

BAB II

TEORI PEMOTONGAN LOGAM DAN PENGUKURAN KEKASARAN PERMUKAAN

2.1 Teori Pemotongan Logam

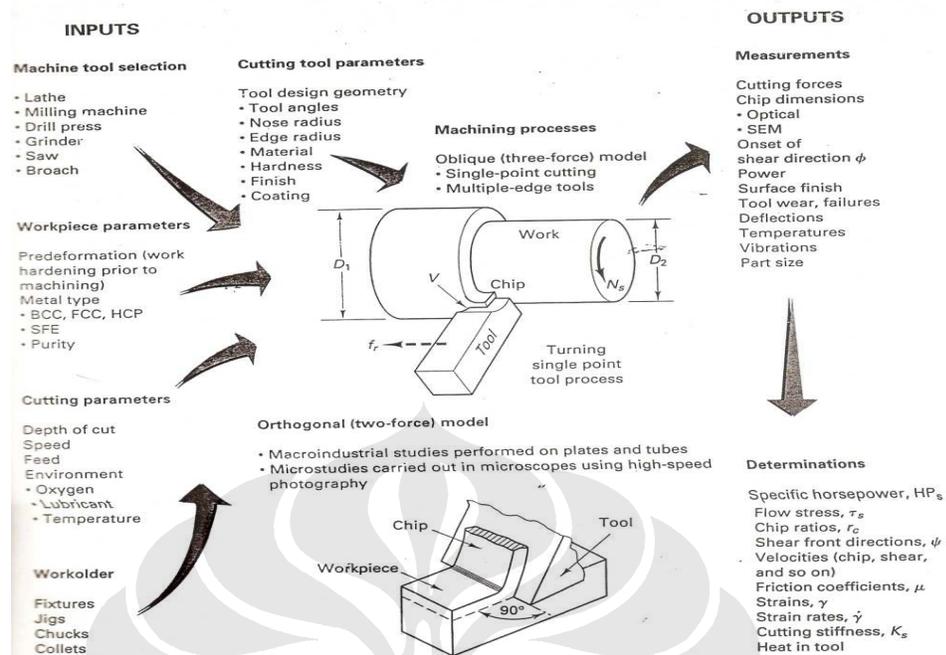
Kebutuhan akan produk hasil pemesinan dengan kualitas permukaan yang baik merupakan salah satu pemicu semakin berkembangnya metode-metode baru dalam teknologi pemotongan logam—salah satu bentuk perkembangan yang dapat dengan mudah kita jumpai ialah modifikasi alat-alat pemesinan—seperti pengembangan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

Proses pemotongan logam pada dasarnya merupakan proses pelepasan material yang tidak diinginkan dari sebuah benda kerja dalam bentuk *chips* atau geram. Proses ini merupakan dasar industri manufaktur, dan salah satu bukti penting 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* [Paul de Garmo, 2002].

Proses pemotongan logam merupakan proses yang kompleks dikarenakan proses ini membutuhkan variasi *input* yang 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 II.1 di bawah ini:



Gambar 2.1 Dasar input dan output pada proses pemesinan
[Paul deGarmo, 2002]

2.2 Proses Turning

Salah satu proses pemotongan logam yang umum digunakan dalam dunia manufaktur ialah proses *turning*. Proses *turning* merupakan kombinasi dari dua gerakan yaitu rotasi *workpiece* yang diputar pada *spindle* dan gerakan horizontal yang merupakan gerakan pemakanan oleh mata pahat. Namun dalam beberapa aplikasi, *workpiece* dapat diatur sebagai benda yang diam (*part stationer*) dengan *tool* yang berputar disekelilingnya untuk melakukan proses pemakanan. Gerakan pemakanan dari mata pahat dapat terjadi sepanjang sumbu benda kerja. Gerakan (pemakanan) ini pada benda berbentuk silinder menyebabkan diameter benda kerja semakin berkurang.

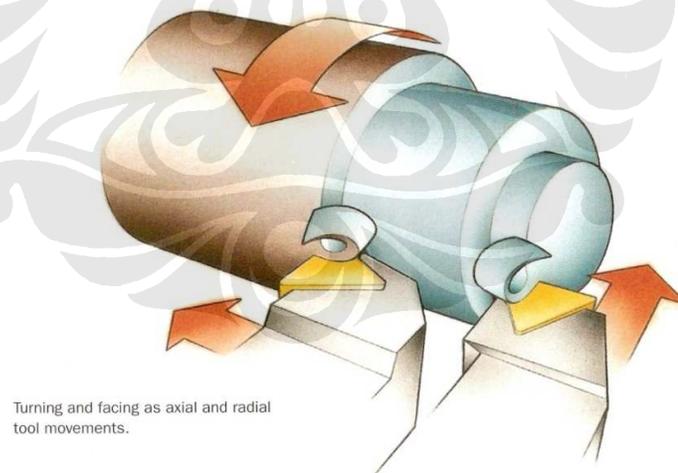
2.2.1 Metode-metode Pada Proses *Turning*

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

a. *Exsternal turning* Berdasarkan letak *cutting tools* dan proses pemesinan, *exsternal turning* merupakan proses pemotongan material pada sisi-sisi terluar permukaan material kerja. Beberapa contoh dari *exsternal turning* diantaranya :

- *General turning (Straight turning)*: pemotongan dilakukan secara langsung sepanjang sumbu (*axis*) 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* benda kerja yang berputar. Proses *facing* dapat menghasilkan bentuk permukaan yang datar (*flat*).

