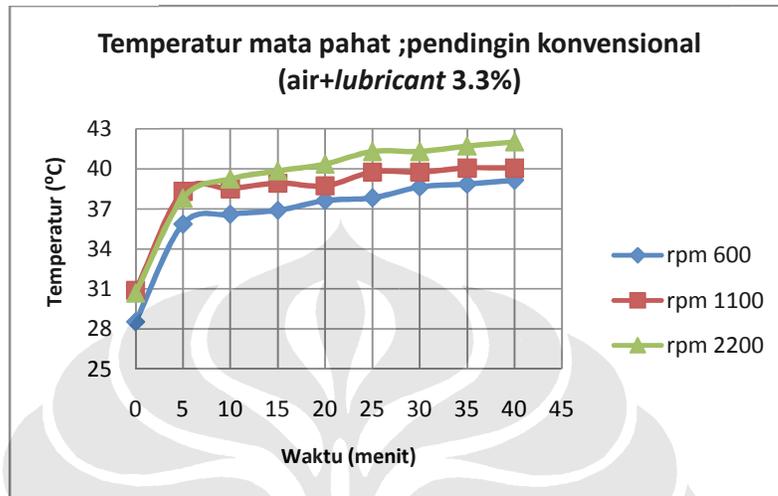
Nanofluida, media pendingin baru (*novel cooling fluid*), yang terbukti memiliki konduktivitas termal yang (jauh) lebih baik dibanding air atau pendingin konvensional menunjukkan penurunan temperatur pemotongan yang cukup signifikan. Berikut akan diberikan deskripsi kecenderungan temperatur pemotongan yang terjadi selama proses pemesinan, analisisnya fenomena yang melatarbelakanginya, *analysis of varian* data yang didapat, dan penarikan kesimpulan jenis fluida pendingin yang paling baik untuk proses *turning*.

V.1.1 Deskripsi Data Penelitian; Pengaruh Nanofluida Terhadap Temperatur Pemotongan

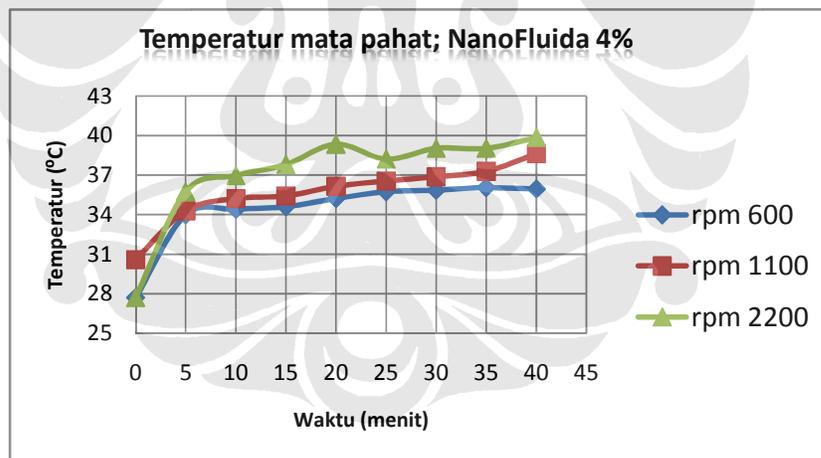
Untuk mencapai tujuan akhir penelitian, melihat pengaruh penggunaan nanofluida terhadap kualitas permukaan hasil pemesinan, maka lebih baik kalau kita melakukan investigasi pengaruh penggunaan nanofluida terhadap temperatur pemotongan (*cutting temperature*) yang terjadi. Seperti yang telah dijelaskan 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*,

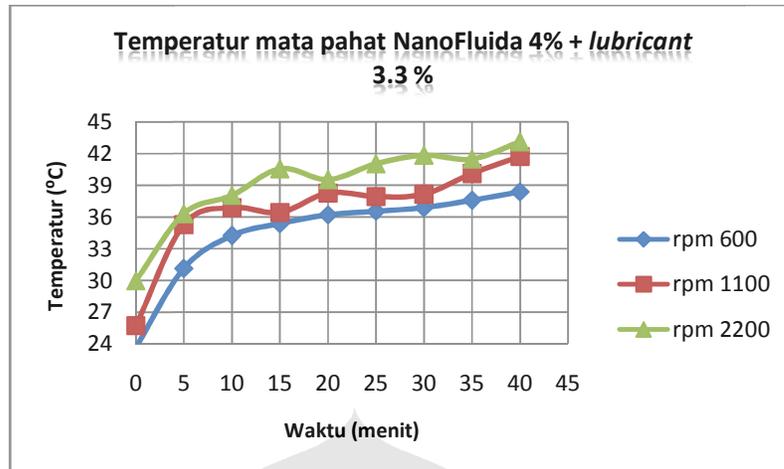
waktu pemesinan (t), dan kedalaman pemotongan (*depth of cut*) yang dijaga konstan pada 1.5 mm untuk masing-masing jenis sistem pendingin yang digunakan dalam percobaan ini.



Gambar 5.1 Temperatur mata pahat-pendingin konvensional (air+lubricant 3.3%)

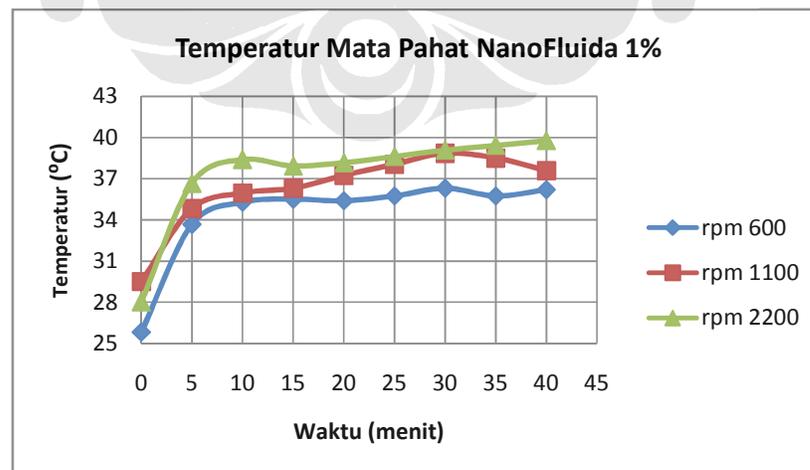


Gambar 5.2 Profil temperatur mata pahat; Nanofluida konsentrasi 4%

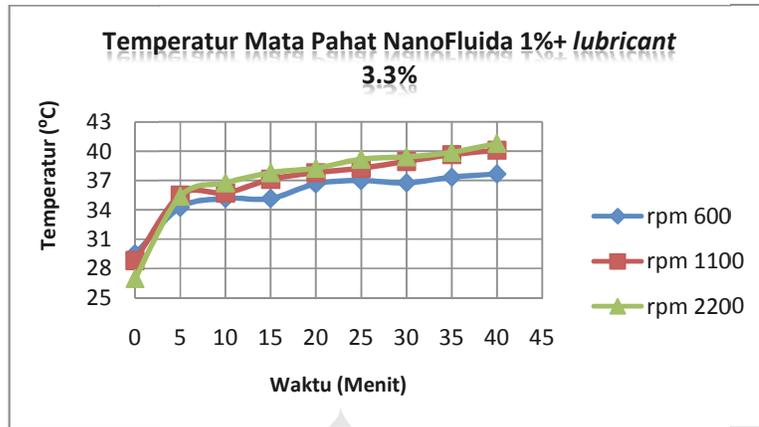


Gambar 5.3 Profil temperatur mata pahat; Nanofluida konsentrasi 4% + lubricant 3.3%.

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.

