

BAB II

TEORI PEMOTONGAN LOGAM DAN PENGUKURAN KEKASARAN PERMUKAAN

II.1 Teori Pemotongan Logam

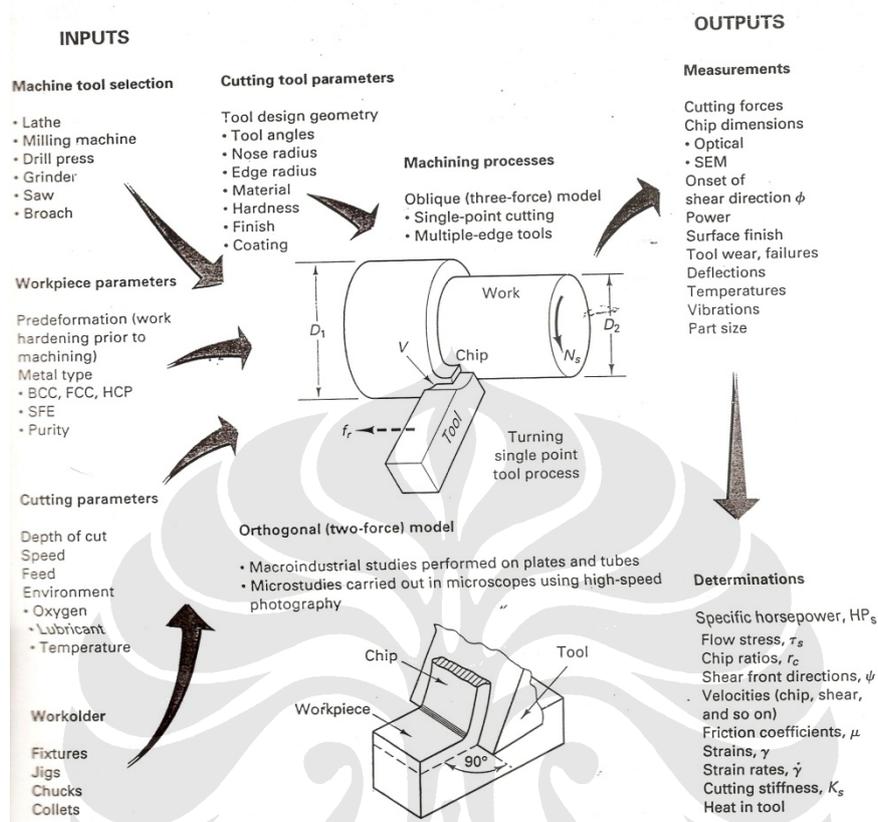
Kebutuhan akan produk hasil pemesinan dengan kualitas permukaan yang baik merupakan salah satu pemicu semakin berkembangnya metode-metode baru dalam teknologi pemotongan logam, salah satu bentuk perkembangan yang dapat dengan mudah kita jumpai ialah dengan adanya modifikasi alat-alat pemesinan seperti pengembangan mesin dengan kecepatan tinggi yang dapat digunakan dalam berbagai proses sekaligus.

Proses pemotongan logam pada dasarnya merupakan proses pelepasan material yang tidak diinginkan dari sebuah benda kerja dalam bentuk *chips* atau geram. Seperti yang telah diketahui proses pemotongan logam merupakan dasar dari sebuah industri manufaktur, salah satu bukti pentingnya proses *material removal* atau pemotongan logam dapat kita lihat pada industri manufaktur di USA yang menghabiskan dana sebesar \$ 60 *Billion* per tahun dalam proses *material removal*. [6]

Proses pemotongan logam merupakan proses yang kompleks dikarenakan merupakan proses dengan variasi input yang cukup luas. Beberapa contoh variasi yang memiliki pengaruh terhadap proses *material removal* antara lain :

- Jenis mesin yang digunakan dalam proses pemesinan
- Jenis *cutting tools* yang digunakan (Geometri dan material)
- Sifat-sifat dan parameter dari material benda kerja
- Parameter pemotongan (*speed, feed, depth of cut*)

Secara lengkap, variasi input yang dapat mempengaruhi performa dari suatu proses pemesinan dapat kita lihat pada gambar 2.1 di bawah ini :



Gambar II.1 Dasar input dan output pada proses pemesinan [6]

II.2 Proses Turning

Salah satu proses pemotongan logam yang umum digunakan dalam dunia manufaktur ialah proses *turning*. Proses *turning* sendiri merupakan kombinasi dari dua gerakan yaitu rotasi dari *workpiece* yang diputar pada spindel dan gerakan horizontal yang merupakan gerakan pemakanan oleh mata pahat. Namun dalam beberapa aplikasi, *workpiece* dapat diatur sebagai *part stationer* dengan *tool* yang berputar disekelilingnya untuk melakukan proses pemakanan. Gerakan pemakanan dari mata pahat dapat terjadi pada sepanjang *axis* dari benda kerja yang berarti diameter dari benda kerja akan semakin berkurang.

II.2.1 Metode-metode Pada Proses Turning

Berdasarkan letak pemotongan benda kerja, proses *turning* dapat dibagi menjadi dua yaitu :

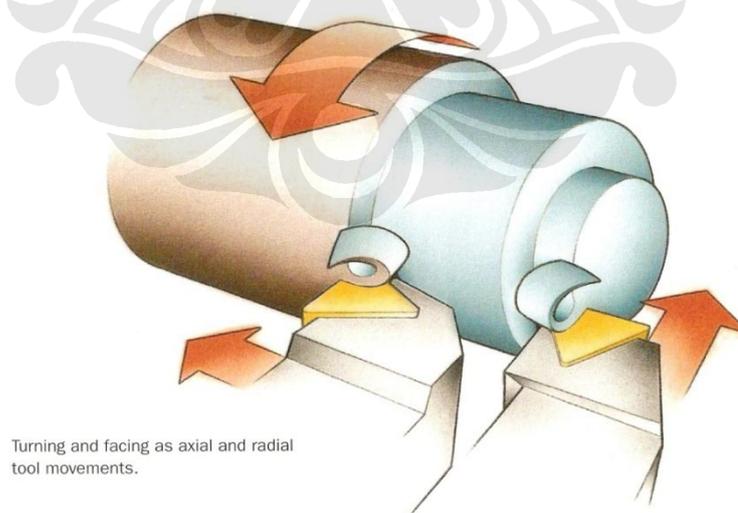
- a. *Eksternal turning*
- b. *Internal turning*

a) *Eksternal turning*

Berdasarkan letak cutting tools dan proses pemesinan, kita mengetahui bahwa *eksternal cutting* merupakan proses pemotongan material pada sisi-sisi terluar permukaan material kerja. Beberapa contoh dari *eksternal turning* diantaranya :

- *General turning (Straight turning)* : Dimana pemotongan dilakukan secara langsung di sepanjang axis dari material kerja. Atau dapat dikatakan bahwa mata pahat bergerak secara *axial* pada benda kerja.
- *Facing* : Pemotongan dilakukan ketika mata pahat diatur pada sudut 90^0 terhadap axis dari benda kerja yang berputar. Proses *facing* ini dapat menghasilkan bentuk permukaan yang datar (*flat*).

Untuk menggambarkan kedua proses diatas kita dapat melihat gambar 2.2 dibawah ini :

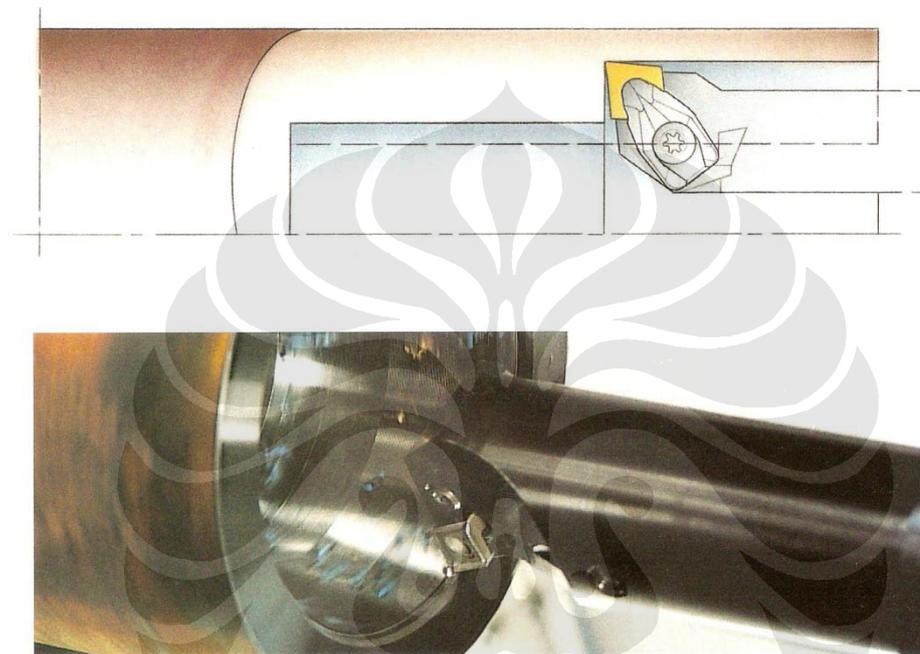


Gambar II.2 Proses Sraight turning dan facing [7]

b) *Internal turning*

Contoh dari internal turning ialah proses pemesinan *boring*, yaitu pemotongan logam yang dilakukan pada bagian centerline dari benda kerja sehingga dapat menghasilkan sebuah lubang atau hole pada bagian tengah benda kerja. Pada proses *boring* ini, pemilihan mata pahat sangat bergantung pada diameter dan panjang lubang yang akan dibuat.

Proses *boring* dapat kita lihat pada gambar 2.3 dibawah ini :

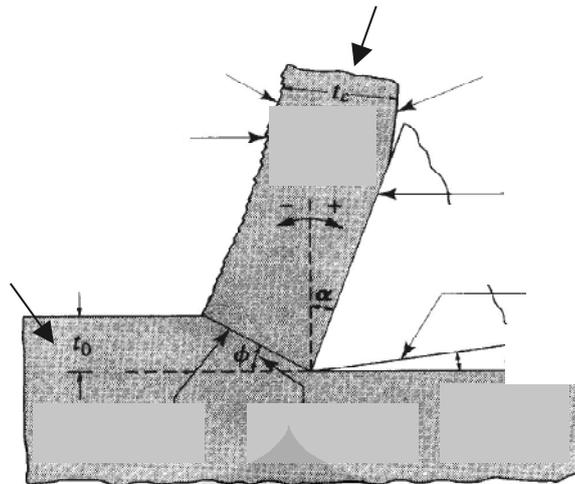


Tool overhang is the most prominent factor in boring operations.

Gambar II.3 Proses internal turning [7]

II.2.2 Terminologi pada Proses Turning

Secara garis besar, pelepasan material pada proses pemesinan terjadi karena adanya gaya potong (*cutting force*) yang ditimbulkan oleh pahat potong terhadap benda kerja (material kerja). Gaya potong ini timbul karena adanya pergerakan desakan relatif dari pahat potong terhadap benda kerja, seperti terlihat pada Gambar II.4. Material dari benda kerja yang terkena gaya ini akan terlepas dengan ketebalan awal (sebelum terdeformasi) sesuai dengan ketebalan pemotongan yang telah ditetapkan. Material yang terlepas ini biasa disebut *chip* (geram). [8-9].



Gambar II.4 Ilustrasi proses pemotongan [10]

Untuk memahami proses yang terjadi pada proses pemesinan *turning* maka perlu dipahami beberapa parameter pemesinan yang ada, yaitu :

- *Cutting speed* (V_c)

Cutting speed biasa dinyatakan dalam meter/menit (m/min) ialah kecepatan relatif dari mata pahat dengan benda kerja saat proses pemesinan berlangsung. Kecepatan potong ini bergantung pada kecepatan putaran spindle (n) dan diameter dari benda uji. Berdasarkan persamaan :

$$\text{.....(II.1)}$$

- *Spindle speed* (n)

Merupakan terminologi yang menyatakan besaran kecepatan putaran dari spindle mesin dengan satuan *revolution per minute* (rpm).