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



Gambar 2.2 Proses Sraight turning dan facing
[Sandvik Technical Guide, 2005]

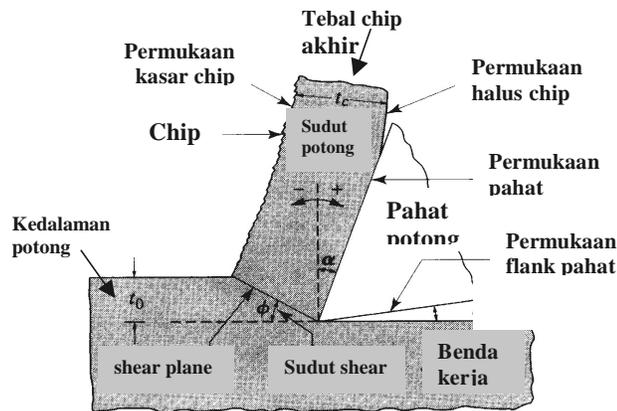
b. **Internal turning** Contoh dari *internal turning* ialah pemesinan *boring*, yaitu pemotongan logam yang dilakukan pada bagian *centerline* benda kerja sehingga dapat menghasilkan sebuah lubang atau *hole* pada bagian tengah benda kerja. Pada proses *boring* ini, pemilihan mata pahat sangat bergantung pada diameter dan panjang lubang yang akan dibuat. Proses *boring* dapat kita lihat pada gambar 2.3 dibawah ini :



Gambar 2.3 Proses internal turning
[Sandvik technical guide, 2005]

2.2.2 Terminologi pada Proses *Turning*

Secara garis besar, pelepasan material pada proses pemesinan terjadi karena adanya gaya potong (*cutting force*) yang ditimbulkan pahat potong terhadap benda kerja (material kerja). Gaya potong ini timbul karena pergerakan desakan relatif' pahat potong terhadap benda kerja, seperti terlihat pada gambar 2.4. Material (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) [Groover, M.P., 1999][Merchant, M.E., 1945].



Gambar 2.4 Ilustrasi proses pemotongan
[Gandjar K, 2005] yang merujuk pada [Kalpakjian, 2001]

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

- *Cutting speed* (V_c)

Cutting speed yang umum dinyatakan dalam meter/menit (m/min) ialah kecepatan relatif mata pahat dengan benda kerja saat proses pemesinan berlangsung. Kecepatan potong ini bergantung pada kecepatan putar *spindle* (n) dan diameter (D) benda uji dalam satuan mm. Besarnya *cutting speed* dinyatakan sebagai:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2.1)$$

- *Spindle speed* (n)

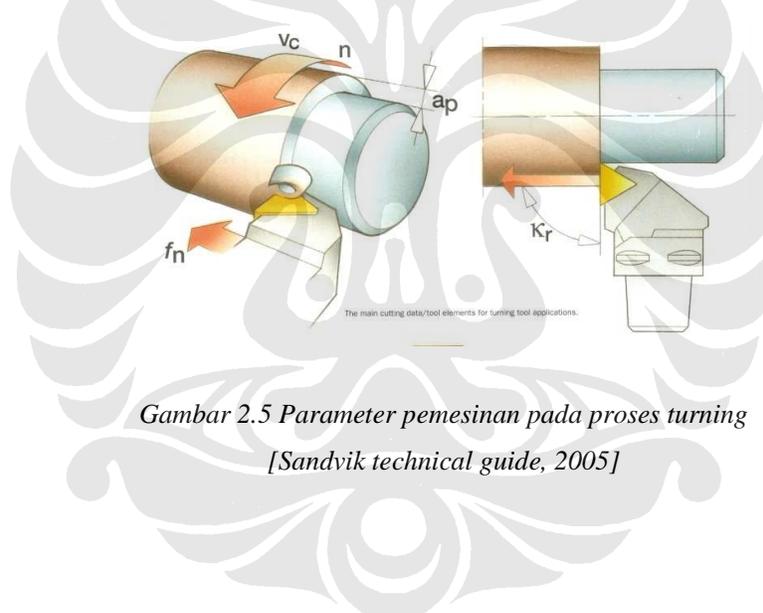
Merupakan terminologi yang menyatakan besaran kecepatan putaran dari *spindle* mesin dengan satuan *revolution per minute* (rpm).

- *Feed* (f_n)

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

- *Cutting depth* (a_p)
Cutting depth, dengan satuan mm, merupakan perbedaan antara bagian permukaan benda kerja yang terpotong dan yang tidak. 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 mempengaruhi pembentukan *chips*.