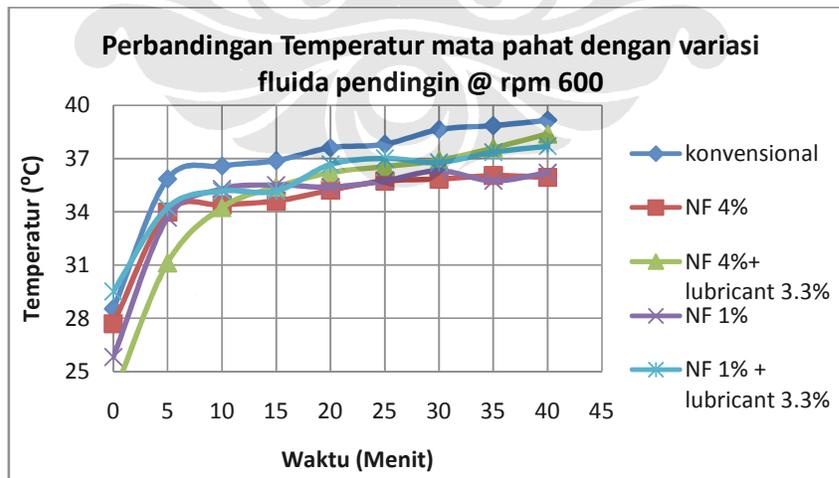


Gambar 5.4 Pergerakan temperatur mata pahat; Nanofluida konsentrasi 1%

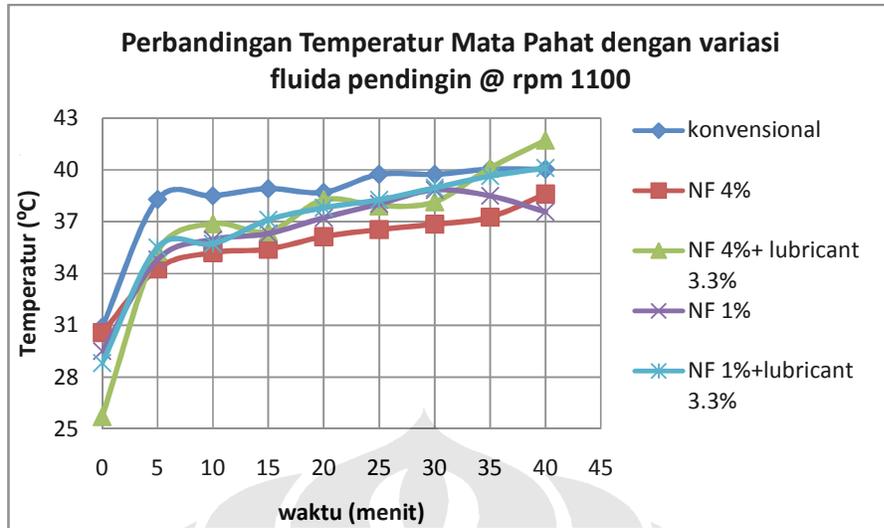


Gambar 5.5 Profil temperatur mata pahat; NanoFluida konsentrasi 1% + lubricant 3.3%.

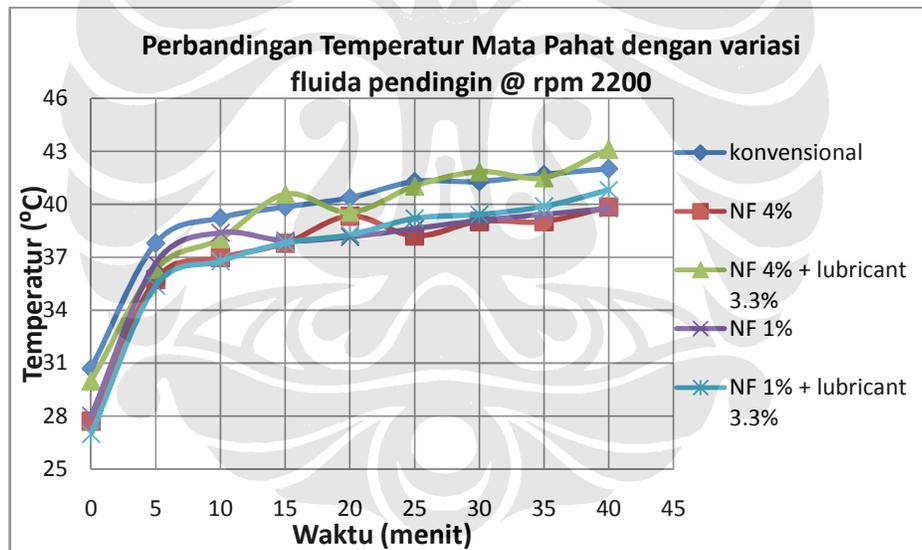
Pola yang sama juga, kecenderungan meningkatnya temperatur seiring bertambahnya kecepatan putar (rpm) *spindle* motor mesin, masih terlihat pada sistem pendingin dengan nanofluida 1% dan nanofluida 1% yang ditambahkan dengan *lubricant* dengan konsentrasi 3.3%. Selanjutnya, untuk melihat perbedaan kemampuan 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 5.6 Perbandingan temperatur mata pahat yang terbentuk pada variasi sistem pendingin pada putaran spindle (rpm) 600.



Gambar 5.7 Profil temperatur mata pahat yang terbentuk pada variasi sistem pendingin pada putaran spindle (rpm) 1100



Gambar 5.8 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 (5.5-5.8), 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%.

$$\frac{k_{eff} - k_f}{k_f} = 0.764481\phi + 0.018688867t - 0.4214717 \quad (5.1)$$

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

5.1.2 Perhitungan *Local Nusselt Number*

Selanjutnya, kenaikan konduktivitas termal fluida pendingin (jenis nanofluida) belum cukup membuktikan kemampuan menghantarkan kalor nanofluida [Das et. al, 2008]. 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 ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$), 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 [Incropera, 2003]:

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (5.2)$$

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 [Incropera, 2003] yang merujuk pada [Churcill dan Bernstein, 1977]:

$$Nu_D = 0.3 + \frac{0.62Re^{1/2}Pr^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282,000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (5.3)$$

Dengan Re adalah *Reynold number* dan Pr adalah *Prandtl number*. *Reynold number* didefinisikan sebagai [Incropera, 2003]:

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (5.4)$$

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 [Hagg, 2005]:

$$\rho_{nf} = \frac{m_{nf}}{\frac{m_p}{\rho_p} + \frac{m_w}{\rho_w}} \quad (5.5)$$

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/m³.

- Kekentalan (*viscosity*) nanofluida 4% dapat dimodelkan menurut *Einstein Equation* [Das et. al, 2008]:

$$\mu = \mu_L(1 + 2.5\varepsilon_p) \quad (5.6)$$

Dengan μ_L kekentalan air = 0.000185 Pa.s [Incropera, 2003], 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 :

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (5.7)$$

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 x 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 5.3, 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 5.3 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:

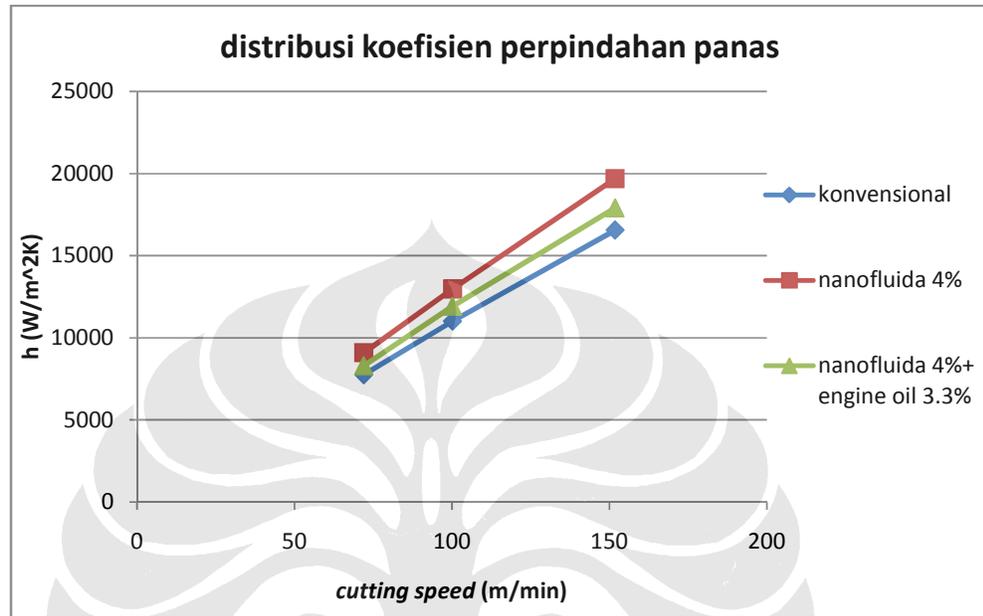
$$h = \frac{Nu \ k}{D} = \frac{418.759 \times 0.825}{0.038} = 9098.101 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Tabel 5.1 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 + lubricant 3.3%)	600	72	620.3 84	461.7 67	814.9864 978	0.0002 422	1.70143 801	153440.8 931	405.4603 5	7755.38 949
	110	10	641.4	472.2	810.2706	0.0002	1.51908	184752.3	443.2096	11009.3
	0	0.2	494	997	539	124	046	906	402	275
	220	15	679.9	491.5	801.9401	0.0001	1.40468	238567.5	518.0567	16556.1
	0	1.8	946	723	052	871	702	374	509	518
Nanofluida 4%	600	72	530.3 84	416.7 67	803.0842 803.0842	0.0002 035	1.37466 025	179954.0 025	418.7595 176	9098.10 152
	110	10	555.4	429.2	798.0420	0.0001	1.22030	216886.5	457.8432	12977.4
	0	0.2	494	997	325	782	146	075	561	882
	220	15	585.9	444.5	791.8501	0.0001	1.09763	280193.1	531.1389	19700.4
	0	1.8	946	723	495	573	015	298	184	253
Nanofluida 4% + eng. Oil 3.3%	600	72	577.3 84	440.2 67	809.8579 924	0.0002 239	1.55918 632	164937.5 813	412.8495 492	8298.71 052
	110	10	603.4	453.2	804.5981	0.0001	1.35371	204549.5	456.5200	11918.6
	0	0.2	494	997	129	905	949	36	359	362
	220	15	647.9	475.5	798.2503	0.0001	1.26309	259676.3	529.6815	17905.1
	0	1.8	946	723	64	711	569	019	514	626

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

Dari tabel 5.1 di atas, distribusi koefisien perpindahan kalor untuk ketiga jenis fluida pendingin yang berbeda tersebut dapat digambarkan secara grafik sebagai berikut:



Gambar 5.9 Distribusi koefisien perpindahan panas

Gambar 5.9 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 kalau 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*).