- *Feed* (f_n)

Feed dalam mm/rev merupakan gerakan dari mata pahat ketika melakukan pemotongan pada benda kerja yang menyatakan pula jumlah material yang terdeformasi per *revolution* benda kerja. Besarnya *feed* yang ditentukan dalam proses pemesinan merupakan kunci terhadap kualitas hasil permukaan. Selain itu besarnya *feed* juga mempengaruhi pembentukan *chips* pada proses pemotongan.

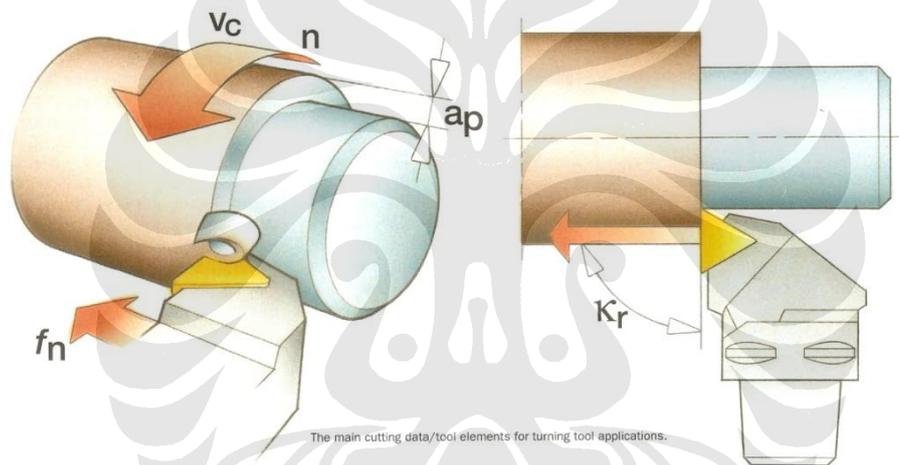
- *Cutting depth* (a_p)

Cutting depth dalam mm merupakan perbedaan antara bagian permukaan benda kerja yang terpotong dan yang tidak terpotong. Secara sederhana kita dapat mengartikan bahwa *cutting depth* merupakan kedalaman potong pada proses pemesinan.

- *Entering angle* (κ_r)

Merupakan sudut yang terbentuk antara *cutting edge* dengan arah proses pemakanan. *Entering angle* berpengaruh pada pemilihan jenis mata pahat karena akan mempengaruhi pembentukan *chips*.

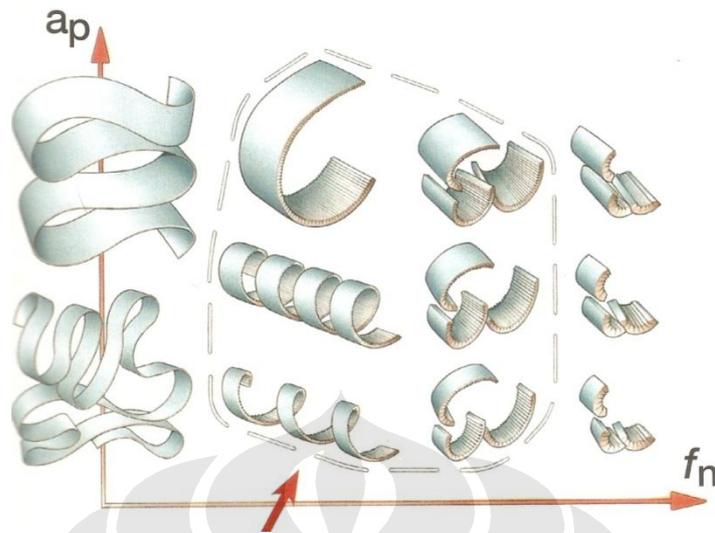
Sebagai visualisasi dari parameter diatas dapat kita lihat pada gambar 2.5 dibawah ini :



Gambar II.5 Parameter pemesinan pada proses turning [7]

II.2.3 Pembentukan *Chips*

Pada setiap proses pemotongan logam pasti akan menghasilkan geram atau *chips* yang merupakan bagian benda kerja yang terbuang akibat adanya gesekan berupa pemakanan dari mata pahat pada material. Faktor yang mempengaruhi pembentukan *chips* ini antara lain ialah besaran *depth of cut* pemakanan, *entering angle* dan *nose radius* dari mata pahat. Semakin kecil nilai *depth of cut* pemesinan maka semakin kecil *chips* yang terbentuk. Untuk melihat hubungan antara *depth of cut* ($DOC = a_p$) dengan *feed* kita dapat melihat gambar 2.6 dibawah ini :

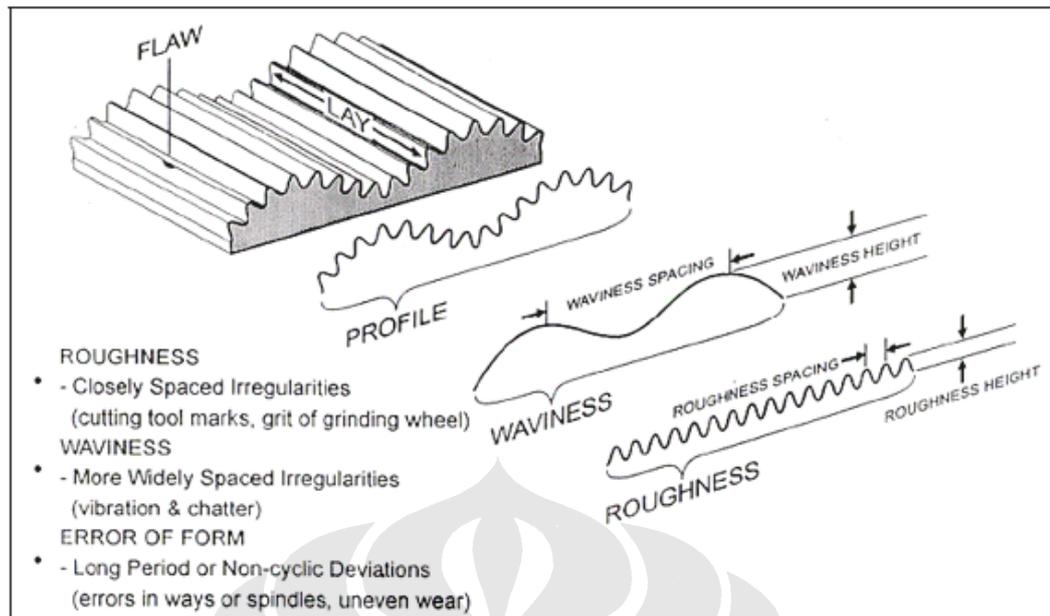


Gambar II.6 Pengaruh feed dan depth of cut pada pembentukan chips [7]

II.3 Terminologi Profil Permukaan

Ada tiga jenis ketidakteraturan (*irregularities*) suatu permukaan yang ditandai sebagai tekstur suatu permukaan yaitu :

1. *Error of form* : ketidakteraturan berupa kesalahan bentuk yang pada umumnya mudah dideteksi oleh metode pengukuran konvensional
2. *Waviness* : ketidakteraturan dalam bentuk gelombang dengan jarak yang teratur yang dapat dihubungkan dengan getaran mesin
3. *Roughness* : ketidak-teraturan yang terdiri atas lembah dan puncak pada daerah rapat (*closely-spaced*) yang melapisi kedua tipe sebelumnya, seperti terlihat pada gambar II.7 berikut :



Gambar II.7 Profil irregularities permukaan [11]

Dalam praktek, penentuan daerah *closely-spaced* dicapai dengan membuat pengukuran di atas jarak batas yang ditunjuk sebagai *cut-off length*. Panjang ini harus dipilih sedemikian rupa meliputi sejumlah ketidakrataan secara rata-rata. Jelas bahwa, *cut-off length* yang cocok adalah penting bagi pengukuran benda hasil pemesinan *turning* atau permukaan yang dibentuk menggunakan *individual tool*.

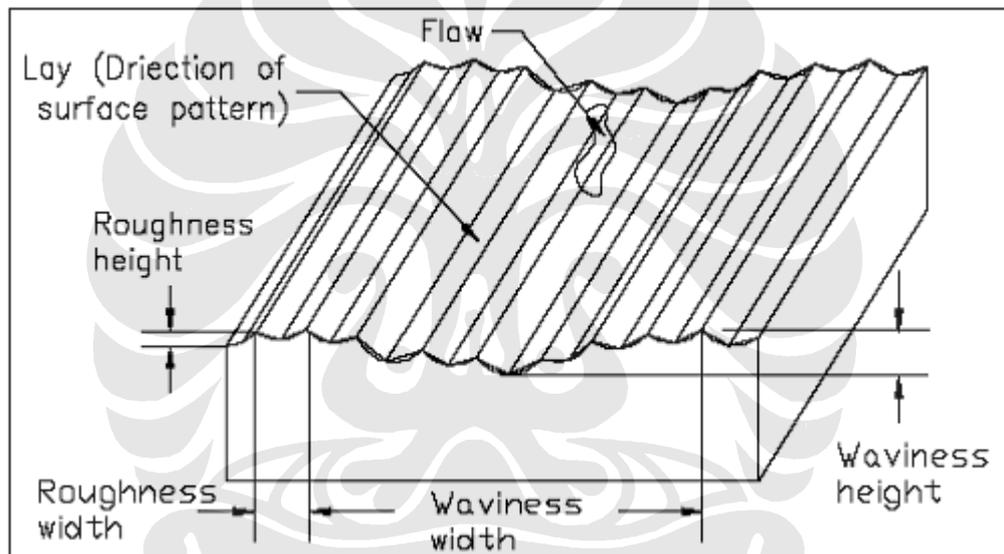
Instrumen yang digunakan untuk mengukur *surface finish* pada umumnya dirancang untuk bekerja dengan nilai *cut-off length* yang berbeda dalam hal ini 0.003", 0.01", 0.1" atau 0.25, 0.8, 2.5 mm. Ketika nilai tertentu dari *cut-off* dipilih, ini berarti bahwa instrumen tidak akan bereaksi terhadap *irregularities* dengan panjang gelombang yang lebih besar dari harga tersebut. [13]

Pada tahun 1947, *The American Standard B46.1-1947, "surface Texture"*, mendefinisikan beberapa konsep pengukuran permukaan dan terminologi tentang *surface texture* diantaranya :

- Tekstur permukaan : adalah suatu pola permukaan yang menyimpang dari permukaan nominal. Penyimpangannya mungkin berulang atau random yang disebabkan oleh *roughness*, *waviness*, *lay* dan *flaws*.
- *Real surface* (permukaan sebenarnya dari suatu objek) : adalah kulit (lapisan) yang mengelilingi dan memisahkannya dari medium yang melingkupi.

Permukaan ini selalu berassimilasi dengan penyimpangan struktural yang digolongkan sebagai *error of form* (kesalahan bentuk).

- *Roughness* (kekasaran) : terdiri dari ketidak teraturan yang sangat halus dari tekstur permukaan, yang pada umumnya mencakup ketidak teraturan yang diakibatkan oleh tindakan dari proses produksi itu.
- *Roughness width* (lebar kekasaran) : adalah jarak paralel pada permukaan nominal diantara puncak ke puncak berikutnya atau dari lembah ke lembah berikutnya dari pola utama kekasaran.
- *Waviness* : meliputi semua ketidakteraturan (*irregularities*) dimana pengaturan jaraknya adalah lebih besar dari panjang sampel *roughness*.



Gambar II.8. Profil tekstur permukaan [11]

- *Waviness height* : Tinggi gelombang adalah jarak puncak ke lembah yang dinilai dalam inci atau mili meter.
- *Waviness width* : lebar gelombang adalah jarak puncak ke puncak berikutnya atau jarak lembah ke lembah berikutnya, yang dinilai dalam inci atau mili meter.
- *Lay* : adalah arah pola permukaan utama, yang secara normal ditentukan oleh metode produksi.
- *Flaw* : adalah gangguan yang tak disengaja, tidak diduga, tak diingini pada topografi khusus dari bagian suatu permukaan.