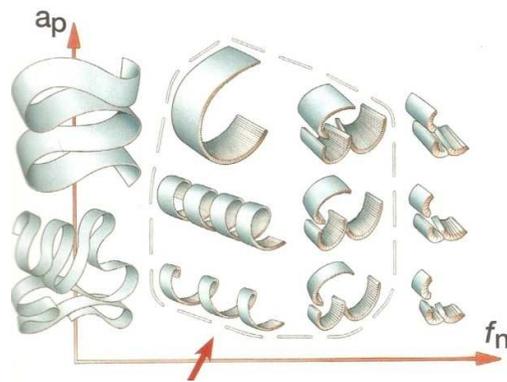
Visualisasi parameter diatas dapat kita lihat pada gambar 2.5 dibawah ini :



Gambar 2.5 Parameter pemesinan pada proses turning
[Sandyik technical guide, 2005]

2.2.3 Pembentukan *Chips*

Setiap proses pemotongan logam pasti menghasilkan geram atau *chips*—yang merupakan bagian benda kerja yang terbuang—akibat gesekan pemakanan mata pahat pada material. Faktor yang mempengaruhi pembentukan *chips* antara lain: *depth of cut* pemakanan, *entering angle* dan *nose radius* 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:

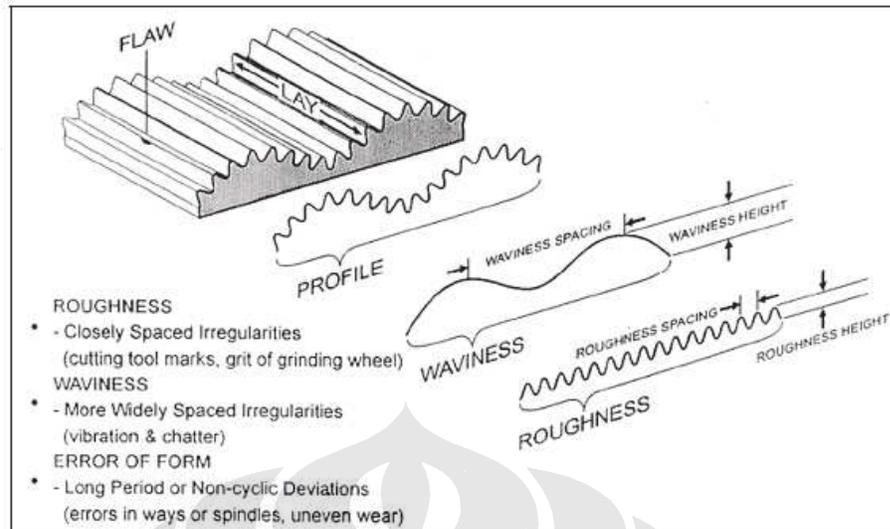


Gambar 2.6 Pengaruh feed dan depth of cut pada pembentukan chips
[Sandvik technical guide, 2005]

2.3 Terminologi Profil Permukaan

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

1. *Error of form* (ketidakteraturan berupa kesalahan bentuk). Ketidakteraturan ini 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*: ketidakteraturan yang terdiri atas lembah dan puncak pada daerah rapat (*closely-spaced*) yang melapisi kedua tipe sebelumnya, seperti terlihat pada gambar 2.7 berikut:



Gambar 2.7 Profil irregularities permukaan

[B.C Macdonald & Co, 2007]

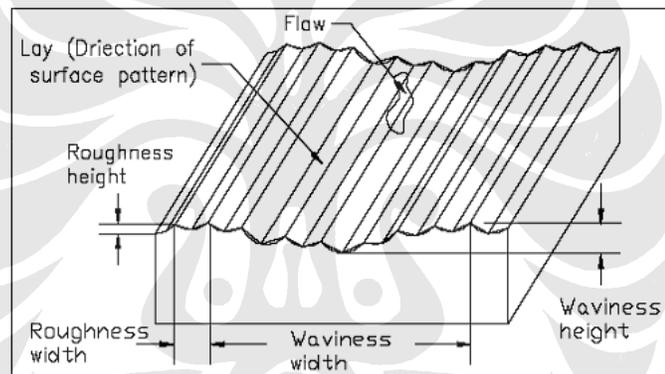
Dalam praktek, penentuan daerah *closely-spaced* dicapai dengan membuat pengukuran di atas jarak batas yang ditunjuk sebagai *cut-off length*. Panjang ini harus dipilih sedemikian rupa meliputi sejumlah ketidakrataan secara rata-rata. Jelas bahwa, *cut-off length* yang cocok penting bagi pengukuran benda hasil pemesian *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; 0.003", 0.01", 0.1" atau 0.25, 0.8, 2.5 mm. Ketika nilai tertentu dari *cut-off* dipilih, berarti instrumen tidak akan bereaksi terhadap *irregularities* dengan panjang gelombang yang lebih besar dari harga tersebut [Zulhendri, 2006].

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 acak 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 berasimilasi dengan penyimpangan struktural yang digolongkan sebagai *error of form* (kesalahan bentuk).
- *Roughness* (kekasaran): terdiri dari ketidak teraturan yang sangat halus tekstur permukaan; pada umumnya mencakup ketidak teraturan yang diakibatkan tindakan 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 *sample roughness*.



Gambar 2.8. Profil tekstur permukaan
[B.C Macdonald & Co, 2007]

- *Waviness height*: Tinggi gelombang adalah jarak puncak ke lembah yang dinilai dalam *inchi* atau mili meter.
- *Waviness width* (lebar gelombang), adalah jarak puncak ke puncak berikutnya atau jarak lembah ke lembah berikutnya, yang dinilai dalam *inchi* 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 diinginkan pada topografi khusus 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*.