5.1.3 Analysis of Varian (Design of Experiment) Hasil Penelitian

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

- (1) jenis fluida pendinginan dengan 5 level; konvensional (tipe 5), nanofluida 4% (tipe 1), nanofluida 4% + *lubricant* 3.3% (tipe 4), nanofluida 1% (tipe 2), dan nanofluida 1% + *lubricant* 3.3% (tipe 3),
- (2) putaran *spindle* dengan 3 level (600, 1100, dan 2200 rpm), serta
- (3) waktu pemesinan dengan 4 level (10, 20, 30, dan 40 menit).

Selanjutnya, untuk melihat signifikansi pengaruh ketiga faktor ini terhadap *response (dependent variable)* digunakan *design of experiment* dengan dasar *Analysis of Variance* dengan perbedaan level masing-masing faktor, atau disebut *design of experiment*, menggunakan **software Minitab 14** dengan hipotesis:

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

$H_1 =$ penolakan terhadap H_0

Hipotesis awal akan ditolak apabila nilai F melebihi nilai $F_{\alpha, df\text{-num}, df\text{-den}}$ dimana:

- α adalah tingkat kepercayaan, diambil 5%
- $df\text{-num}$ adalah derajat kebebasan yang digunakan sebagai pembilang.

Atau, pada software ini berlaku hubungan H_0 ditolak, berarti menerima H_1 , jika nilai P (*P-value*) pada *General Linear Modelnya* (GLM) lebih kecil dari nilai tingkat kepercayaan ($P < \alpha$), dan berlaku hubungan yang sebaliknya; H_0 diterima jika $P > \alpha$.

Hasil dari masukan data yang dilakukan tampak pada tabel *General Linear Modelnya* sebagai berikut:

Tabel 5.2 General linear model

General Linear Model: Temperatur 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 Temperatur, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
cooling	4	83.8338	83.8338	20.9584	281289.85	0.000
rpm	2	184.6687	184.6687	92.3344	1239248.84	0.000
time	3	127.7786	127.7786	42.5929	571652.25	0.000
cooling*rpm	8	8.1816	8.1816	1.0227	13725.91	0.000
cooling*time	12	15.4777	15.4777	1.2898	17310.91	0.000
rpm*time	6	2.3914	2.3914	0.3986	5349.22	0.000
cooling*rpm*time	24	18.6710	18.6710	0.7780	10441.22	0.000
Error	60	0.0045	0.0045	0.0001		
Total	119	441.0071				

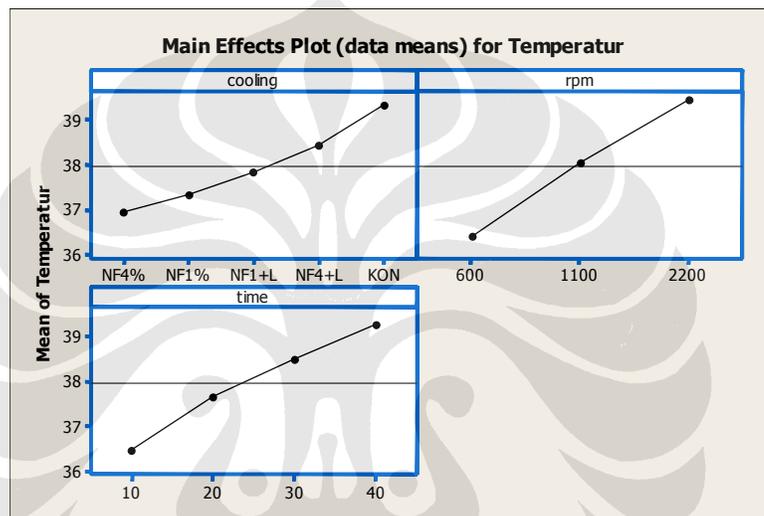
S = 0.00863182 R-Sq = 100.00% R-Sq(adj) = 100.00%

Dari hasil analisis data menggunakan penekatan *General Linear Model* (GLM), atau *Design of Experiment* (DOE) dapat dilihat bahwa nilai P untuk ketiga jenis faktor dan kombinasinya nilainya (jauh) lebih kecil dibanding nilai α ($P \ll \alpha$). Hal ini menunjukkan penolakan terhadap H_0 yang dinyatakan pada bagian sebelumnya. Atau dengan kata lain, faktor jenis pendingin (*cooling*), putaran *spindle* (rpm), dan waktu (*time*) mempunyai peran signifikan terhadap temperatur pemotongan (*cutting temperature*). Selanjutnya, pada gambar 5.10 terlihat interaksi antar ketiga faktor dengan masing-masing levelnya terhadap temperatur pemotongan. Dari gambar ini dapat disimpulkan bahwa:

- Untuk pengaruh jenis pendinginan terhadap temperatur pemotongan, Nanofluida konsentrasi volume 4% (NF 4%) adalah jenis yang paling baik, sedangkan pendingin konvensional (Kon) merupakan yang paling jelek, jika dibanding dengan kelima sistem pendingin yang diuji. Hasil analisa ini memperkuat deskriptif data yang ada pada pembahasan sebelumnya mengenai pemeringkatan jenis pendingin yang paling baik terhadap temperatur pemotongan. Hal ini tentu saja, seperti yang telah

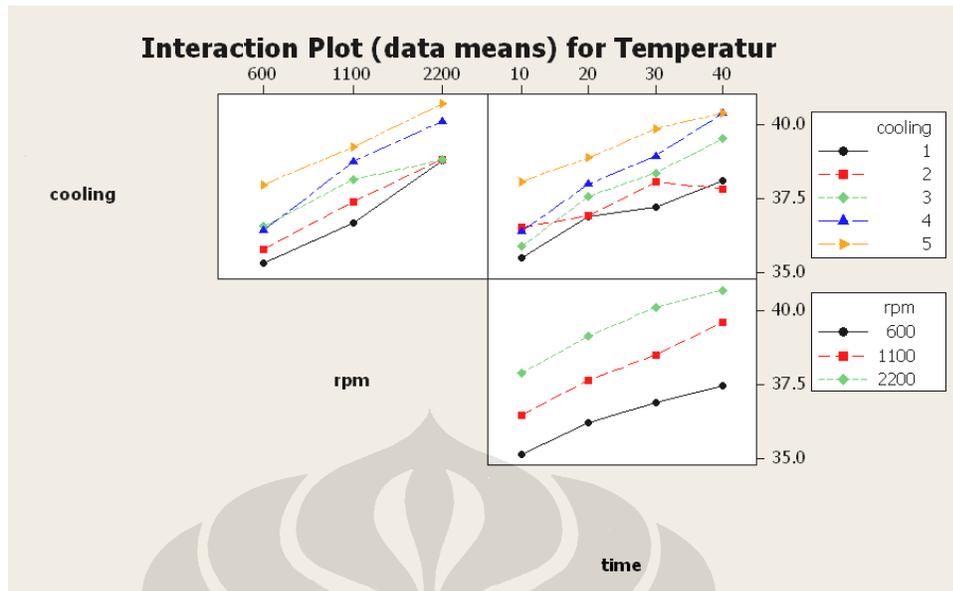
dijelaskan sebelumnya, bahwa nanofluida 4% mempunyai konduktivitas termal (k) dan koefisien perpindahan kalor (h) konveksi yang lebih tinggi dibanding dengan jenis pendingin yang lainnya.