- *Roughness sampling length* : adalah panjang sampling dari kekasaran rata-rata yang diukur. Panjang ini dipilih atau dispesifikasikan untuk memisahkan profil *irregular* yang ditandai sebagai *roughness* dari *irregular* yang ditandai sebagai *waviness*.

II.4 Topografi Permukaan dan Besar *Cutoff*

Topografi permukaan dapat ditandai dengan menggunakan beberapa parameter yang berbeda. Beberapa parameter yang biasa digunakan untuk menunjukkan topografi atau profil permukaan ialah :

- *Roughness average* (Ra)

Parameter ini juga diketahui sebagai nilai kekasaran tengah aritmatik (*the arithmetic mean roughness value*), AA (*arithmetic average*), atau CLA (*center line average*). Ra banyak dikenal secara universal dan digunakan pada parameter *roughness* internasional. Nilai Ra dihitung dengan persamaan :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Y(x)| dx \dots\dots\dots(II.2)$$

Dimana:

Ra = penyimpangan rata-rata aritmatik dari garis tengah.

L = panjang sampling

Y = ordinat dari kurva profil

- *Root-mean-square* (rms)

Ini adalah parameter *root-mean-square* yang berhubungan dengan Ra dengan persamaan :

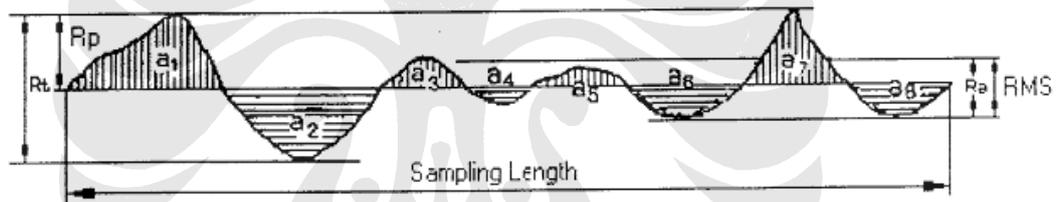
$$R_a = RMS = \sqrt{\left[\frac{1}{L} \int_0^L [(y(x) - y_{avg})]^2 dx \right]} \dots\dots\dots(II.3)$$

- Kedalaman total (*peak to valey roughness*) :

Ini adalah jarak antara dua garis paralel ke garis tengah yang berhubungan dengan titik ekstrim atas dan bawah pada panjang sampling *roughness* profil.

$$R_t = y_{\text{maximum}} - y_{\text{minimum}} \dots\dots\dots(II.4)$$

Pada persamaan diatas, nilai y_{avg} adalah nilai rata-rata dalam arah vertikal. Kemudian $y(x) - y_{\text{avg}}$ adalah deviasi dari *center line average* pada posisi x sembarang dalam arah yang dibaca dari $x = 0$ sampai $x = L$. Pada pengukuran *surface tester* jarum peraba (*stylus*) dari alat ukur harus digerakkan mengikuti lintasan yang berupa garis lurus dengan jarak yang telah ditentukan. Panjang lintasan ini disebut dengan panjang pengukuran (*traversing length*). Profil yang terukur pada panjang pengukuran (*sampling length*) kemudian dianalisa.



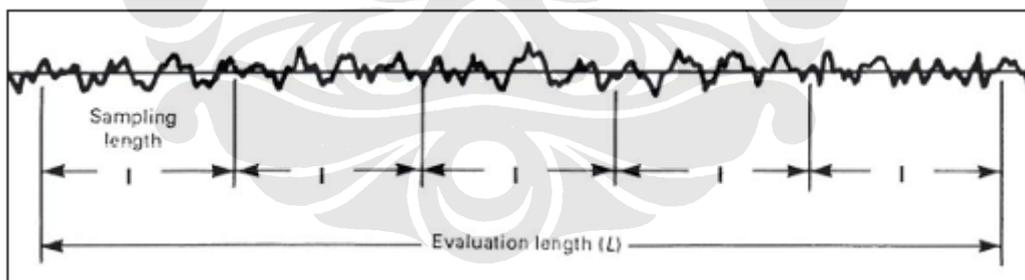
Gambar II.9 Ilustrasi profil permukaan [11]

Dalam menentukan panjang *cutoff* yang akan digunakan kita harus memperhatikan proses *finishing* permukaan yang akan diukur. Mesin yang mempunyai kemampuan pemakanan yang cukup lebar seperti mesin sekrap memerlukan nilai *cutoff* yang lebih panjang, dibandingkan dengan mesin yang mempunyai kecendrungan pemakanan yang lebih rapat seperti mesin *polish*. Untuk pemesinan *turning* lebar pemakanan tersebut tergantung pada nilai *depth of cut* dan *feed rate* yang digunakan. Tabel 2.1 memperlihatkan nilai *cutoff* untuk berbagai proses pemesinan. Jumlah *cutoff* sebagai panjang sampel pengukuran dalam panjang pengukuran adalah sebanyak 5 buah sehingga untuk *cutoff* 0.8 maka panjang pengukuran adalah 4 mm seperti dapat dilihat pada gambar 2.10. Sedangkan jumlah puncak yang disarankan yang terdapat dalam satu *cutoff* adalah sebanyak 10-15 *peaks*, seperti terlihat pada gambar II.11.

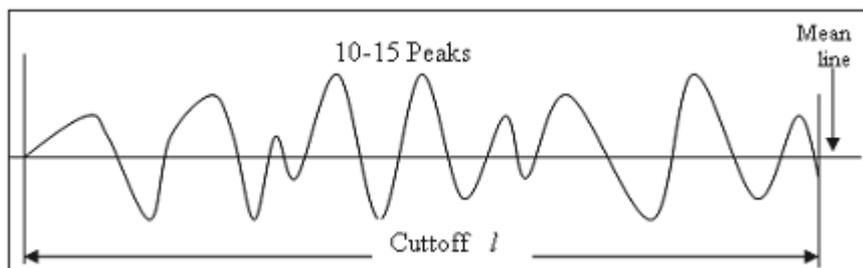
Tabel II.1 Nilai cutoff untuk beberapa proses pemesinan

Typical Finishing Process	Cut-off (mm)				
	0.25	0.8	2.5	8.0	25
Milling		■	■	■	
Boring		■	■	■	
Turning		■	■		
Grinding	■				
Planing			■	■	■
Reaming		■	■		
Broaching		■	■		
Diamond Boring	■	■			
Diamond Turning	■	■			
Honing	■	■			
Lapping	■	■			
Superfinishing	■	■			
Buffing	■	■			
Polishing	■	■			
Shaping		■	■	■	
EDM	■	■			
Burnishing		■	■		
Drawing		■	■		
Extruding		■	■		
Moulding		■	■		
Electro-polishing		■	■		

Sumber : T.V. Vorburger, "Surface finish metrology tutorial"[12]



Gambar II.10 Jumlah cutoff (sampel) dalam panjang pengukuran [11]



Gambar II.11 Jumlah puncak dalam cutoff [11]

II.5 Dasar-dasar Percobaan

Percobaan merupakan suatu prosedur atau serangkaian pengujian yang digunakan untuk mengamati pengaruh perubahan variabel *input* suatu proses terhadap *output* proses atau dengan kata lain, percobaan merupakan serangkaian kegiatan yang dilakukan dalam rangka mengumpulkan data atau informasi dengan melakukan perlakuan khusus terhadap faktor yang diuji untuk dapat menjelaskan suatu hipotesa. Keabsahan informasi yang diperoleh sangat ditentukan oleh design percobaan itu sendiri yang merupakan prosedur dalam memperoleh data. [14]



Gambar II.12 Pengertian percobaan [14]

Sebelum suatu percobaan dilakukan, maka pendekatan ilmiah untuk perencanaan percobaan perlu dipertimbangkan. Untuk mendapatkan kesimpulan yang valid dan objektif dari data yang dikumpulkan maka perlu dilakukan pendekatan secara statistik. Oleh karena itu ada dua aspek yang harus dipertimbangkan pada suatu percobaan yaitu disain percobaan dan analisa data statistik.

Menurut Douglas C. Montgomery, ada dua prinsip dasar percobaan yaitu perulangan (*replication*) dan randomisasi (*randomization*). Dengan replikasi berarti kita dapat melakukan perulangan eksperimen secara mendasar. Replikasi mempunyai dua sifat penting, Pertama, memungkinkan melakukan percobaan untuk memprediksi kesalahan percobaan. Perkiraan kesalahan ini menjadi suatu dasar pengukuran untuk menentukan apakah perbedaan data yang diamati benar-benar berbeda secara statistik. Kedua, jika sampel rata-rata misalnya \hat{y} , dipergunakan untuk memprediksi pengaruh sebuah faktor dalam percobaan,

replikasi memungkinkan melakukan percobaan untuk memperoleh suatu prediksi yang tepat. Jika σ^2 adalah variasi data terhadap n replikasi, maka variasi rata-rata sampel dapat ditulis sebagai : [15]

$$\sigma_y^2 = \frac{\sigma^2}{n} \dots\dots\dots(II.5)$$

Randomisasi adalah metode paling dasar yang mendasari penggunaan metode statistik dalam disain percobaan. Dengan *randomisasi*, lokasi material sampel dan eksekusi percobaan dapat ditentukan secara acak. Disamping itu metode ini juga mengurangi penyimpangan dan kesalahan sistematis.

Tabel II.2. Petunjuk pemilihan desain percobaan

Number of Faktor	Comparative Objective	Screening Objective	Response Surface Objective
1	1-factor completely randomized design	-	-
2-4	Randomized block design	Full or fractional factorial	Central composite or Box-Behnken
5 or more	Randomized block design	Fractional factorial or Plackett-Burman	Screen first to reduce number of factors

Sumber: Douglas C.Montgomery, "Design and Analysis of Experiments" [14]

Dalam menggunakan pendekatan statistik untuk merancang dan menganalisa percobaan, perlu didefinisikan permasalahan apa yang akan diteliti, bagaimana data dikumpulkan, dan pemahaman kualitatif bagaimana data ini dianalisa. Untuk menentukan jenis percobaan yang akan digunakan perlu dipertimbangkan jumlah faktor yang digunakan seperti tabel II.2 .

II.6 Eksperimen Faktorial

Eksperimen faktorial merupakan struktur percobaan yang sangat fundamental untuk percobaan dengan multi faktor. Faktor yang diuji biasanya dikelompokkan dalam tingkatan tertentu tergantung pada tipe eksperimen faktorial. Beberapa percobaan memerlukan pengkajian terhadap pengaruh dari dua faktor

atau lebih dimana faktor yang diuji perlakuannya umumnya merupakan level atau tingkatan dalam faktor – faktor tersebut. Dalam eksperimen faktorial L_k , faktor uji dikelompokkan dalam L level, misalnya 2 level *low* (-) dan *high* (+) dan jumlah faktor yang diuji adalah k , maka kemungkinan kombinasi perlakuan (*treatment combination*) adalah 2^k .

Eksperimen yang menggunakan lebih dari satu faktor dengan perlakuan yang merupakan kombinasi dari level-level suatu faktor dengan level-level faktor lain disebut sebagai eksperimen faktorial. Melalui eksperimen faktorial lengkap (*full factorial experiment*) semua kemungkinan kombinasi perlakuan dapat diteliti. Namun demikian, dalam kasus-kasus tertentu yang melibatkan banyak faktor akan memerlukan banyak satuan percobaan yang merupakan kombinasi perlakuan level faktor yang diuji. Setiap penambahan satu faktor uji akan menambah persiapan satuan percobaan menjadi dua kali lipat. Sebagai contoh percobaan dengan dua level dan faktor yang diuji berjumlah 3 faktor, maka harus dipersiapkan $2^3 = 8$ satuan percobaan, jika faktor yang diuji 4 faktor maka satuan percobaan menjadi 16. Jika level masing-masing faktor tersebut tidak sama, misalnya 2 faktor dengan 2 level dan 1 faktor dengan 3 level maka jumlah satuan percobaannya adalah: $2^2 \times 3^1 = 12$ satuan percobaan. Dapat dipastikan bahwa semakin banyak faktor yang akan diuji, percobaan tersebut memerlukan biaya dan waktu yang semakin banyak, apalagi dilakukan dengan cara *replikasi* yang banyak pula.