2.4 Topografi Permukaan dan Besar *Cut-off*

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

- *Roughness average* (R_a)

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

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Y(X)| \quad (2.2)$$

Dimana:

R_a = penyimpangan rata-rata aritmatik dari garis tengah,

L = panjang *sampling*,

Y = ordinat kurva profil

- *Root-mean-square* (rms)

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

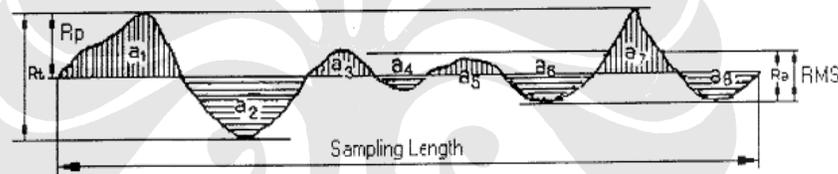
$$R_a = RMS = \sqrt{\left[\frac{1}{L} \int_0^L [(y(x) - y_{avg})]^2 dx \right]} \quad (2.3)$$

- 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*.

$$R_t = y_{max} - y_{min} \quad (2.4)$$

Pada persamaan (2.3) diatas, nilai y_{avg} adalah nilai rata-rata dalam arah vertikal. Kemudian $y(x) - y_{avg}$ 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*) 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 2.9 Ilustrasi profil permukaan
[B.C Macdonald & Co, 2007]

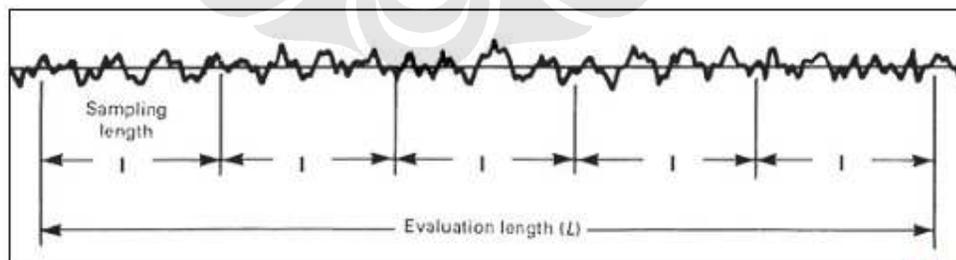
Dalam menentukan panjang *cut-off* yang akan digunakan, kita harus memperhatikan proses *finishing* permukaan yang akan diukur. Mesin yang mempunyai kemampuan pemakanan yang cukup lebar seperti mesin sekrup memerlukan nilai *cut-off* yang lebih panjang dibandingkan mesin yang mempunyai kecenderungan 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 *cut-off* untuk berbagai proses pemesinan. Jumlah *cut-off* sebagai panjang sampel pengukuran dalam panjang pengukuran adalah sebanyak 5 buah sehingga untuk *cut-off* 0.8, panjang pengukurannya adalah 4 mm seperti dapat dilihat pada gambar 2.10. Sedangkan jumlah puncak yang disarankan yang

terdapat dalam satu *cut-off* adalah sebanyak 10-15 *peaks*, seperti terlihat pada gambar 2.9

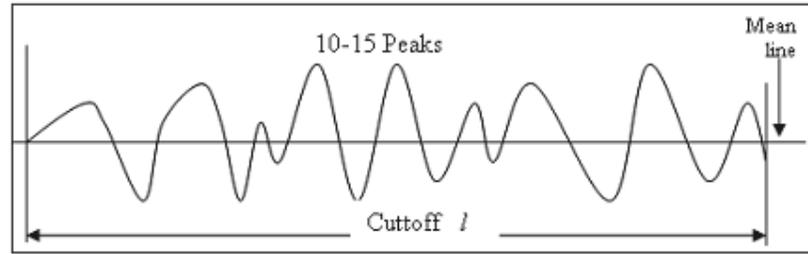
Tabel 2. 1 Nilai *cut-off* untuk beberapa proses pemesinan

| 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"



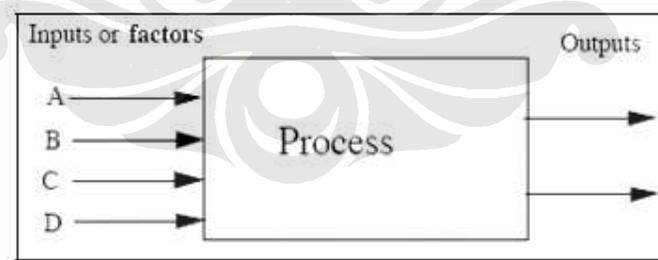
Gambar 2.10 Jumlah *cut-off* (sampel) dalam panjang pengukuran
[B.C Macdonald & Co2007]



Gambar 2.11 Jumlah puncak dalam cut-off
[B.C Macdonald & Co2007]

2.5 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 desain percobaan itu sendiri yang merupakan prosedur dalam memperoleh data [Douglas Montgomery, 1997].