- Untuk pengaruh putaran (rpm) *spindle*, dan lama waktu pemesinan (*time*) terhadap temperatur pemotongan maka yang paling baik adalah putaran 600 rpm dan waktu pemesinan 10 menit. Analisis lebih dalam fenomena ini telah dilakukan [Riansyah, 2008].



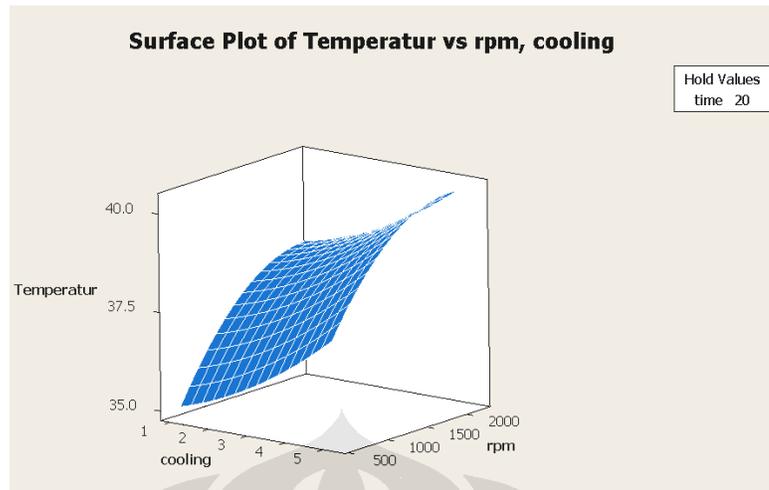
Gambar 5.10 Interaksi antara faktor pemesinan dengan temperatur

Disisi lain, kita dapat melihat langsung interaksi dua faktor terhadap temperatur pemotongan pada gambar 5.11 di bawah. Dari grafik di bawah, dapat dilihat dengan jelas bahwa untuk menghasilkan temperatur pemotongan yang paling rendah, maka kombinasi antara faktor yang dapat digunakan adalah : (1) pendingin jenis pertama (nanofluida 4%) dan putaran *spindle* paling rendah, 600, (2) pendingin jenis pertama dan waktu pemesinan paling rendah, 10 menit, dan (3) putaran *spindle* paling rendah (600) dan waktu pemesinan paling rendah, 10 menit. Jadi dapat ditarik kesimpulan awal bahwa kombinasi faktor yang menghasilkan temperatur pemotongan yang paling baik adalah: nanofluida 4% + waktu pemesinan 10 menit + putaran *spindle* 600 rpm.

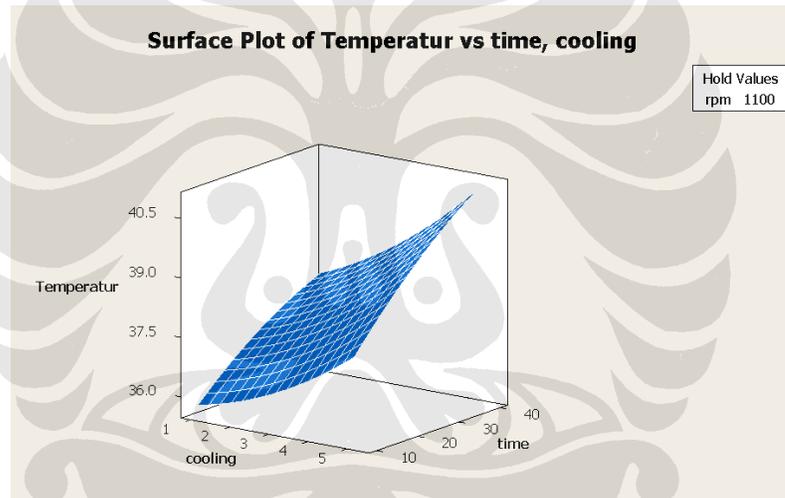


Gambar 5.11 Plot Interaksi antara faktor pemesinan dengan temperatur

Selanjutnya kita juga dapat membuat distribusi gambaran interaksi antara faktor dan pengaruhnya terhadap temperatur pemotongan dalam bentuk tiga dimensi seperti tampak pada dua gambar di bawah ini. Pada gambar 5.12 terlihat hubungan temperatur pemotongan terhadap jenis pendingin dan putaran *spindle*. Hubungan yang terjadi adalah: makin tinggi jenis pendingin dan makin tingginya putaran *spindle* yang digunakan, maka temperatur pemotongan akan semakin besar juga.



Gambar 5.12 Surface Plot Temperatur vs rpm, cooling



Gambar 5.13 Surface Plot Temperatur vs time, cooling

Begitu juga dengan hubungan temperatur pemotongan terhadap jenis pendingin dan waktu pemesinan, hamper memiliki pola yang sama dengan gambar sebelumnya. Makin tinggi jenis pendingin dan waktu pemesinan, maka temperatur pemotongan akan semakin tinggi pula. Kondisi ini dijaga pada putaran *spindle* 1100 rpm.

5.2 Pengaruh Penggunaan Nanofluida Terhadap Kualitas Permukaan Hasil Pemesinan

Bagian ini merupakan tambahan dalam rangka memenuhi tujuan penelitian—yaitu melihat pengaruh penggunaan nanofluida terhadap kualitas permukaan hasil pemesinan.

5.2.1 Deskripsi Data Penelitian; Pengaruh Nanofluida Terhadap Kualitas Permukaan Hasil Pemesinan.

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

Tabel 5.3 Rata-rata Nilai kekasaran Pendingin 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

Tabel 5.4 Rata-rata Nilai kekasaran (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

Tabel 5.5 Rata-rata Nilai kekasaran (nanofluids 1% + lubricant 3%)

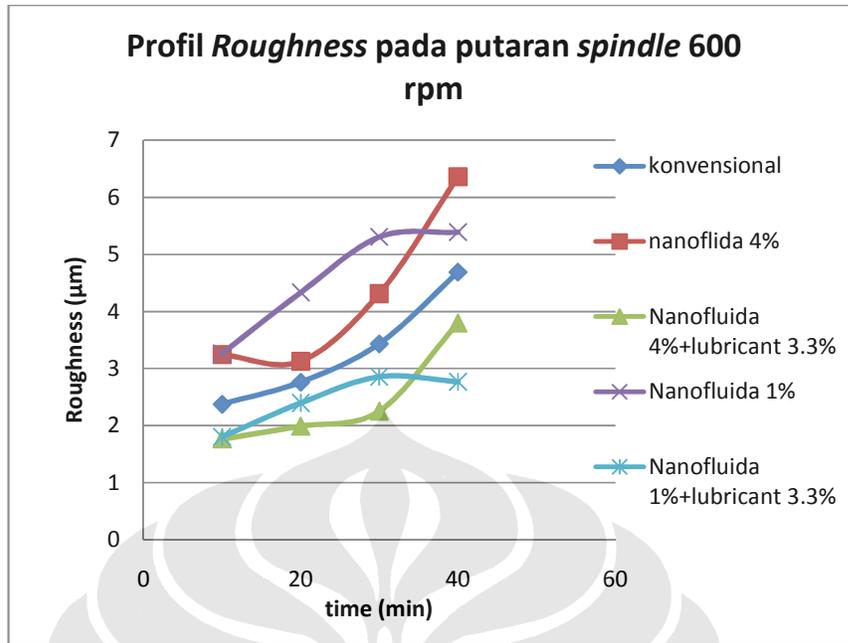
		time (menit)			
		10	20	30	40
rpm	600	1.804	2.397	2.855	2.768
	1100	1.535	2.37	2.86	2.331
	2200	1.428	1.951	1.798	2.225

Tabel 5.6 Rata-rata Nilai kekasaran NanoFluida 4%

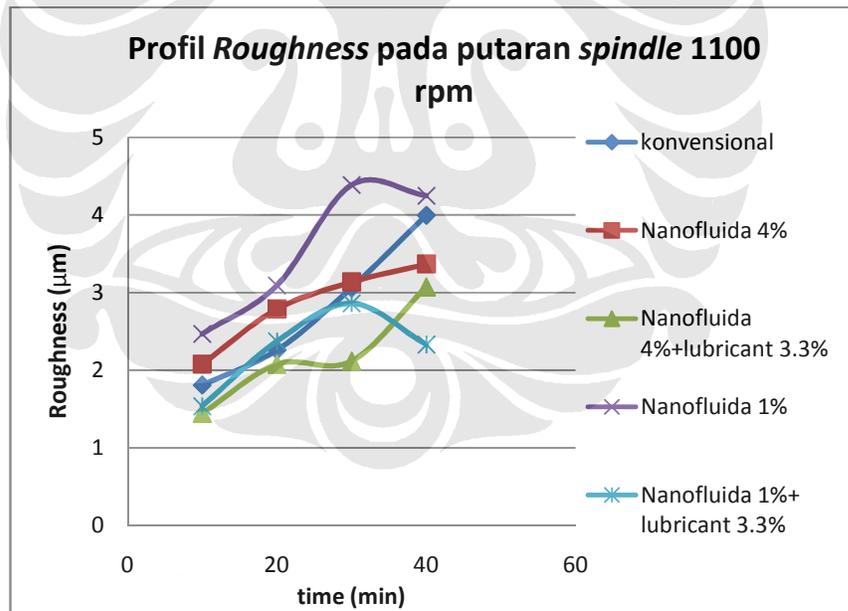
		time (menit)			
		10	20	30	40
rpm	600	3.242	3.128	4.314	6.364
	1100	2.076	2.786	3.135	3.366
	2200	1.846	2.184	2.204	2.407