II.7 Fractional Factorial

Dalam percobaan faktorial ada metode alternatif yang disebut faktorial fraksi (*fractional factorial*), metode ini digunakan jika metode faktorial penuh sudah tidak ekonomis lagi, disebabkan banyaknya faktor yang harus diuji sehingga biaya penelitian menjadi sangat mahal. Dalam faktorial fraksi tidak semua fraksinya diuji tetapi disaring pada faktor-faktor yang paling berpengaruh pada suatu proses. Metode ini digunakan secara luas dalam penelitian di industri, misalnya untuk mempelajari pengaruh parameter operasi terhadap kualitas produk.

Terminologi dalam faktorial fraksi L^{k-p} sama halnya dengan percobaan faktorial penuh, k menyatakan jumlah faktor yang di uji, dan $p = 1, 2 \dots$ adalah fraksi indek sedangkan L adalah level dari faktor tersebut. Dalam metode ini beberapa kombinasi perlakuan ditiadakan dalam rangka mengendalikan ukuran eksperimen (percobaan). Kombinasi perlakuan dibentuk dengan memilih fraksi dari full factorial design. Ketika tidak semua kombinasi level faktor diuji, beberapa pengaruh tidak dapat diestimasi secara terpisah yang disebut *aliased* sebab beberapa pengaruh faktor akan membaur (*confounded*) dan tidak dapat dipisahkan dari pengaruh faktor lain.

Desain percobaan melalui pendekatan faktorial memungkinkan pengkajian pengaruh beberapa faktor pada suatu proses secara simultan. Disamping itu juga memungkinkan pengkajian interaksi antar faktor dimana interaksi ini memegang peranan penting dalam banyak proses. Secara umum percobaan dengan pendekatan faktorial berfraksi memberikan beberapa keuntungan antara lain :

- Sistem yang dihasilkan didominasi oleh parameter utama yang berpengaruh terhadap output sehingga memungkinkan untuk meminimasi order interaksi.
- Ada beberapa lots parameter atau faktor, tetapi semua merupakan parameter penting.
- Setiap *fraksional* faktorial mengandung *full* faktorial dengan jumlah yang sedikit.
- Dapat dilakukan penambahan kombinasi perlakuan (*runs*) untuk memudahkan interpretasi hasil.
- Kemudahan dalam analisa data percobaan dengan bantuan komputer.

II.8 Pengaruh Faktorial

Dengan eksperimen faktorial berarti bahwa tiap percobaan lengkap atau replikasi semua kemungkinan kombinasi level faktor dapat dipelajari. Sebagai contoh, jika terdapat a level untuk faktor A dan b level untuk faktor B, maka tiap replikasi memiliki kombinasi perlakuan ab . Pengaruh faktor yang diuji didefinisikan sebagai selisih respon yang dihasilkan akibat perubahan level faktor.

Pengaruh semacam ini sering disebut sebagai *main effect* sebab ia diacu sebagai faktor utama yang interest dalam eksperimen. Berdasarkan tabel dibawah ini, estimasi pengaruh faktor A terhadap B dan pengaruh faktor B terhadap faktor A berturut-turut secara numerik dapat ditulis sebagai :

$$A = \frac{1}{2} \{(a_2b_1 - a_1b_1) + (a_2b_2 - a_1b_2)\} \dots \dots \dots (II.6)$$

$$B = \frac{1}{2} \{(a_1b_2 - a_1b_1) + (a_2b_2 - a_2b_1)\} \dots \dots \dots (II.7)$$

Tabel II.3. Eksperimen Faktorial

Faktor A	Faktor B	
	B ₁	B ₂
A ₁	a ₁ b ₁	a ₁ b ₂
A ₂	a ₂ b ₁	a ₂ b ₂

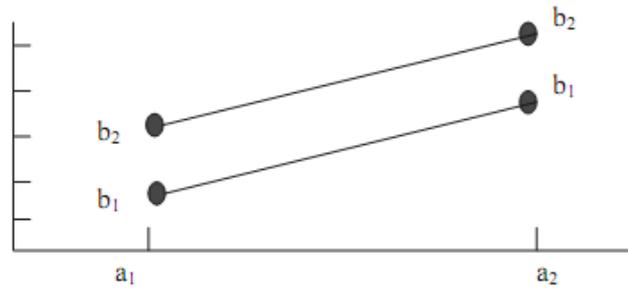
Sumber: Douglas C.Montgomery, "Design and Analysis of Experiments"[14]

Dalam banyak eksperimen sering ditemukan beberapa perbedaan respon antara level satu faktor dengan respon pada semua faktor yang lain. Hal ini mengindikasikan terdapat interaksi antara faktor tersebut. Selama pengaruh faktor A tergantung pada level yang dipilih untuk faktor B, maka terdapat interaksi antara faktor A dan B yang disebut AB. Pengaruh interaksi tersebut dapat diprediksi dengan persamaan berikut :

$$AB = \frac{1}{2} \{(a_2b_2 - a_2b_1) + (a_1b_2 - a_1b_1)\} \dots \dots \dots (II.8)$$

Jika $AB = 0$ maka dikatakan tidak ada interaksi antara faktor A dan B.

Dari uraian diatas, pengaruh faktor terhadap respon yang dihasilkan dapat digambarkan sebagai berikut: Gambar 2.13 merupakan plot data respon faktor A pada kedua level faktor B. Garis b1 dan b2 mendekati paralel, ini menunjukkan ketiadaan interaksi (*lack of interaction*) antara faktor A dan B



Gambar II.13 . Eksperimen Faktorial tanpa interaksi

Berbeda dengan gambar 2.13, gambar 2.14 berikut memperlihatkan bahwa garis b_1 dan b_2 tidak paralel. Ini mengindikasikan bahwa terdapat interaksi antara faktor A dan B.



Gambar II.14 . Eksperimen Faktorial dengan interaksi

II.9 Metoda Analisa Data

Variasi metode yang berbeda telah digunakan untuk menganalisa dampak semua parameter terhadap kualitas akhir produk. Meskipun sebagian besar penelitian mempergunakan sifat yang sama, dalam eksekusinya mereka melakukan variasi yang berbeda. Semua literatur yang relevan membolehkan desain eksperimen sebagai pendekatan yang sistematis untuk pengukuran sejumlah parameter yang tak terbatas. [14]

Analysis of variance (ANOVA) adalah salah satu teknik analisa statistik yang digunakan untuk menganalisa data eksperimen. Metode ini dikembangkan dan diperkenalkan pertamakali oleh Sir Ronald A Fisher. Konsep dasar (*Elementary concepts*) dari analisa varian dikenalkan sebagai *basic of statistical*

significance testing. ANOVA digunakan untuk menentukan parameter yang mempunyai pengaruh terhadap variabel respon.

Metode ini berfungsi untuk menguji rata-rata dari suatu sumber variasi yang berbeda. Hasilnya merupakan perbandingan rataan kuadrat perlakuan dengan rataan galat (nilai F). Dimana nilai F menunjukkan ukuran perbedaan yang berarti dalam pengamatan akibat pengaruh perlakuan. Jika F hitung lebih besar dari nilai F tabel dengan derajat kebebasan dan keberartian tertentu, hipotesa mengenai adanya perbedaan diantara n buah perlakuan dapat diterima, begitu juga sebaliknya. Dalam perhitungan menggunakan software statistik, hasil perhitungan ANOVA diberikan dalam suatu tabel yang terdiri atas *sum of square* (SS), *degree of freedom* (DF), *mean of square* (MS), F value dan p value [14]. *Sum of square* (SS), menyatakan kuadrat skor simpangan yang dirumuskan sebagai :

$$SS = \sum (X_i - \bar{X})^2 \dots\dots\dots(\text{II.9})$$

Jika jumlah kuadrat tersebut dibagi dengan n atau n-1 maka akan diperoleh rata-rata kuadrat (*mean of square*). Perbandingan rata-rata kuadrat perlakuan antar kelompok (*mean square between group*, MSb) dengan rata-rata kuadrat dalam kelompok (*mean square within group*, MSw) inilah yang disebut sebagai rataan kuadrat galat (nilai F). Nilai ini menunjukkan ada atau tidaknya perbedaan yang berarti dalam pengamatan.

$$MS_B = \frac{SS_B}{k.(n-1)} \dots\dots\dots(\text{II.10})$$

$$MS_W = \frac{SS_W}{(k-1)} \dots\dots\dots(\text{II.11})$$

Dimana:

$$SS_B = \sum_{j=1}^k \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_j} Y_{ij}\right)^2}{n_j} - \frac{\left(\sum_{i=1}^N Y_{ij}\right)^2}{N} \dots\dots\dots(\text{II.12})$$

$$SS_W = \sum_{j=1}^N Y_{ij}^2 - \sum_{j=1}^k \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_j} Y_{ij}\right)^2}{n_j} \dots\dots\dots(\text{II.13})$$

BAB III

TEORI NANOFLUIDA

Fluida pendingin (*cooling fluid*) mempunyai peran penting dalam proses pemesinan; yakni mempengaruhi temperatur pemesinan, umur pahat dan kualitas hasil pemesinan. Pengurangan (sedikit) temperatur pemesinan akan signifikan meningkatkan umur pahat dan kualitas hasil pemesinan. Efek pendinginan karena pemakaian fluida pendingin ini mencegah pahat potong melampaui temperatur kritis nya pada suhu tersebut pahat menjadi lunak dan mengalami keausan dengan cepat [16]. Selain itu, fluida pendingin juga berfungsi mengurangi sebagai pelumas (*lubricating system*) kontak pahat potong dan material benda kerja, dan menyingkirkan *chips*—material benda kerja yang dibuang—pada daerah pemotongan [17].

Fluida pendingin konvensional, yang banyak digunakan saat ini, yaitu campuran antara air dan pelumas (*lubricant*) terbukti tidak mempunyai kemampuan memindahkan panas yang tinggi. Dengan kata lain konduktivitas termal fluida ini rendah. Metode paling sederhana untuk meningkatkan konduktivitas termal fluida adalah dengan: (1) meningkatkan luas permukaan perpindahan kalor, (2) meningkatkan kecepatan aliran (*flow velocity*) pendinginan, dan (3) Mendispersikan/melarutkan solid-partikel ke fluida dasar (biasanya partikel dalam ukuran mili/mikro meter). Ada beberapa masalah utama yang sering muncul pada metode yang terakhir disebutkan [18]. *Pertama*, kecepatan partikel untuk kembali ke kondisi awal; menggumpal dengan cepat. *Kedua*, jika fluida disirkulasikan untuk mencegah penggumpalan, maka partikel dengan ukuran ini dapat menyebabkan kerusakan (*wear*) di pipa, pompa, dan bantalan (*bearing*). Selain itu, fluida jenis ini juga menyebabkan penyumbatan (*clogging*) pada *microchannel*.

Nanofluida sebagai fluida pendingin baru, terbukti mempunyai konduktivitas termal yang lebih tinggi dibanding dengan fluida pendingin konvensional. Dengan keunggulan dalam hal kemampuan pemindahan panas ini,

nanofluida diharapkan memberikan dampak yang lebih baik terhadap umur alat, dan kualitas hasil pemesinan.

III.1 Dasar-dasar Nanofluida

Maxwell [1873] sudah pernah mengajukan ide mengenai pelarutan partikel dalam fluida dasar. Konsep Maxwell pada dasarnya adalah konsep tua—namun yang inovatif pada nanofluida adalah ide bahwa ukuran partikel merupakan hal terpenting dalam pengembangan nanofluida yang stabil dan mempunyai *thermal Conductivity* tinggi. Nanofluida mempunyai kapabilitas pendinginan heat fluks melebihi $1000\text{W}/\text{cm}^2$ [18].