Gambar 2.12 Pengertian percobaan
[Douglas Montgomery, 1997]

Sebelum suatu percobaan dilakukan, pendekatan ilmiah untuk perencanaan percobaan perlu dipertimbangkan. Untuk mendapatkan kesimpulan yang *valid* dan *objektif* dari data, diperlukan pendekatan statistik. Oleh karena itu ada dua aspek

yang harus dipertimbangkan dalam suatu percobaan, yaitu desain percobaan dan analisa data statistik.

Ada dua prinsip dasar percobaan yaitu perulangan (*replication*) dan randomisasi (*randomization*) [Douglas C. Montgomery, 1997]. 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 [harinaldi, 2004]:

$$\sigma_y^2 = \frac{\sigma^2}{n} \quad (2.5)$$

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

Tabel 2.2. 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"

Dalam menggunakan pendekatan statistik untuk merancang dan menganalisa percobaan, perlu didefinisikan permasalahan apa yang 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 2.2.

2.6 Eksperimen Faktorial

Eksperimen faktorial merupakan struktur percobaan yang sangat fundamental untuk percobaan dengan banyak 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 $2k$.

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.

2.7 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 membaaur (*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:

1. Sistem yang dihasilkan didominasi oleh parameter utama yang berpengaruh terhadap output sehingga memungkinkan untuk meminimasi order interaksi.

2. Ada beberapa lots parameter atau faktor, tetapi semua merupakan parameter penting.
3. Setiap fraksional faktorial mengandung *full factorial* dengan jumlah yang sedikit.
4. Dapat dilakukan penambahan kombinasi perlakuan (runs) untuk memudahkan interpretasi hasil.
5. Kemudahan dalam analisa data percobaan dengan bantuan komputer.

2.8 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 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 :

$$A = \frac{1}{2} \{(a_2b_1 - a_1b_1) + (a_2b_2 - a_1b_1)\} \quad (2.6)$$

$$B = \frac{1}{2} \{(a_1b_2 - a_1b_1) + (a_2b_2 - a_2b_1)\} \quad (2.7)$$

Tabel 2.3. 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 |

[Montgomery]

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:

$$AB = \frac{1}{2} \{ (a_2b_2 - a_2b_1) + (a_1b_2 - a_1b_1) \} \quad (2.8)$$

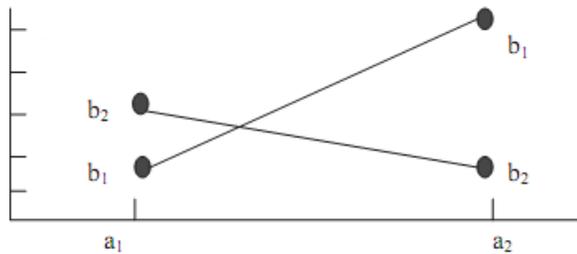
Jika $AB = 0$ maka dikatakan tidak ada interaksi antara faktor A dan B.

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 b_1 dan b_2 mendekati paralel, ini menunjukkan ketiadaan interaksi (*lack of interaction*) antara faktor A dan B



Gambar 2.13 Eksperimen Faktorial tanpa interaksi

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



Gambar 2.14 Eksperimen Faktorial dengan interaksi

2.9 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 [Douglas Montgomery, 1997].

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 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 rata-rata kuadrat perlakuan dengan rata-rata 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* [Douglas Montgomery, 1997]. *Sum of square* (SS), menyatakan kuadrat skor simpangan yang dirumuskan sebagai:

$$SS = \sum (X_1 - \bar{X})^2 \quad (2.9)$$

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 groups*, MS_B) dengan rata-rata kuadrat dalam

kelompok (*mean square within group*, MS_w) inilah yang disebut sebagai rata-rata kuadrat galat (nilai F). Nilai ini menunjukkan ada atau tidaknya perbedaan yang berarti dalam pengamatan.

$$MS_B = \frac{SS_B}{k(n-1)} \quad (2.10)$$

$$MS_W = \frac{SS_W}{(k-1)} \quad (2.11)$$

Dimana:

$$SS_B = \sum_{j=1}^k \frac{[\sum_{i=1}^{n_j} Y_{ij}]^2}{n_j} - \frac{[\sum_{i=1}^N Y_{ij}]^2}{N} \quad (2.12)$$

$$SS_W = \sum_{j=1}^N Y_{ij}^2 - \sum_{j=1}^k \frac{[\sum_{i=1}^{n_j} Y_{ij}]^2}{n_j} \quad (2.13)$$

BAB III

TEORI NANOFLUIDA

Fluida pendingin (*cooling fluid*) mempunyai peran penting dalam proses pemesinan; yakni mempengaruhi temperatur pemesinan, umur pahat dan kualitas hasil pemesinan [Tuholski R.J., 1993]. 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 yang pada suhu tersebut pahat menjadi lunak dan mengalami keausan dengan cepat [Tuholski R.J, 1993]. Selain itu, fluida pendingin juga berfungsi sebagai pelumas (*lubricating system*) kontak pahat potong dan material benda kerja, dan menyingkirkan chips—material benda kerja yang dibuang—pada daerah pemotongan [Aronson R. B., 1994].