Tabel 5.7 Rata-rata Nilai kekasaran (nanofluids 4% + lubricant 3%)

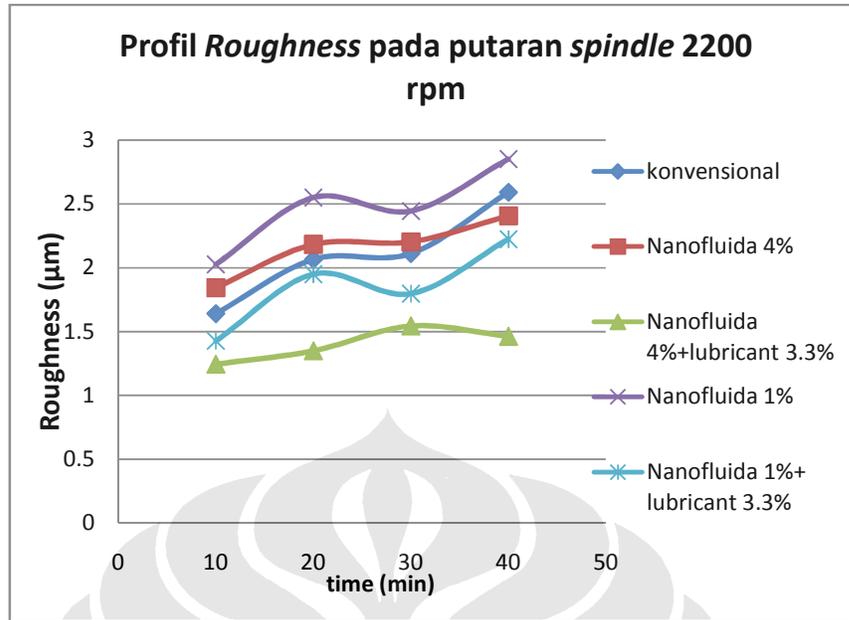
		time (menit)			
		10	20	30	40
rpm	600	1.765	1.989	2.254	3.799
	1100	1.442	2.076	2.117	3.071
	2200	1.245	1.35	1.545	1.464



Gambar 5.14 Profil Roughness pada putaran mesin 600 rpm



Gambar 5.15 Profil kekasaran permukaan pada putaran mesin 1100 rpm



Gambar 5.16 Profil kekasaran permukaan pada putaran mesin 2200 rpm

Dari ketiga grafik di atas, dapat diambil dua analisis 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 [Gandjar K., et. al. 2005].

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. Analisis lebih lanjut pengaruh parameter pemesinan terhadap kualitas permukaan hasil pemesinan dapat dilihat pada penelitian lain [Riansyah, 2008].

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 jelek terhadap kekasaran permukaan hasil pemesinan. Jika fluida pendingin diurutkan berdasarkan kemampuannya menghasilkan kekasaran paling baik (halus) sampai paling jelek (kasar) adalah sebagai berikut: nanofluida 4%+*lubricant* 3.3% - nanofluida 1% + *lubricant* 3.3% - pendingin konvensional (air + *lubricant*) – nanofluida 4% - 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 *performance*-nya 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* (analisis lebih jauh akan diberikan kemudian), dan
- (2) pada proses pemesinan menggunakan nanofluida 4% ini di bak sirkulasi fluida pendingin timbul *foam* (sabun) yang menyebabkan sistem pendinginan tidak maksimal kerjanya. Ada dua hal yang memungkinkan terjadinya *foam* (sabun) yaitu adanya fase uap yang terperangkap dalam

fluida, dan reaksi kimia karena turbulensi yang tinggi (seperti terjadi peristiwa pengocokan putih telur). Kemungkinan pertama bisa dikatakan mustahil, karena temperatur kerja fluida pendingin tidak lebih dari 45 °C, yang berarti belum mampu untuk mendidihkan fluida dasar sehingga menjadi uap. Sehingga, sampai saat ini penulis berpendapat bahwa *foam* yang terbentuk pada bak penampungan (*reservoir*) fluida pendingin disebabkan adanya turbulensi yang sangat tinggi pada bak karena gerakan pompa. Ada gerakan acak menyebabkan interaksi antara partikel nano dan fluida dasar yang kemudian menimbulkan *foam* pada bak penampungan.



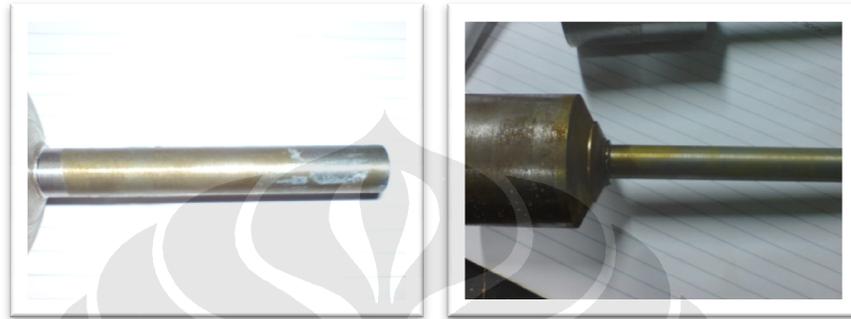
Gambar 5.17 Timbulnya foam pada reservoir

5.2.2 Analisa Timbulnya Karat di Material pada Pemesinan yang Menggunakan Nanofluida.

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 penulis, hasil yang kontradiksi terhadap hipotesis awal ini disebabkan timbulnya karat (*rust*) 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 5.18 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 [Fontana, 1986]. Secara garis besar, karat dibagi menjadi delapan bagian besar: *uniform attack*, *galvanic*, *crevice*, *pitting*, *intergranular*, *selective leaching*, *erosion*, *stress*, dan *hydrogen damage* [Fontana, 1986]. Menurut analisis penulis, 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 pengkaratan 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 5.19 Deret Volta

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 [Fontana, 1986]. 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 [Fontana, 1986]. 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, 1986] 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 korosivitas jenis ini. Pada percobaan ini aliran bersifat turbulen (lihat pembahasan analisis termal proses pemesinan). Jenis aliran turbulen ini menyebabkan agitasi 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*.



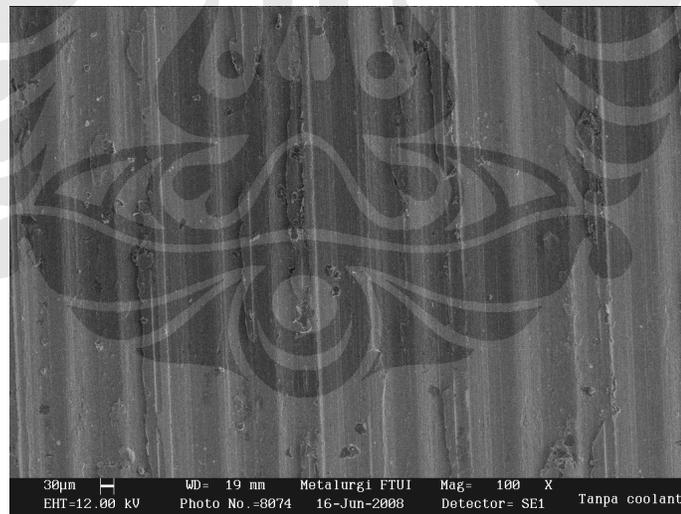
Gambar 5.20 Material hasil pemesinan dengan fluida pendingin nanofluida 4% + *lubricant* 3.3%

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.