III.1.1 Kemunculan Nanofluida

Kemunculan nanofluida didahului oleh berbagai penelitian micro-struktur dan juga nano teknologi itu sendiri. *Argonne National Laboratory* (ANL) adalah pelopor dalam penemuan nanofluida. Penelitian nanofluida didahului eksperimen dalam skala besar yang sangat mahal, dilanjutkan penelitian tentang *micro channel liquid-nitrogen cooling* [19]. Penelitian terakhir juga mencapai batas maksimalnya karena: jatuh tekan (*pressure drop*) pada *micro channel* naik secara signifikan jika diameter aliran dalam pipa terus diperkecil. Selain itu, pendinginan model ini membutuhkan *cryogenic system* dengan nitrogen cair. Pada saat yang bersamaan dengan dengan percobaan yang dilakukan oleh Choi, di Jepang juga diadakan riset sejenis oleh Matsuda et.al [20]. Namun nanofluida buatan Matsuda menggunakan *dispersant*; tambahan asam (HCl) atas basa (NaOH) pada untuk menghasilkan nano partikel yang stabil.

III.1.2 Perkembangan Konsep Nanofluida

Konduktivitas termal (*thermal conductivity*) mempunyai peran paling vital dalam perkembangan nanofluida. Fakta menunjukkan bahwa pada temperatur ruang, metal/logam mempunyai nilai konduktivitas termal yang lebih baik

dibanding dengan fluida murni. Sebagai contoh konduktivitas termal tembaga pada temperatur ruang besarnya 700 kali lipat dibanding air dan 3000 kali lipat dibanding pelumas mesin (*lubricant*) seperti pada tampak pada tabel di bawah ini [18].

Tabel III.1 Thermal Conductivity beberapa material

	Material	Thermal Conductivity (W/m · K) ^a
Metallic solids	Silver	429
	Copper	401
	Aluminum	237
Nonmetallic solids	Diamond	3300
	Carbon nanotubes	3000
	Silicon	148
	Alumina (Al ₂ O ₃)	40
Metallic liquids	Sodium at 644 K	72.3
Nonmetallic liquids	Water	0.613
	Ethylene glycol	0.253
	Engine oil	0.145

^aAt 300 K unless otherwise noted.

Pendekatan konvensional yang banyak dilakukan peneliti setelah [Maxwell, 1873] mengembangkan teori mini/mikro partikelnya—dengan melarutkan micro/mili material kedalam fluida dasar—mempunyai dua masalah teknik utama: konvensional mili/mikro material ini menggumpal dengan cepat pada fluida. (2) nilai konduktivitas (k) larutan semacam ini rendah pada konsentrasi logam rendah. Selain itu, suspensi konvensional ini dapat menyebabkan penyumbatan pada *microchannel*. Berikut adalah gambaran perbedaan umum suspensi konvensional dan nanofluida [18]:

Tabel III.2 Perbedaan kemampuan suspensi micro particle dan nanoparticle

	Microparticles	Nanoparticles
Stability	Settle	Stable (remain in suspension almost indefinitely)
Surface/volume ratio	1	1,000 times larger than that of microparticles
Conductivity ^a	Low	High
Clog in microchannel?	Yes	No
Erosion?	Yes	No
Pumping power	Large	Small
Nanoscale phenomena?	No	Yes

^aAt the same volume fraction.

III.1.3 Pembuatan Nanofluida

Berbagai jenis nano partikel—*Oxide Ceramics* (Al_2O_3 , CuO), *Nitride Ceramics* (AlN, SiN), *Carbide Ceramic* (SiC, TiC), *Metals* (Cu, Ag, Au), semiconductor, *Carbon Nano Tubes* (CNT)—dapat dibuat dengan menggunakan 2 metode : *physical method* dan *chemical method* [21]. Pada *Physical method*, material dipecah dengan menggunakan cara-cara seperti: Inert-gas condensation (IGC), Mechanical Grinding, ball milling. Sedangkan untuk *chemical method*, nano partikel dibuat dengan cara: *chemical vapor deposition* (CVD), *chemical precipitation*, *micro emulsion*.

Selanjutnya, nano partikel tersebut dilarutkan ke dalam fluida dasar (*host fluid*) dan dilakukan pencampuran agar nano partikel larut sempurna pada fluida dasar. Ada dua metode yang sering digunakan untuk melakukan pelarutan nano partikel ke dalam fluida dasar (*host fluid*): *single-step*, dan *two-step*.

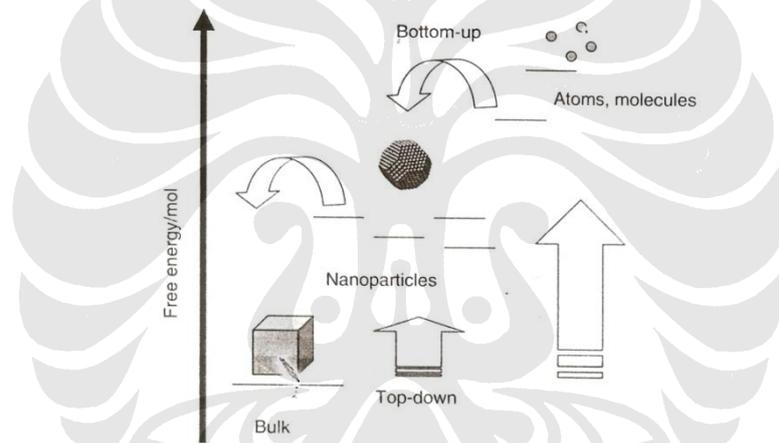
- a. *2-step: Pertama*, dibuat nano partikel dengan metode seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, yang kemudian didispersikan kedalam fluida dasar. Pendispersian dilakukan dengan memberikan tegangan geser yang tinggi dan juga gelombang ultrasonik (*ultrasound*). Metode ini banyak digunakan untuk nano partikel yang mengandung *carbon oxide* seperti Al_2O_3 , dan *carbon nano tubes*. Meskipun sudah dilakukan proses *ultra-sound*, namun belum ada jaminan kalau kualitas pendispersian telah optimal.
- b. *1-step*: pembuatan nano partikel dan juga proses pendispersian kedalam fluida dilakukan secara bersamaan (simultan). Metode ini cocok digunakan untuk nanofluida yang mengandung metal dengan nilai konduktivitas termal (k) yang tinggi seperti tembaga, Cu.

Metode yang lebih menjanjikan untuk menghasilkan nano partikel yang (lebih) terpisah adalah menggunakan VEROS (*Vacuum Evaporation onto a Running Oil Substrate*). Metode ini melibatkan kondensasi *nano-phase powder* dari phase uap yang langsung mengalir ke *low-vapor-pressure fluid* [22].

Ada beberapa faktor menarik ketika mempertimbangkan beberapa pendekatan sintesis nanofluida: (1) stabilitas termal, (2) kemampuan-larutan dalam media (*dispersability in medium*), dan (3) kemudahan manipulasi kimia [18].

1. Kestabilan termal

Nano partikel adalah sistem yang *metastable*. Artinya, mereka akan ditransformasikan kearah material stabil yang mempunyai energi minimal menyeluruh pada *free-energy*. Pada bentuk yang lebih kecil, kurang dari 1 nm, nano partikel mempunyai struktur berbeda—disebut molekul *nanocluster*. Nano partikel dapat dibuat dengan menggunakan dua pendekatan berbeda; *bottom-up approach*, dan *top-down approach*.

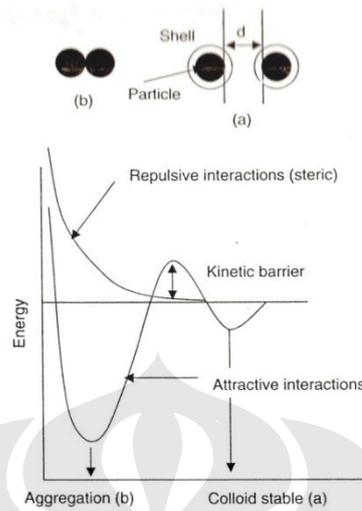


Gambar III.1 Kemungkinan Transformasi Bentuk NanoPartikel

Jika berada pada jarak yang dekat, maka pada nano partikel akan timbul interaksi antar partikel yang menyebabkan *coagulation* atau *coalescence*. Pada *aggregation*, partikel tetap pada sifat individunya namun bagian permukaan hilang karena interaksi yang terjadi. Interaksi antar partikel juga dapat menyebabkan *coalescence*—Penggabungan tidak berkebalikan (*irreversible fusion*) kearah partikel yang lebih besar.

Ketika dua nano partikel yang terpisah pada jarak d , interaksi antar partikel akan berujung pada energi minimum. Interaksi ini dapat berupa *electrostatic* atau *Van Der Waals*. Interaksi *Van der Waals* yang terjadi sangat kuat pada jarak yang dekat dan ketidakadaan *shell* (selubung) yang menjadi

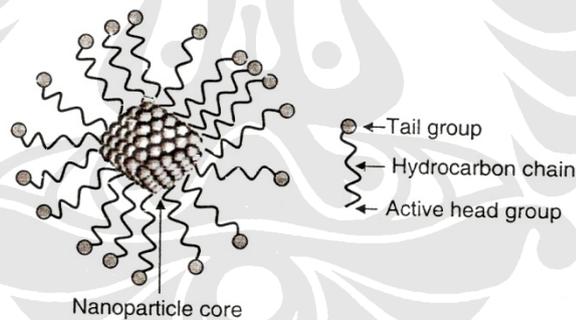
menyebabkan gaya tolak-menolak (*repulsion*) antar partikel nano. Kestabilan *shell* (selubung) juga tergantung dari temperatur.



Gambar III.2 Stabilitas Kinetik Sistem Nanopartikel

2. Kelarutan dalam media pelarut.

Nano partikel terbagi menjadi dua bagian besar; inti (*ceramic, metallic, polymer*), atau *shell* (*ionic, molekuler, polymer*).



Gambar III.3 Skematik Nano Partikel

Kemampu-larutan nano partikel tergantung dari sifat kimia ‘bawaan’ *shell*. Karakteristik kimia molekul *shell* masih mempunyai kesamaan dengan inti nano partikel. Dalam kebanyakan kasus, interaksi antar-rantai (*interchain*) lebih lemah dibanding dengan interaksi antar kepala sekelompok nano partikel. Kenaikan interaksi *Van der Walls* akan bertambah seiring dengan pertambahan panjang rantai.

3. Kesesuaian Kimia dan Kemudahan manipulasi kimia.

Ukuran, bentuk, dan sifat nano partikel—yang tergantung dari kondisi pembuatan—sangat signifikan jika ukuran inti (*core size*) yang sama harus digunakan untuk beberapa aplikasi yang berbeda. Sebuah nano partikel pada dasarnya terperangkap pada energi bebas (*free energy*) minimum lokal-nya, dan parameter-parameter dalam proses pembuatan (sintetis) sangat krusial dalam menentukan hasil akhirnya.

III.1.4 Penemuan Percobaan pada Nanofluida

III.1.4.1 Milestone pada Pengukuran Konduktivitas Termal

Penelitian awal masih memfokuskan pada nilai konduktivitas termal, k , yang tergantung dengan beberapa fungsi berikut: konsentrasi, temperatur, dan ukuran/dimensi. Konduktivitas termal nanofluida pada umumnya diukur dengan menggunakan *Hot-wire (THW) method*. Metode ini diakui sebagai metode terbaik dalam pengukuran nilai k [18]. Berikut adalah beberapa temuan mengenai nilai konduktivitas termal nanofluida:

Nanofluida *Metallic* dengan k -tinggi pada konsenstrasi rendah. Eastman et al. (2001) menemukan bahwa nanofluida dengan partikel Cu yang diproduksi dengan *1-step direct evaporation* mempunyai kenaikan konduktivitas termal yang lebih dramatis dibanding dengan *oxide nanofluid* yang diproduksi dengan *2-step producing*.

1. Ada hubungan tidak linear antara konduktivitas termal, k , dengan konsentrasi nano partikel. [18] merujuk pada [Choi et. al, 2001] [Xie et.al, 2003] [Hong et. al, 2005] [Eastman et. al 2001] dan [Chopkar et. al, 2005].
2. Ketergantungan nilai konduktivitas termal yang (sangat) erat dengan temperatur. Das et.al [18] menemukan bahwa konduktivitas termal nanofluida mempunyai ketergantungan terhadap temperatur yang lebih kuat dibanding dengan fluida dasar. Mereka menggunakan nanofluida yang mengandung partikel Al_2O_3 dan CuO yang menunjukkan kenaikan konduktivitas termal 2 sampai 4 kali pada *range* temperatur yang rendah antara 20-50 °C.