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 [Das et.al, 2008]. *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, 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.

3.1 Dasar-dasar Nanofluida

Maxwell [1873] sudah pernah mengajukan ide 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 $1000\text{W}/\text{cm}^2$ [Das et.al, 2008].

3.1.1 Kemunculan Nanofluida

Kemunculan nanofluida didahului oleh berbagai penelitian mikro-struktur dan juga nano teknologi itu sendiri. *Argonner 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* oleh [Choi et.al, 1992] [Das et. al, 2008]. 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 Choi [Matsuda et.al, 1993] di Jepang juga diadakan riset sejenis. Namun nanofluida buatan Matsuda menggunakan *dispersant*; tambahan asam (HCl) atau basa (NaOH) pada untuk menghasilkan nano partikel yang stabil.

3.1.2 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 [Touloukian et. al, 1970]. 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 [Das et.al, 2008]:

Tabel 3.1 Thermal Conductivity beberapa material [Das et.al, 2008]

| | 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 mikro/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, larutan konvensional ini dapat menyebabkan penyumbatan pada *microchannel*. Berikut adalah gambaran perbedaan umum larutan konvensional dan nanofluida [Das et.al, 2008]

Tabel 3.2 Perbedaan kemampuan suspensi micro particle dan nanoparticle [Das et.al, 2008]

| | 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.

3.1.3 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* [Das et.al, 2008] yang merujuk pada [Kimoto, 1963; Granqvist dan Buhrman, 1976; Gleiter, 1989]. Pada *Physical method*, material dipecah dengan menggunakan cara-cara seperti: *Inert-gas condensation* (IGC), *Mechanical Grinding*, dan *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*.

- 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* (CNT). Meskipun sudah dilakukan proses ultra-sound, namun belum ada jaminan kalau kualitas pendispersian telah optimal.

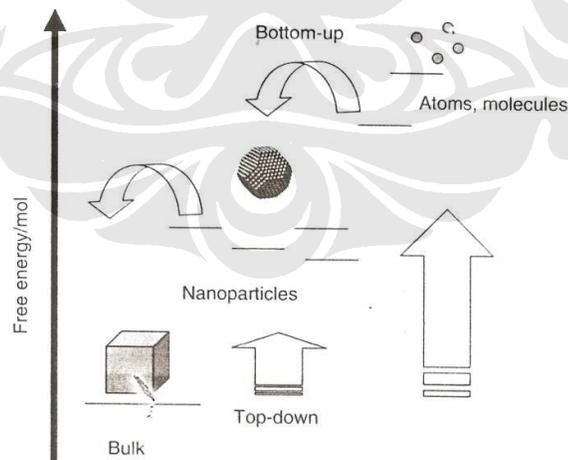
- 1-step: pembuatan nano partikel dan juga proses pendispersian kedalam fluida dilakukan secara bersamaan (*simultan*). Metode ini cocok digunakan untuk nanofluida yang mengandung metal dengan nilai konduktivitas termal (*k*) yang tinggi seperti tembaga, Cu .

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* [Das et.al, 2008] yang merujuk pada [Akoh et.al, 1978].

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.

1. Kestabilan termal

Nano partikel adalah sistem yang *metastable*. Artinya, mereka akan ditransformasikan ke arah material stabil yang mempunyai energi minima 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*.

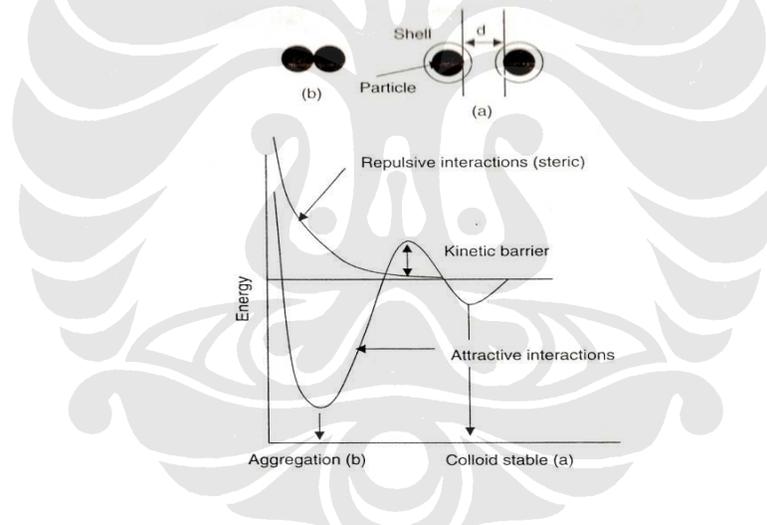


Gambar 3.1 Kemungkinan Transformasi Bentuk NanoPartikel

[Das et.al, 2008]

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.

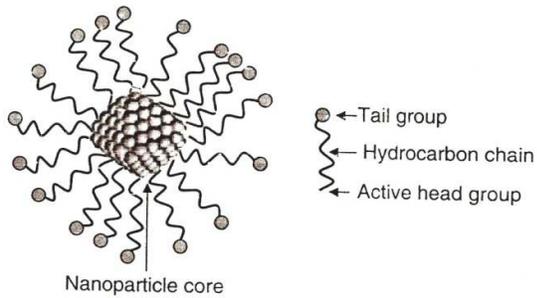


Gambar 3.2 Stabilitas Kinetik Sistem Nanopartikel

[Das et.al, 2008]

2. Kelarutan dalam media pelarut.

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



Gambar 3.3 Skematik Nano Partikel

[Das et.al, 2008

Kemampulan 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 Waals* 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.