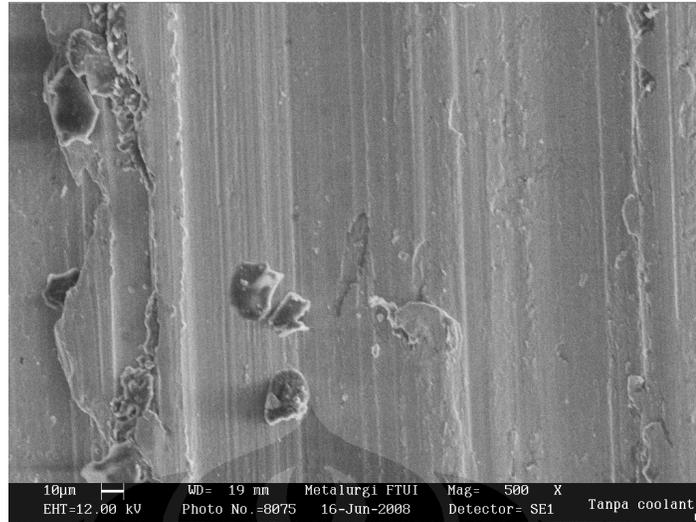
5.2.3 Analisa Timbulnya *Tool Wear* dan *Surface Integrity* Material Hasil Pemesinan

Dari hasil pemesinan yang telah dilakukan 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 *cooling fluid* berbeda, material awal benda kerja (diberikan *dry cutting*) selama 2 menit, material benda kerja dengan fluida pendingin konvensional, dan nanofluida 4% + *lubricant* 3.3%. Semua contoh material kerja yang diambil diberi perlakuan pemesinan selama 20 menit pada putaran *spindle* 2200 menit. Selain itu, peneliti juga melakukan SEM pada tiga kondisi mata pahat yang digunakan dalam pemesinan. Hasil dari proses *scanning* yang dilakukah ialah seperti:

- Pada material uji tanpa *Cooling Fluid* (*dry cutting*), merupakan kondisi awal materi benda kerja.

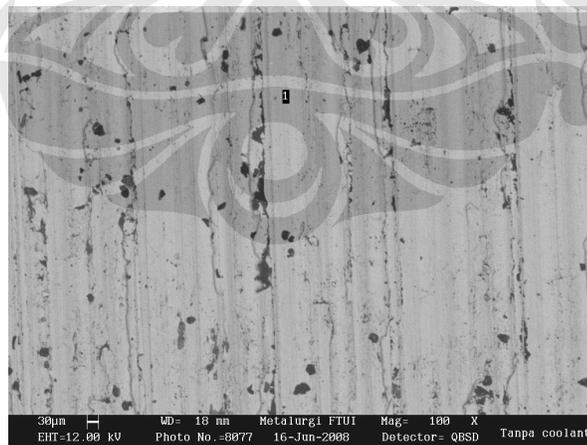


Gambar 5.21 Topografi material dengan *dry cutting*; perbesaran 100 kali



Gambar 5.22 Topografi material dengan dry cutting; perbesaran 500 kali

Kedua gambar diatas (gambar 5.21 dan 5.22) diambil dengan menggunakan detector SE1 yang berfungsi untuk mengetahui keadaan permukaan dari material, berupa topografi permukaan material yang diuji. Dari gambar dapat kita lihat topografi permukaan material yang melalui proses pemesinan tanpa fluida pendingin terlihat kasar dan banyak pengotor yang tersisa.



Gambar 5.23 Perbesaran 100 kali (dry cutting) dengan detector QBSD

Pada gambar diatas dapat kita lihat proses SEM dilakukan menggunakan detector QBSD yang dapat digunakan untuk menganalisis 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.

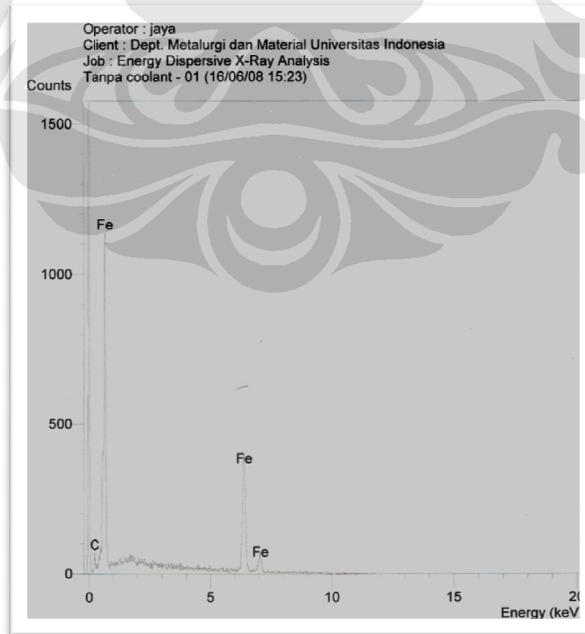
1 peak possibly omitted: 5.48 keV

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
  
```

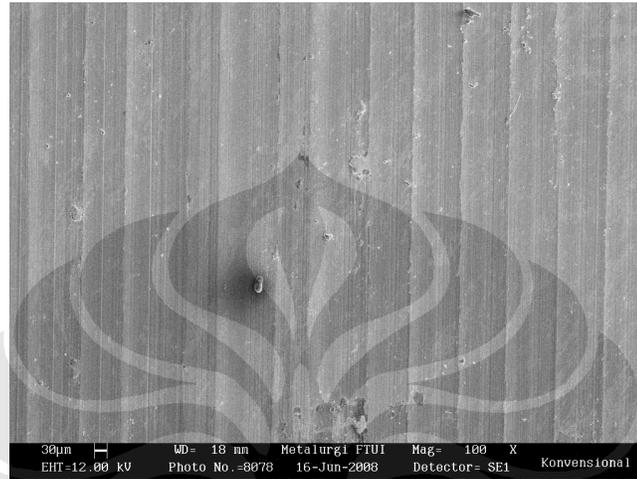
Gambar 5.24 Data hasil analisa unsur material uji dry cutting



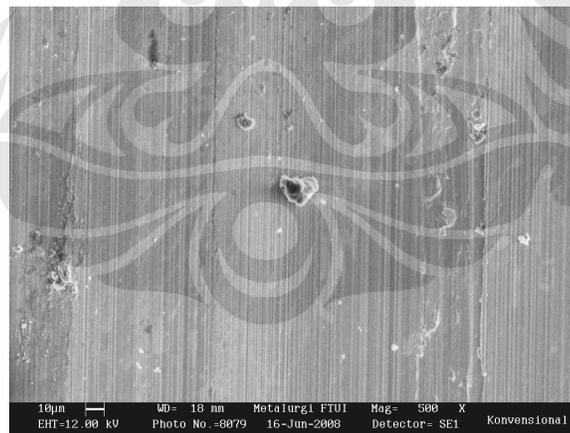
Gambar 5.25 grafik hasil analisa unsur material uji dry cutting.

Dari hasil analisis 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.

- Material uji dengan *cooling fluid* konvensional



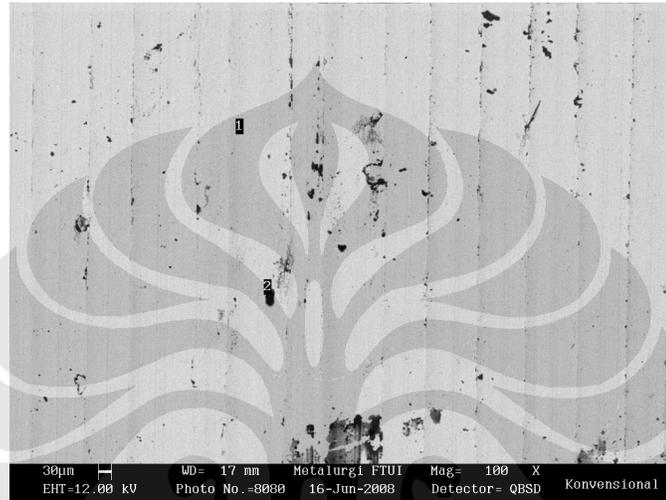
Gambar 5.26 Topografi material dengan *cooling fluid* konvensional; perbesaran 100 kali



Gambar 5.27 Topografi material dengan *cooling fluid* konvensional; perbesaran 500 kali

Pada kedua gambar di atas, terlihat bahwa topografi permukaan material hasil pemesinan tampak lebih halus dibanding dengan material awal yang diberi perlakuan dry cutting selama 2 menit. Pada gambar tampak ada daerah

(*region*) yang sedikit berbeda dengan permukaan lainnya. Untuk mengidentifikasi 'kelainan' tersebut maka dilakukan penembakan pada daerah tersebut dengan menggunakan detector QBSD seperti tampak pada gambar di bawah ini. Selanjutnya, apa saja material pembentuk pada daerah tersebut (titik 1 dan 2 pada gambar 5.28) dapat dilihat pada gambar 5.29 dan 5.30.



Gambar 5.28 Hasil SEM pada cooling fluid konvensional dengan detector QBSD