3. Ketergantungan nilai konduktivitas termal terhadap dimensi nano partikel [18] merujuk pada [Chon et. al, 2005] [Chopkar et. al, 2006].

III.1.4.2 Milestone Perpindahan Panas Konveksi pada Nanofluida

Koefisien perpindahan panas (*heat transfer*) h , untuk konveksi paksa (*forced convection*) pada pipa (*tubes*) nilainya tergantung kepada beberapa sifat fisika yang berhubungan dengan fluida atau geometri sistem dimana fluida tersebut mengalir. Faktor yang mempengaruhi tersebut antara lain: (1) *intrinsic properties*: konduktivitas termal, panas spesifik, kerapatan, dan kekentalan, serta (2) *ekstrinsik properties*: diameter dan panjang pipa serta kecepatan rata-rata fluida. Penelitian menunjukkan bahwa pada konveksi paksa terjadi kenaikan konduktivitas termal dan kemampuan perpindahan panas konveksi dibanding dengan fluida dasar. Namun, untuk konveksi alami (*natural convection*), yang terjadi adalah sebaliknya; nanofluida mempunyai kemampuan perpindahan panas yang lebih rendah dibanding fluida dasar. Berikut adalah beberapa temuan mengenai konveksi pada nanofluida:

1. Kenaikan 2-3,5 kali lipat nilai koefisien perpindahan panas konveksi aliran laminar (*laminar heat transfer coefficient*). [18] merujuk pada Faulkner et al. (2004) yang melakukan penelitian konveksi nanofluida dengan model *fully developed laminar* menggunakan nanofluida air-carbon nano tubes (CNTs). Ada dua temuan menarik dari penelitian ini. *Pertama*, Dia menemukan kenaikan koefisien perpindahan panas keseluruhan yang signifikan. Kenaikan ini sejalan dengan naiknya bilangan Reynold (Reynold number). *Kedua*, nanopartikel dengan konsentrasi rendah (1.1% volume) mempunyai kemampuan yang lebih baik dibanding dengan konsentrasi yang lebih tinggi (2.2 & 4.4 %). Wen dan Ding (2004) pada [18] juga menemukan hal yang sama dengan menggunakan model *Laminar entry flow nanofluid* dengan suspensi air-partikel $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.
2. Kenaikan signifikan nilai koefisien perpindahan panas konveksi aliran turbulen (*Turbulent heat transfer coefficient*). Xuan dan Li (2003) adalah pihak yang pertama meneliti hal ini [18]. Mereka menemukan bahwa pada

kecepatan tetap, koefisien perpindahan panas nanofluida yang mengandung 2% Cu nano partikel meningkat sekitar 40% dibanding dengan fluida dasar air. Penelitian baru-baru ini menunjukkan bahwa efek dari ukuran, bentuk partikel, dan partikel yang terlarut adalah komponen dominan dalam peningkatan koefisien perpindahan panas nanofluida.

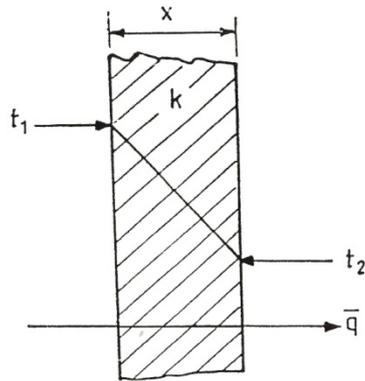
3. Penurunan koefisien perpindahan panas nanofluida heat pada konveksi alami. Putra et.al [23] melakukan pengujian pertama konveksi alami dengan nanofluida. Menggunakan air dengan partikel 130-nm Al₂O₃ dan 90-nm CuO partikel, mereka menemukan bahwa koefisien perpindahan panas nanofluida pada konveksi alami lebih rendah dibanding dengan fluida dasar air. Pengurangan nilai h ini sejalan dengan kenaikan konsentrasi partikel pada nanofluida.

III.2 Konduksi pada Nanofluida

Dalam konduksi, panas ditransfer berdasarkan getaran molekular (*molecular vibration*). Oleh karena itu, konduksi dapat tetap terjadi meskipun medianya dalam kondisi 'istirahat' [18]. Dalam *Theorie analytique de la chaleur* (1882), Joseph Fourier menyatakan bahwa *heat flux* (aliran kalor) pada arah aliran panas (*heat flow*) besarnya proporsional terhadap perbedaan temperatur (*temperature gradient*) pada arah tersebut.

$$q_x = \frac{Q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \dots \dots \dots (III. 1)$$

Dengan q_x adalah heat flux pada arah-x, seperti terlihat pada di bawah ini.



Gambar III.4 Aliran Panas Melalui Solid Slab

Q_x adalah kalor yang mengalir pada arah- x . A adalah luas area yang tegak lurus terhadap x (arah kalor mengalir), dan k adalah konstanta yang dikenal dengan konduktivitas termal (*thermal conductivity*) dari media penghantar kalor. Karena nilai k adalah ukuran kemampuan (*capability*) media untuk menghantar kalor maka nilai k selalu positif (+). Karenanya, perlu untuk memberikan tanda negatif (-), karena penurunan temperatur terjadi pada arah kalor mengalir. Nilai k tidak tergantung dengan faktor geometri media, tetapi tergantung dari sifat (*properties*) material dan temperatur media, satuannya adalah $W/m.K$.

Ada dua observasi menarik mengenai nilai k dalam hal kaitannya dengan nanofluida. *Pertama*, jelas nilai k dari cairan non-metal (*nonmetallic liquid*), yang umum digunakan sebagai pendingin/coolant, sangat rendah dibanding dengan fase padat metal. *Kedua*, nilai k dari fluida ini sangat rentan terhadap perubahan temperatur. Beberapa parameter lain yang penting dalam menganalisa nilai k adalah: difusivitas termal, diberikan oleh persamaan $\alpha = k/\rho C_p$, dengan k adalah konduktivitas termal, ρ kerapatan/densitas, dan C_p adalah panas spesifik. Satuan dari besaran ini adalah m^2/s .

Selanjutnya, ada dua metode yang dapat digunakan untuk mengukur nilai konduktivitas termal cairan: *steady-state method* dan *transient method*. Kelemahan dari *steady-state method* adalah ketidakmampuannya untuk menguantifikasi kehilangan/kerugian panas (heat lost) yang berakibat pada kemungkinannya untuk menghasilkan nilai yang tidak akurat, serta kemungkinan keterlibatan konveksi natural yang berakibat pada nilai konduktivitas yang lebih tinggi dari yang terlihat. Oleh karena itu, untuk mengukur konduktivitas termal

lebih baik menggunakan *metode transient*. Berikut adalah beberapa jenis metode *transient* yang banyak dijumpai di literatur.

- *Transient Hot-Wire Method*

Prinsip Kerja, pada metode ini, kawat metal tipis digunakan sebagai sumber kalor dan sensor temperatur. Kawat tersebut kemudian dikelilingi cairan yang konduktivitas termalnya akan diukur. Lalu, kawat dipanaskan dengan cara mengalirkan arus ke kawat tersebut. Sekarang, makin tinggi konduktivitas termal cairan yang mengelilingi kawat, maka kenaikan temperatur pada kawat semakin rendah. Percobaan ini berlangsung selama 2-8 detik, oleh karena itu konveksi natural tidak akan terlibat pada proses pengujian. Metode ini disebut *transient* karena kalor (heat) diberikan secara tiba-tiba. Nilai konduktivitas termal cairan didapat dari persamaan:

$$\frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln \frac{t_2}{t_1} \dots \dots \dots (III. 2)$$

Dengan q adalah panas/kalor yang dilepaskan per satuan waktu dan panjang sumber kalor dalam W/m, k adalah konduktivitas termal cairan yang terukur dalam W/m.K. Dengan temperatur sumber kalor pada waktu t₁ dan t₂ adalah T₁ dan T₂.

- *Temperature Oscillation Method*

Prinsip Kerja, Pengukuran dengan metode ini didasarkan pada perkembangan *oscillation* di dalam *cylindrical liquid volume*, selanjutnya, penggunaan Oksida (oxide) nano partikel untuk pembuatan nanofluida pertama kali dilakukan oleh Choi et.al [19]. *Oxide* dicoba berdasarkan pertimbangan kemudahan produksi, kestabilannya dibanding partikel metal murni yang susah disuspensikan tanpa adanya pengumapalan. Investigasi pertama yang dilakukan Choi menemukan bahwa kenaikan konduktivitas termal nanofluida dari oxide partikel (Al₂O₃) bentuknya linear.

$$k_{eff} = k_0 \frac{k_p + (n - 1)k_o - (n - 1)\varepsilon(k_o - k_p)}{k_p + (n - 1)k_o + \varepsilon(k_o - k_p)} \dots \dots \dots (III. 3)$$

Dengan k_{eff} adalah konduktivitas efektif nanofluida, k_p adalah konduktivitas partikel, k_o adalah konduktivitas fluida dasar, dan ϵ fraksi volum partikel, serta n adalah faktor bentuk partikel: $n=3/\psi$, dengan ψ adalah kebundaran partikel (sphericity of particle).

Masuda et.al (1993) pada [18] menemukan bahwa dimensi nano partikel bisa jadi merupakan alasan utama untuk menjelaskan kenaikan konduktivitas termal nanofluida. Xie et.al (2002) pada [18] menggunakan α dan γ alumina (Al_2O_3) dengan berbagai variasi dimensi (12 dan 30.2 nm) dan memfokuskan penelitian pada dua hal: nilai pH (derajat keasaman) suspense dan nilai SSA (specific surface area). Penurunan diameter partikel (d_p) menyebabkan peningkatan nilai SSA. Oleh karena itu, dengan menurunnya dimensi partikel, maka luas permukaan nano partikel meningkat; yang berujung pada peningkatan perpindahan kalor. Selanjutnya, terindikasi juga bahwa konduktivitas naik dengan naiknya nilai ϵ , dan menurun saat nilai pH naik.

Das et.al (2003) pada [18] menemukan bahwa ada efek yang kuat dari temperatur yang berhubungan dengan kenaikan nilai konduktivitas nanofluida. Makin tinggi temperatur, maka makin tinggi pulai kenaikan konduktivitas yang terjadi. Dia juga menemukan bahwa Al_2O_3 dengan volume partikel 4% memiliki konduktivitas lebih tinggi dibanding Al_2O_3 1% volume partikel.

Li dan Peterson (2006) pada [18] menemukan ketergantungan kuat konduktivitas nanofluida Al_2O_3 dengan fluida dasar air terhadap temperatur Mereka memberikan model peningkatan konduktivitas termal dari Al_2O_3 sebagai berikut:

$$\frac{k_{eff} - k_f}{k_f} = 0.764481\phi + 0.018688867t - 0.42147175 \dots (III. 4)$$

Disini, ϕ adalah fraksi volume partikel dan t adalah temperature (dalam celcius). Berikut adalah tabel yang menggambarkan berbagai penelitian tentang konduksi pada nanofluida [Qi Wang et.al, 2006] pada [18].