3.1.4 Penemuan Percobaan pada Nanofluida

Semenjak ilmu bidang ini ditemukan satu dekade lalu, sudah banyak temuan yang dihasilkan oleh para peneliti di seluruh dunia. Berikut adalah jejak rekam (*milestone*) yang berkaitan dengan sifat termal nanofluida.

3.1.4.1 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) metod*. Metode ini diakui sebagai metode terbaik dalam pengukuran nilai k [Das et. al, 2008] yang merujuk pada [Lee et.al, 1999]. 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*.

- Ada hubungan tidak linear antara konduktivitas termal, k , dengan konsentrasi nano partikel [Das et. al, 2008] yang merujuk pada [Choi et. al, 2001] [Xie et.al, 2003] [Hong et. al, 2005] [Eastman et. al 2001] [Chopkar et. al, 2005]
- Ketergantungan nilai konduktivitas termal yang (sangat) erat dengan temperatur. [Das et. al, 2003] 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.
- Ketergantungan nilai konduktivitas termal terhadap dimensi nano [Chon et. al, 2005] [Chopkar et. al, 2006].

3.1.4.2 Milestone Perpindahan Panas Konveksi pada Nanofluida

Koefisien perpindahan panas (*heat transfer*), h , untuk konveksi paksa (*forced convection*) pada pipa (*tubes*) nilainya tergantung pada 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 [Das et. al, 2008] yang merujuk pada sumber yang disebutkan:

Kenaikan 2-3.5 kali lipat nilai koefisien perpindahan panas konveksi aliran laminar (*laminar heat transfer coefficient*).

[Faulkner et. al, 2004] 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 naikknya bilangan Reynold (*Reynold number*). *Kedua*, nano partikel 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)] juga menemukan hal yang sama dengan menggunakan model *Laminar entry flow nanofluid* dengan suspense air-partikel $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Kenaikan signifikan nilai koefisien perpindahan panas konveksi aliran turbulen (*Turbulent heat transfer coefficient*).

[Xuan dan Li, 2003] adalah pihak yang pertama meneliti hal ini. 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.

Penurunan koefisien perpindahan panas nanofluida heat pada konveksi alami.

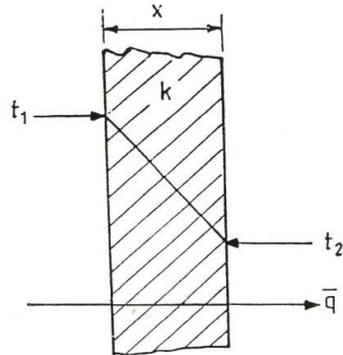
[Putra et. al, 2003] melakukan pengujian pertama konveksi alami dengan nanofluida. Menggunakan air dengan partikel 130-nm Al_2O_3 dan 90-nm CuO partikel, mereka menemukan bahwa koefisien perpindahan panas nanofluida pada konveksi alami lebih rendah dibanding dengan fluida dasar air. Pengurangan nilai h ini sejalan dengan kenaikan konsentrasi partikel pada nanofluida.

3.2 Konduksi Pada Nanofluida

Dalam konduksi, panas ditransfer berdasarkan getaran molekular (*molecular vibration*). Oleh karena itu, konduksi dapat tetap terjadi meskipun medianya dalam kondisi 'istirahat' [Das et. al, 2008]. Dalam *Theorie analytique de la chaleur* dinyatakan bahwa *heat flux* (aliran kalor) pada arah aliran panas (*heat flow*) besarnya proporsional terhadap perbedaan temperatur (*temperature gradient*) pada arah tersebut [Das et. al, 2008] yang merujuk pada [Fourier, 1882].

$$q_x = \frac{Q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

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



Gambar 3.4 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.

1. 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:

$$\frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln \frac{t_2}{t_1} \quad (3.2)$$

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 t_1 dan t_2 adalah T_1 dan T_2 .

2. 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. *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 (Al_2O_3) bentuknya linear.

$$k_{eff} = k_o \frac{k_p + (n - 1)k_o - (n - 1)\varepsilon(k_o - k_p)}{k_p + (n - 1)k_o + \varepsilon(k_o - k_p)} \quad (3.3)$$

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] menemukan bahwa dimensi nano partikel bisa jadi merupakan alasan utama untuk menjelaskan kenaikan konduktivitas termal nanofluida. [Xie et.al, 2002] 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] 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] dalam [Das et. al, 2008] 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:

$$\frac{k_{eff} - k_f}{k_f} = 0.764481\phi + 0.018688867t - 0.42147175 \quad (3.4)$$

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]

*Tabel 3.3 Resume Penelitian Konduktivitas Termal Nanofluida
[Qi Wang et.al, 2006]*

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. [111] | 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.

3.3 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 [Das et. al, 2008]. 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.