```
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

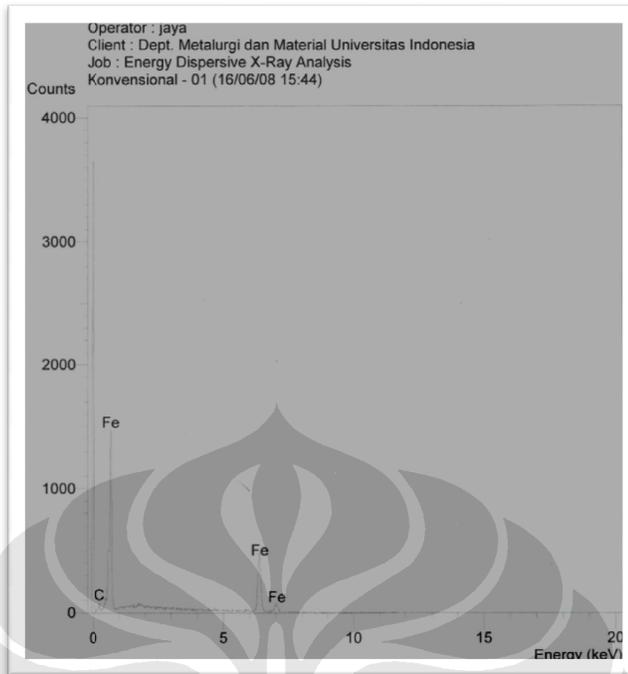
Quantitative method: ZAF (2 iterations).
Analysed all elements and normalised results.

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

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

* = <2 Sigma

Gambar 5.29 Data hasil analisa unsur pada penggunaan cooling fluid konvensional pada titik 1



Gambar 5.30 Grafik hasil analisa unsur pada penggunaan cooling fluid konvensional pada titik 1

```

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.

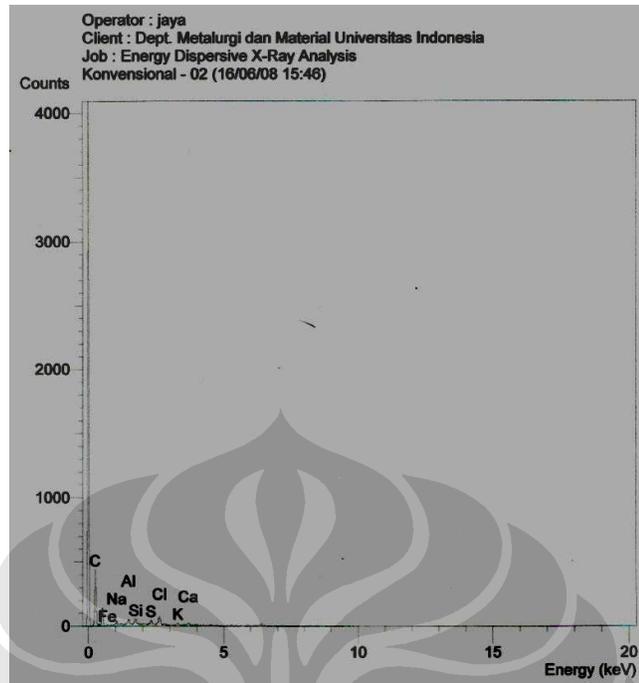
Standards :
C K Carbon Low 13/09/06
Na K Orthoclase 22/03/06
Al K CeAl2 03/03/07
Si K Low Carbon Steel 13/09/06
S K FeS2 22/03/06
Cl K KCl 15/02/94
K K Orthoclase 22/03/06
Ca K Orthoclase 22/03/06
Fe K FeS2 22/03/06

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

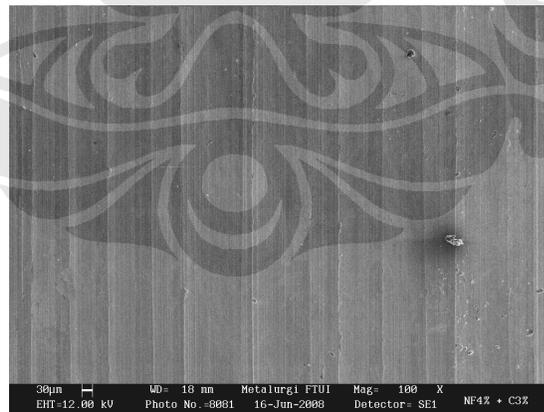
```

Gambar 5.31 Data hasil analisa unsur pada penggunaan cooling fluid konvensional pada titik 2

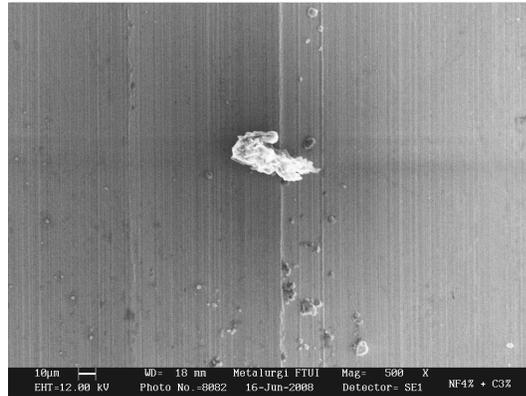


Gambar 5.32 Grafik hasil analisa unsur pada penggunaan cooling fluid konvensional pada titik 2

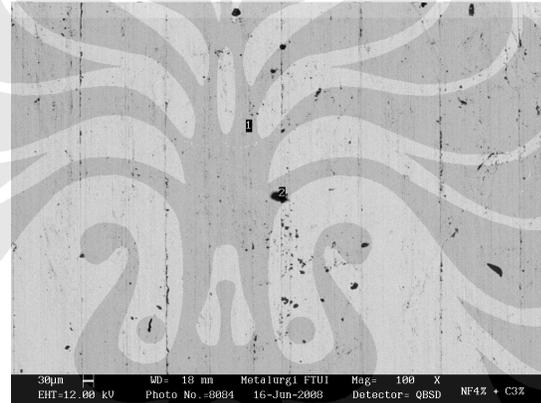
- Hasil SEM pada penggunaan cooling fluid Nanofluida 4% + 3.3 % lubricant.



Gambar 5.33 Topografi material dengan nanofluida 4%+engineer oil; perbesaran 100 kali



Gambar 5.34 Topografi material dengan nanofluida 4%+engineer oil; perbesaran 500 kali



Gambar 5.35 Hasil SEM pada cooling fluid nanofluida dengan detector QBSD

Pada kedua gambar di atas, terlihat bahwa topografi permukaan material hasil pemesinan tampak lebih halus dibanding dengan material awal maupun material yang diproses dengan pendingin konvensional. Pada gambar tampak ada daerah (*region*) yang sedikit berbeda dengan permukaan lainnya. Untuk mengidentifikasi ‘kelainan’ tersebut maka dilakukan penembakan pada daerah tersebut dengan menggunakan detector QBSD seperti tampak pada gambar di bawah ini. Selanjutnya, apa saja material pembentuk pada daerah tersebut (titik 1 dan 2 pada gambar 5.35) dapat dilihat pada gambar 5.36 sampai 5.39.

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

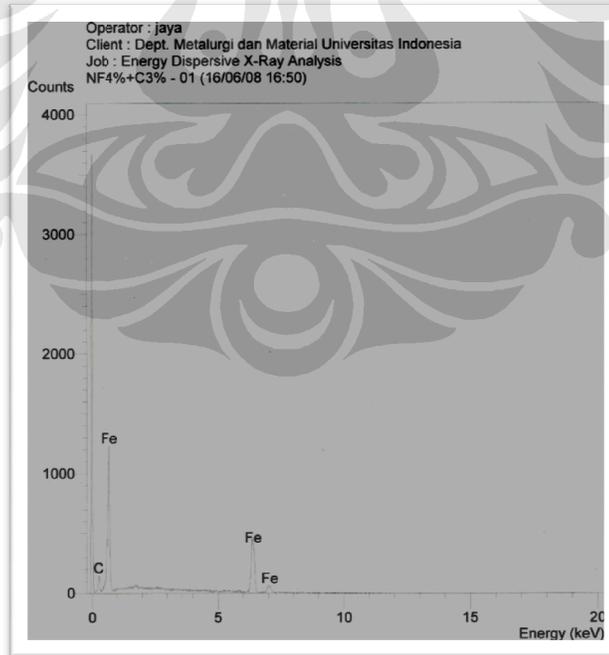
Standards :