Tabel III.3 Resume Penelitian Konduktivitas Termal Nanofluida

Summary of experimental studies on thermal conductivity of nanofluids

Investigator	Particles	Size (nm)	Fluids	Observations
Eastman et al. [6]	Al ₂ O ₃ /CuO/Cu	33/36/18	water, HE-200 oil	60% improvement for 5 vol% CuO particles in water
Lee et al. [10]	Al ₂ O ₃ /CuO	24.4,38.4/18.6,23.6	water, EG	20% improvement for 4 vol% CuO/EG mixture
Wang et al. [11]	Al ₂ O ₃ /CuO	28/23	water, EG, PO, EO	12% improvement for 3 vol% Al ₂ O ₃ /water nanofluids
Das et al. [16]	Al ₂ O ₃ /CuO	38.4/28.6	water	2–4 fold increase over range of 21 °C to 52 °C
Xie et al. [21]	Al ₂ O ₃	12.2–302	water, EG, PO	pH value, SSA, crystalline phase
Li and Peterson [28]	Al ₂ O ₃ /CuO	36/29	water	enhancement with volume fraction and temperature
Xuan and Li [13]	Cu	100	water, oil	successful suspension of relatively big metallic nanoparticles
Eastman et al. [22]	Cu	<10	EG	40% increase for 0.3 vol% Cu-based nanofluids
Hong and Yang [23]	Fe	10	EG	18% increase for 0.55 vol% Fe/EG nanofluids
Patel et al. [29]	Au, Ag	4, 15/70	water, toluene	size, temperature, and chemical characteristics
Murshed et al. [12]	TiO ₂	∅10 × 40, ∅15	DW	33% and 30% increase at 5 vol% for ∅10 × 40 and ∅15, respectively
Xie et al. [21,25]	SiC	∅26, 600	water, EG	15.8% increase at 4.2 vol% for ∅26 SiC–H ₂ O and 22.9% at 4 vol% for ∅600 SiC–H ₂ O
Choi et al. [32]	MWNTs	∅25 × 50 μm	oil	exceed 250% at 1.0 vol%
Biercuk et al. [34]	SWNTs	∅3–30	epoxy	125% at 1.0 wt%
Xie et al. [33]	TCNTs	∅15 × 30 μm	DW, EG, DE	19.6%, 12.7%, and 7.0% increase at 1.0 vol% for TCNT/DE, EG, and DW, respectively
Choi et al. [36]	SWNTs	∅20–30 × 200	epoxy	300% at 3 wt% SWNT loading
Wen and Ding [37]	CNTs	∅20–60 × ~ 10 μm	water	23.7% and 31% increase at 0.84% CNT concentration for 20 °C and 45 °C, respectively
Assael et al. [39–41]	MWNTs, DWNTs	∅130 × 10 μm	water	34% increase for 0.6 vol% suspension
Liu et al. [42]	CNTs	∅20–30	EG, EO	12.4% for EG at 1 vol%, 30% for EO at 2 vol%

Note: EG: ethylene glycol; PO: pump oil; EO: engine oil; DW: deionized water; DE: decene.

III.3 Model Teoritis Konduktivitas Termal Nanofluida

Nanofluida adalah gabungan yang mengandung fluida dasar *kontinu*—yang disebut matrix dan komponen padat *diskontinu*, disebut partikel. Karakteristik (properties) nanofluida sangat tergantung dengan struktur mikronya, seperti karakter komponen penyusun, konsentrasi volume komponen, dimensi partikel, geometri partikel, distribusi partikel, dan hubungan matrix-partikel yang terbentuk [18]. Jika kita tidak mengetahui detail struktur mikro penyusun nanofluida, maka akan sangat sulit untuk menentukan properties efektif nanofluida. Untuk mengatasi hal ini digunakan pendekatan batas atas dan bawah properties nanofluida—yang didasarkan pada sebagian informasi statistik dari sample dalam bentuk fungsi korelasi.

III.3.1 Aturan Campuran Sederhana

Tanpa data dimensi partikel, geometri, distribusi, dan gerakan partikel dalam perhitungan, maka nilai konduktivitas k_e suatu campuran yang mengandung fluida dasar *matrix* dan partikel solid tersuspensi bergantung pada konduktivitas

termal matrix k_m , konduktivitas termal partikel k_p , dan volume konsentrasi partikel v_p . Secara umum hubungan ini dapat diformulasikan sebagai berikut [18]:

$$k_e = f(k_m, k_p, v_p) \dots \dots \dots (III. 5)$$

Persamaan di atas menunjukkan dengan jelas bahwa nilai konduktivitas termal bisa bervariasi dalam karena faktor v_p (skala 0-1).

III.3.2. Pendekatan Maxwell

Maxwell [1873] menggunakan pendekatan suspensi partikel bulat (sphere) yang diberi tambahan air (diluted) dengan mengabaikan interaksi antar partikel. Untuk campuran yang mengandung partikel *sphere* identik dengan radius r_p dalam temperatur sekitar T dan gradient temperatur G, maka persamaan untuk kondisi *steady-state* adalah persamaan Laplace:

$$\nabla^2 T(r) = 0 \dots \dots \dots (III. 6)$$

Kemudian dengan melakukan derivasi terhadap persamaan ini, akan didapat persamaan berikut untuk melihat nilai konduktivitas campuran [18]:

$$k_e = k_m + 3v_p \frac{k_p - k_m}{2k_m + k_p - v_p(k_p - k_m)} k_m \dots \dots \dots (III. 7)$$

Catatan: Persamaan Maxwell hanyalah pendekatan *1st order* dan hanya diaplikasikan pada campuran dengan konsentrasi volume partikel yang rendah.

III.3.3 Distribusi Partikel

Sudah banyak diketahui bahwa konsentrasi volume partikel, sendiri, tidak dapat digunakan untuk mendapatkan model konduktivitas yang memuaskan. Banyak penelitian dilakukan untuk mencari pengaruh distribusi partikel terhadap nilai konduktivitas dari suatu campuran, diantaranya adalah distribusi normal (regular) dan distribusi acak (random), dan distribusi campuran.

III.3.4 Geometri Partikel

Geometri partikel mempunyai peran penting untuk menentukan konduktivitas termal campuran (*mixture*). Normalnya, partikel dengan bentuk lonjong/pipih (*elongated*) mempunyai kemampuan kontak/interaksi yang lebih mudah dengan partikel lain dibanding dengan partikel bentuk bundar (*sphere*). Dengan kata lain, *elongated particle* dapat membentuk hubungan *kontinu* yang lebih panjang yang berujung pada peningkatan transfer panas, jika konduktivitas partikel lebih tinggi dibanding dengan matrix.

1. Faktor Depolarisasi (Depolarization Factor)

Pemilihan partikel bentuk ellips dalam percobaan dikarenakan oleh sifat perubahan geometri dari partikel ini dianggap menggambarkan kebiasaan umum yang terjadi dari partikel bentuk lainnya (ellips dapat merepresentasikan bentuk lainnya dalam analisa).

2. Persamaan Fricke.

Untuk partikel ellips dengan distribusi acak, Fricke [1924] menurunkan sebuah persamaan dengan asumsi bahwa partikel ellips tersebut dikelilingi dengan matrix yang mempunyai konduktivitas k_m .

Untuk long, *tin needles*, persamaan Fricke-nya adalah [18]:

$$k_e = k_m + \frac{1}{3} v_p \frac{5k_m + k_p}{k_m + k_p} (k_p - k_m) \dots \dots \dots (III. 8)$$

Dengan mempertimbangkan keterlibatan karbon nanotubes dengan $d_{pa}=0$, $d_{pb}=d_{pc}=1/2$ dan dengan asumsi kalau $k_p \gg k_m$, Nan.et al [2003] pada [18] mendapatkan pendekatan terhadap persamaan Fricke sebagai berikut:

$$k_e = \frac{3 + v_p \left(\frac{k_p}{k_m}\right)}{3 - 2v_p} k_m \dots \dots \dots (III. 9)$$

III.3.5 Pengaruh Interaksi Partikel dan Matrix

Karena pengaruh lapisan partikel, fenomena antar partikel, agent penstabil, zat penyerap, efek permukaan, maka model untuk partikel-matrix yang lebih kompleks haruslah melibatkan tiga komponen—dengan melibatkan shell (selubung). Sudah diketahui bahwa dimensi partikel berbanding terbalik dengan luas permukaan/rasio volume. Karena luas permukaan menentukan pertemuan (interfacial) antara partikel dan matrix, maka dapat diharapkan kalau segala pengaruh pada karakter campuran yang disebabkan oleh *interfacial shell* harus mempunyai hubungan dengan dimensi partikel.

III.3.6 Interfacial Thermal Resistance

Interfacial thermal resistance muncul meskipun pada *interface* (hubungan) ideal antara komponen berbeda pada suatu campuran. Fenomena ini, *interfacial thermal resistance*, lebih dikenal sebagai *Kapitza resistance*. Efek ini mempunyai pengaruh penting dalam konduktivitas termal campuran. *Interfacial thermal resistance* adalah partikel shell khusus yang mempunyai 0 (nol) konsentrasi volume, dan efeknya dapat dilihat sebagai pengurangan nilai konduktivitas termal pada campuran partikel-matrix [18]. Dengan hadirnya fenomena ini, maka konduktivitas campuran didefinisikan menurut *Tanaka theory* [1973]:

$$k_e = k_m + 3v_p \frac{k_p^R - k_m}{2k_m + k_p^R - v_p(k_p^R - k_m)} k_m \dots \dots \dots (III. 10)$$

Yang merupakan persamaan Maxwell dengan mengganti nilai k_p dengan $K_p^R = k_p / (1 + Rk_p/r_p)$. dengan r_p : radius *sphere* partikel dan *interfacial thermal resistance*.

III.4 Model Dinamik Konduktivitas Thermal Nanofluida

Sebagian besar model klasik konduktivitas termal suspensi padat-cair didasarkan pada satu asumsi dasar: perpindahan panas pada setiap fase didapatkan dengan persamaan *diffuse*. Sebagai hasilnya, model klasik seperti model Fourier hanya cukup untuk menjelaskan konduktivitas termal efektif dari suspensi konvensional dengan skala mili-micro meter. Tapi mereka gagal untuk menjelaskan fenomena perpindahan baru pada nanofluida, seperti konduktivitas termal yang sangat tinggi pada konsentrasi volume nanofluida yang rendah.

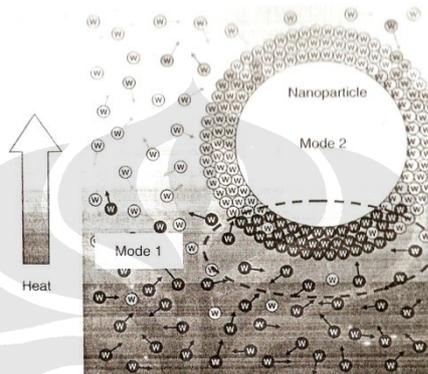
Xuan dan Li [2000] pada [18] merekomendasikan beberapa mekanisme yang mungkin untuk meningkatkan konduktivitas termal nanofluida: meningkatkan *surface area* nanofluida, tumbukan antar partikel, dan *disperse* nano partikel. Beberapa tahun kemudian, Keblinski [2002] pada [18] mengajukan beberapa mekanisme mikroskopik untuk meningkatkan konduktivitas termal nanofluida: gerak Brown partikel, lapisan molekul cairan pada pertemuan (*interface*) matrix/cairan-partikel, konduksi balistik pada nanofluida, dan kelompok-kelompok (*clustering*) nano partikel. Nano partikel pada nanofluida berada pada kondisi gerak termal yang bebas. Oleh karena itu, nanofluida adalah sistem dinamik dan konduktivitas termal nanofluida tidak hanya tergantung pada struktur *nano suspense* tetapi juga dinamika nano partikel pada cairan/matrix.

Gerak Brown nano partikel dipertimbangkan sebagai mekanisme yang paling mungkin pada awal pengembangan model nanofluida. Tetapi, Wang et.al [1999], dan Keblinski et.al [2002] pada [18] menunjukkan bahwa gerak Brown tidak memberikan pengaruh signifikan dalam perpindahan energi (*transport energy*) pada nanofluida. Namun, perlu dicermati bahwa mekanisme gerak Brown yang diamati oleh peneliti tersebut adalah konduksi panas melalui tumbukan partikel karena gerak Brown di nano partikel.

Beberapa model dinamik yang berhubungan dengan pengaruh gerak Brown pada peningkatan konduktivitas termal nanofluida, dikembangkan berujung pada hubungan konduktivitas termal nanofluida dengan temperatur dan dimensi partikel. Faktanya, satu kunci yang digunakan dalam model dinamik

adalah nano-konveksi yang disebabkan oleh partikel nano penting dalam peningkatan *transport* energi pada nanofluida.