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 5.36 Data hasil analisa unsur pada penggunaan cooling fluid nanofluida+ lubricant pada titik 1



Gambar 5.37 Grafik hasil analisa unsur pada penggunaan cooling fluid nanofluida pada titik 1

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

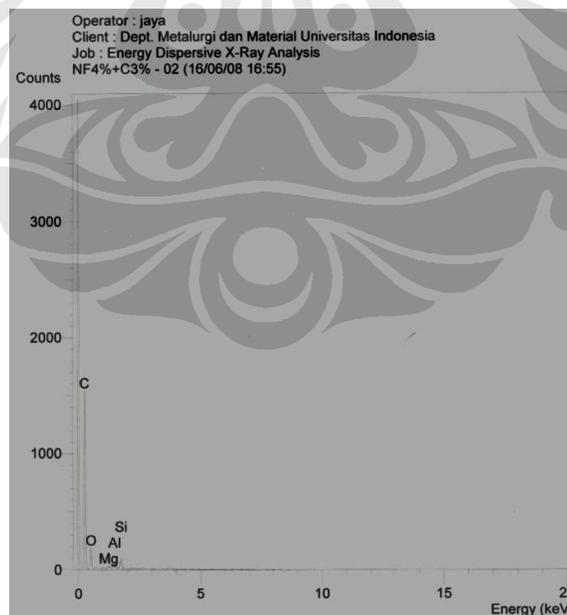
Standards :

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

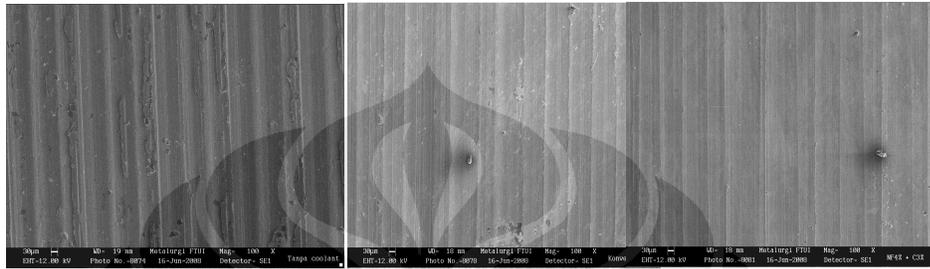
* = <2 Sigma

Gambar 5.38 Data hasil analisa unsur pada penggunaan cooling fluid nanofluida pada titik 2



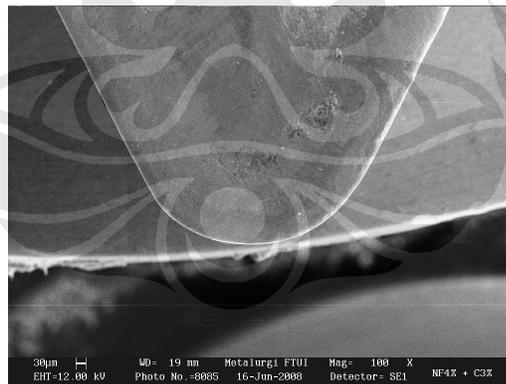
Gambar 5.39 Grafik hasil analisa unsur pada penggunaan cooling fluid nanofluida pada titik 2

Temuan yang menarik dari proses SEM pada material ini yaitu munculnya unsur/ material baru pada benda kerja. Adanya tambahan Al sampai lebih 4%, menurut penulis juga disebabkan karena nano partikel Al_2O_3 yang terdispersi pada fluida dasar menempel pada permukaan benda kerja. Berikut merupakan perbandingan topografi antara ketiga sample permukaan benda kerja yang diuji untuk perbesaran 100 kali.

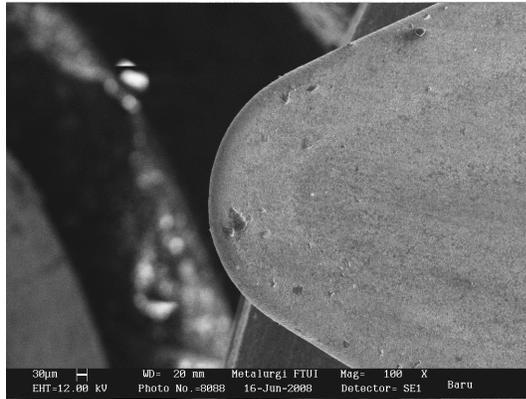


Gambar 5.40 Perbandingan topografi hasil pemesinan untuk (dari kiri ke kanan): dry cutting, konvensional, dan nanofluida 4% + lubricant 3.3%

Selanjutnya, akan diberi gambaran hasil SEM untuk *cutting tools* yang digunakan selama proses pemesinan.



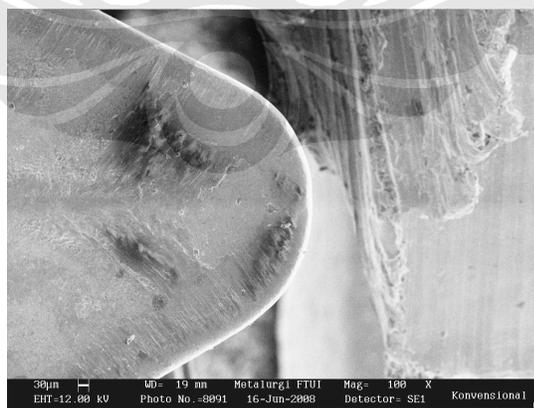
Gambar 5.41 Topografi mata pahat Nanofluida 4% + lubricant 3.3 %



Gambar 5.42 Hasil SEM pada mata pahat baru



Gambar 5.43 Hasil SEM pada mata pahat baru (unsur carbida)



Gambar 5.44 Hasil SEM pada mata pahat dengan cooling fluid konvensional

Dari gambar-gambar hasil SEM di atas, dapat dilihat bahwa jika kita membandingkan pertumbuhan kerusakan (*tool wear*) untuk parameter pemesinan yang sama, maka nanofluida 4% + *lubricant* 3.3% lebih baik dibanding dengan pendingin konvensional. Hal ini dapat dengan mudah dilihat topografi permukaan mata pahat bagian atas. Pada mata pahat yang menggunakan nanofluida, bentuk permukaan mata pahat masih sama seperti mata pahat baru. Di sisi lain, pada mata pahat yang menggunakan pendingin konvensional sudah timbul kerusakan kecil (lihat gambar 5.44). Fenomena ini bisa saja disebabkan karena temperatur pemotongan pada mata pahat dengan pendingin konvensional lebih tinggi dibanding yang menggunakan nanofluida (lihat pembahasan termal dan analisis temperatur penelitian). Selain itu, lebih cepat tumbuhnya wear pada pendingin konvensional menguatkan hipotesis awal penulis bahwa sedikit pengurangan temperatur pemotongan, maka akan memperpanjang umur alat (*tool life*) [Riansyah, 2008]

5.3 Analisis Efisiensi Nanofluida Sebagai Fluida Pendingin pada Proses Pemesinan

Efisiensi fluida pendingin dalam proses pemesinan paling banyak dinyatakan dengan kapasitas termal dan konduktivitas termal fluida tersebut [Degarmo, 2003]. 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. Hal ini dibuktikan dengan konduktivitas nanofluida yang masih 30% lebih baik dibanding fluida konvensional setelah 40 menit waktu pemesinan. 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 menguantifikasikan *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 400L. Dengan harga perliter *lubricant* mencapai Rp 80.000,- maka total dibutuhkan Rp. 1.056.000,-. Dari sisi ekonomi fluida pendingin konvensional lebih menguntungkan dibanding nanofluida.

Selanjutnya, analisis ekonomi juga dapat dilakukan dengan membandingkan 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 kapal laut (*ship combustion chamber*). Ruang bakar (*combustion chamber*) dipilih karena tingkat akurasi dimensi tinggi dan kekasaran permukaan yang rendah dibutuhkan pada bagian mesin ini untuk mengurangi gesekan (*friction*) dengan piston pada aplikasinya.

Ruang bakar kapal laut, yang umum diproses dengan pemesinan *boring* (*internal turning*) dengan pendingin konvensional mempunyai kekasaran permukaan rata-rata (*mean roughness*) 2.02 μm [N. Allard, 2007]. Sementara kekasaran permukaan yang dihasilkan pada penelitian ini adalah 2 μm . Jadi, 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 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.

Dengan berbagai keuntungan dan kerugian yang didapat dari masing-masing penggunaan nanofluida, kejelian melakukan *trade off* terhadap jenis pendingin yang akan digunakan pada proses pemesinan menjadi hal yang sangat penting. 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.