Jang dan Choi [2004] pada [18] mengembangkan untuk pertama kali model dinamik yang melibatkan konveksi yang diakibatkan oleh gerak Brown. Meraka menurunkan model umum untuk konduktivitas termal nanofluida yang melibatkan 4 mode transport energi.

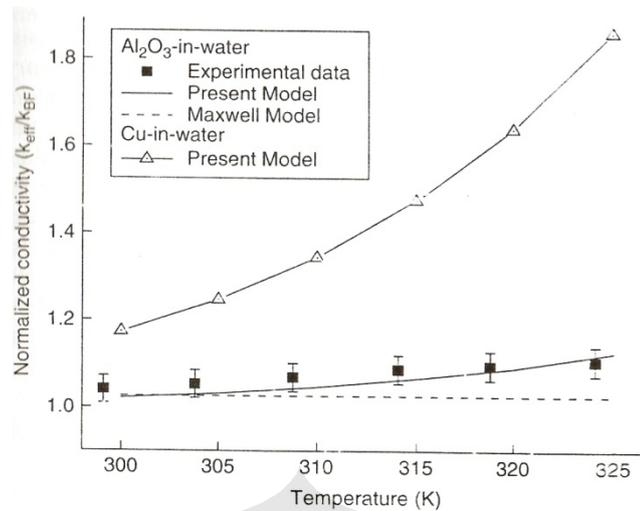


Gambar III.5 Model Energy Transport Nanofluida

Pertama, *collision* (tumbukan) antar molekul fluida dasar. Kedua, *thermal diffusion* (diffusion thermal) pada nano partikel dalam fluida. Ketiga, tumbukan (*collision*) antar nano partikel karena gerak Brown—yang dapat diabaikan karena *Brownian diffusion* nano partikel adalah proses yang sangat lambat dibanding dengan *thermal diffusion* [Kebllinski et al.2002] pada [18]. Terakhir, interaksi termal nano partikel yang bergerak dengan fluida dasar. Model ini saat ini dikenal sebagai kunci dari hubungan konduktivitas nanofluida terhadap temperatur dan dimensi. Konduktivitas termal efektif :

$$k_{eff} = k_{Bf}(1 - f) + k_{nano} f + 3C_1 \frac{d_{Bf}}{d_{nano}} k_{Bf} Re_{d_{nano}}^2 Pr f \dots \dots (III. 11)$$

Dengan k_{Bf} , f , k_{nano} , C_1 , d_{Bf} , d_{nano} , dan Pr adalah konduktivitas fluida, fraksi volume nano partikel, konduktivitas termal nano partikel (termasuk tahanan termal pertemuan), konstanta empiric, diameter molekul fluida dasar, dan diameter nano partikel, dan $Re_{d_{nano}}$ adalah bilangan Reynold.



Gambar III.6 Ketergantungan Konduktivitas Termal Nanofluida terhadap Temperatur [18].

Gambar di atas menunjukkan bahwa model prediksi yang sekarang (garis solid) dapat menggambarkan hubungan konduktivitas terhadap temperatur dari Al₂O₃ dengan fluida air. Sedangkan model konvensional—seperti persamaan Maxwell—gagal menggambarkan ketergantungan konduktivitas terhadap temperatur. Selain itu, mereka juga menunjukkan bahwa konveksi sesaat dan lokal karena gerak Brown nano partikel adalah kunci mekanisme nano yang sangat mempengaruhi konduktivitas termal nanofluida.

III.5 Konveksi pada Nanofluida

Ketertarikan umum terhadap penggunaan nanofluida, dari sudut pandang teknik, adalah penggunaan nanofluida dalam proses pendinginan (cooling fluid) pada awalnya. Meskipun konduktivitas yang lebih tinggi didapatkan, bukan berarti telah membuktikan kemampuan (*performance*) fluida ini. Untuk itu, dibutuhkan bukti kemampuan nanofluida pada kondisi konveksi (lingkungan dengan fenomena konveksi).

Konveksi, adalah salah satu jenis perpindahan kalor dimana transfer panas dari *solid wall* dipengaruhi oleh aliran fluida yang menyentuh dinding. Perpindahan kalor juga dapat terjadi sebaliknya (dari fluida ke dinding). Konveksi terbagi menjadi 2: Konveksi natural (*natural convection*) dan konveksi paksa

(*forced convection*). Konveksi natural terjadi ketika konveksi hanya dipengaruhi oleh gaya *Buoyancy* selama proses pemanasan atau pendinginan. Konveksi paksa terjadi ketika fluida ‘dibuat bergerak’ oleh gaya luar seperti pompa, fan, kompressor. Ketika kita memanaskan fluida didalam container, kita melihat gerakan fluida sebelum mendidih—fenomena ini didasari oleh gaya *Buoyancy*.

Konveksi mengikuti *Newton’s Law cooling* :

$$Q = hA(T_w - T_f) \dots \dots \dots (III. 12)$$

Dengan Q: jumlah kalor yang ditransfer antara dinding dan fluida (dalam keadaan bergerak), A luas kontak area pertemuan dinding-fluida (solid-liquid), T_w temperature dinding (wall temperature), T_f temperatur fluida (bulk fluid)—yang merupakan temperatur yang jauh dari dinding. Persamaan di atas dapat ditulis dalam bentuk fluks :

$$q = \frac{Q}{A} = h(T_w - T_f) \dots \dots \dots (III. 13)$$

h: koefisien perpindahan kalor (heat transfer coefficient), $W/m^2.K$. Nilainya tidak pernah konstan, tetapi tergantung pada karakter fluida, geometry aliran, jenis aliran (turbulent/laminar), kecepatan aliran, serta kondisi lingkungan perpindahan panas berlangsung.

Investigasi pertama nanofluida pada aliran konveksi paksa dilakukan oleh Pak dan Cho [1998] pada [18] . Mereka menggunakan suspensi (*suspense*) dengan ukuran 27 nm. Mereka menemukan kenaikan koefisien perpindahan kalor (*heat transfer coefficient*) pada aliran turbulen. Kenaikan kecepatan yang terjadi akan dibarengi dengan kenaikan *frictional pressure-drop*. Ini berarti bahwa meskipun terjadi kenaikan koefisien perpindahan kalor pada nanofluida, tapi fenomena *pressure-drop* (jatuh tekan) menjadi sangat penting.

Pak dan Cho mengklaim bahwa untuk kecepatan rata-rata aliran yang tetap, terjadi penurunan *heat transfer coefficient* sampai dengan 12%. Temuan ini sangat berbeda dengan investigasi Xuan dan Li [2003] pada [18] yang justru menemukan fenomena sebaliknya; pada kecepatan fluida yang konstan, terjadi kenaikan *heat transfer coefficient* sampai 40%. Xuan dan Li menggunakan partikel tembaga (Cu) murni dengan dimensi 100nm. Mereka menunjukkan bahwa persamaan Dittus-Boetler dengan properties nanofluida yang dimodifikasi belum dapat menggambarkan konveksi pada nanofluida. Dengan kata lain,

nanofluida tidak dapat diperlakukan sebagai fluida tunggal hanya dengan mengganti properties-nya dengan property efektif-nya. Dalam konveksi nanofluida, ada beberapa efek tambahan yang berbeda, seperti gravitasi, gaya Brownian, drag pada partikel, dan diffusion. Perbedaan nilai yang didapat antara *Dittus-Boetler* dan konveksi pada nanofluida mencapai 39% dengan 2% Cu.

Investigasi konveksi pada nanofluida yang cukup penting selanjutnya dilakukan oleh Wen dan Ding [2004] pada [18]. Mereka yang pertama mengobservasi efek dari *entry-length*. Mereka melakukan pengukuran *local heat transfer coefficient* sepanjang pipa dengan mode aliran laminar. Nanofluida yang digunakan adalah air- γ Al_2O_3 yang mengalir pada pipa tembaga 4.5 mm diameter dan 970 mm panjang. Fakta paling menarik yang mereka temukan adalah kenaikan *heat transfer coefficient* jauh lebih besar terjadi pada daerah *entry-length* (*entry-length region*) dan juga kenaikan konsentrasi partikel. Dalam penelitian ini mereka juga menunjukkan kegagalan teori Shah [1975] untuk konveksi pada nanofluida; perbedaan hasil perhitungan dan hasil percobaan cukup signifikan. Selain itu, mereka juga menemukan bahwa *entry-length* nanofluida lebih panjang dibanding dengan fluida dasar. Hasil yang mereka dapatkan didasarkan pada beberapa kesimpulan yang mereka ambil (yang belum terbukti). Mereka mengatakan ada beberapa faktor yang mempengaruhi pada hasil percobaan mereka pada konveksi nanofluida: migrasi partikel, distribusi tidak merata *thermal conductivity* dan *viscosity* yang mungkin untuk mengurangi ketebalan *boundary layer* dan meningkatkan *heat transfer coefficient*.

Sedangkan untuk konveksi alami (*natural convection*) nanofluida, penelitian yang sudah dilakukan sangat sedikit. Penelitian pertama pada bidang ini dilakukan oleh Putra et.al [23]. Menggunakan campuran air- Al_2O_3 131.2 nm dan CuO 87.3 nm, mereka mempelajari konveksi natural pada *horizontal cylindrical cavity* yang diisi dengan nanofluida. Dari percobaan ini dihasilkan kesimpulan bahwa perpindahan kalor dengan konveksi alami pada nanofluida lebih rendah dibanding dengan air murni (*pure water*) dengan kenaikan konsentrasi partikel nano. Degradasai sifat nano fluida lebih cepat terjadi pada CuO-air dibanding dengan Al_2O_3 -air. Terakhir, beberapa penelitian yang diperoleh dari literatur survey dapat dilihat pada tabel di bawah ini [Qi Wang et.al, 2006] pada [18].

Tabel III.4 Resume Penelitian Tentang Konveksi pada Nanofluida.

Investigator	Geometry	Nanofluids	Findings
Forced convective heat transfer:			
Lee and Choi [45]	parallel channels	unspecified	reduction in thermal resistance by a factor of 2 turbulent, large enhancement of heat transfer coef. $Nu_{eff} = c_1(1.0 + c_2\phi^{m_1} Pe_d^{m_2}) Re_{eff}^{m_3} Pr_{eff}^{c_4}$
Xuan and Li [46]	tube ($D = 10, L = 800$ mm),	Cu/water	
Wen and Ding [47]	tube ($D = 4.5, L = 970$ mm)	Al ₂ O ₃ /water (27–56 nm)	laminar, enhancement increases with Reynolds number and particle concentration
Chien et al. [49]	disk-shaped heat pipe ($D = 9, H = 2$ mm)	Au/water (17 nm)	significant reduction of thermal resistance
Tsai et al. [50]	heat pipe ($D = 6, L = 170$ mm)	Au/water (2–35, 15–75 nm)	high potential to take place conventional fluids in heat pipe applications
Ding et al. [38]	tube ($D = 4.5, L = 970$ mm)	CNT/water	significant enhancement of convective heat transfer, which depends on the flow condition, CNT concentration and the pH level
Pak and Cho [52]	tube	Al ₂ O ₃ (13 nm), TiO ₂ (27 nm)/water	h with $\phi = 0.03$ vol% was 12% lower than that of pure water for a given average fluid velocity
Yang et al. [53]	tube ($D = 4.57, L = 457$ mm)	graphite nanofluid	the enhancement of h is lower than the increase of the effective thermal conductivity
Heris et al. [48]	annular tube ($D_{in} = 1$ mm, $D_{out} = 32$ mm, $L = 1$ m)	Al ₂ O ₃ (20 nm), CuO (50–60 nm)/water	enhancement of h with ϕ and Pe . Al ₂ O ₃ showed more enhancement than CuO
Natural convective heat transfer:			
Putra et al. [55]	horizontal cylinder	CuO (87.3 nm), Al ₂ O ₃ (131.2 nm)/water	a systematic and significant deterioration in natural convective heat transfer
Wen and Ding [56]	two horizontal discs ($H = 10, D = 240$ mm)	TiO ₂ /water (30–40 nm)	deterioration increases with particle concentrations