3.3.1 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 [Das et.al, 2008]:

$$k_e = f(k_m, k_p, v_p) \quad (3.5)$$

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

3.3.2. 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:

$$\nabla^2 T(r) = 0 \quad (3.6)$$

Kemudian dengan melakukan derivasi terhadap persamaan ini, akan didapat persamaan berikut untuk melihat nilai konduktivitas campuran [Das et. al, 2008]:

$$k_e = k_m + 3v_p \frac{k_p - k_m}{2k_m + k_p - v_p(k_p - k_m)} k_m \quad (3.7)$$

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

3.3.3 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.

3.3.4 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-ny adalah [Das et. al, 2008]:

$$k_e = k_m + \frac{1}{3} v_p \frac{5k_m + k_p}{k_m + k_p} (k_p - k_m) \quad (3.8)$$

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

$$k_e = \frac{3 + v_p \left(\frac{k_p}{k_m}\right)}{3 - 2v_p} k_m \quad (3.9)$$

3.3.5 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.

3.3.6 *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 [Das et. al, 2008]. Dengan hadirnya fenomena ini, maka konduktivitas campuran didefinisikan menurut *Tanaka theory* [1973] dalam [Das et. al, 2008]:

$$k_e = k_m + 3v_p \frac{k_p^R - k_m}{2k_m + k_p^R - v_p(k_p^R - k_m)} k_m \quad (3.10)$$

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* R .

3.4 Model Dinamik Konduktivitas Termal Pada Nanofluida

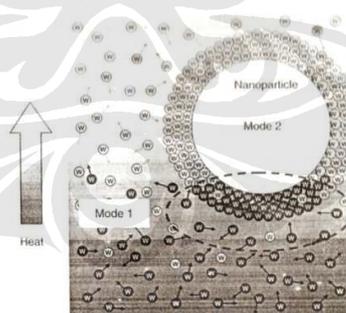
Sebagian besar model klasik konduktivitas termal larutan (suspense) padat-cair didasarkan pada satu asumsi dasar: perpindahan panas pada setiap fase didapatkan dengan persamaan diffuse. Sebagai hasilnya, model klasik seperti model Fourier hanya cukup untuk menjelaskan konduktivitas termal efektif dari larutan konvensional dengan skala mili-mikro 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] 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] 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 [Kebllinski et.al, 2002] dalam [Das et. al, 2008] 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] dalam [Das et. al, 2008] mengembangkan untuk pertama kali model dinamik yang melibatkan konveksi yang diakibatkan oleh gerak Brown. Mereka menurunkan model umum untuk konduktivitas termal nanofluida yang melibatkan 4 mode transport energi



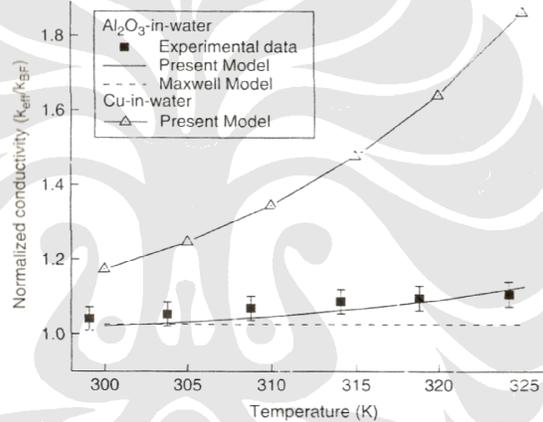
Gambar 3.5 Model Energy Transport Nanofluida

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]. *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:

$$k_{eff} = k_{Bf}(1 - f) + k_{nanof} + 3C_1 \frac{d_{Bf}}{d_{nano}} k_{Bf} Re_{d_{nano}}^2 Pr f \quad (3.11)$$

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 empirik, diameter molekul fluida dasar, dan diameter nano partikel, dan $Re_{d_{nano}}$ adalah bilangan Reynold.



Gambar 3.6 Ketergantungan Konduktivitas Termal Nanofluida terhadap Temperatur [Das et.al, 2008].

Gambar di atas menunjukkan bahwan 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.

3.5 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*:

$$Q = hA(T_w - T_f) \quad (3.12)$$

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 :

$$q = \frac{Q}{A} = h(T_w - T_f) \quad (3.13)$$

h: koefisien perpindahan kalor (*heat transfer coefficient*), $W/m^2.K$. Nilainya tidak pernah konstan, tetapi tergantung pada karakter fluida, geometri aliran, jenis

aliran (turbulent/laminar), kecepatan aliran, serta kondisi lingkungan perpindahan panas berlangsung.

[Pak dan Cho, 1998] adalah yang pertama melakukan investigasi nanofluida pada aliran konveksi paksa. 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] 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 100 nm. 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]. 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- $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ 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, 2003]. 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. Degradasi 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].

Tabel 3.4 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. $Nu_{h,f} = c_1(1.0 + c_2 \phi^{0.1} Pr_d^{0.2} Re_{h,f}^{0.2} Pr_{h,f}^{0.4})$ |
| Xuan and Li [46] | tube ($D = 10$, $L = 800$ mm), | Cu/water | |
| Wen and Ding [47] | tube ($D = 4.5$, $L = 970$ mm) | Al_2O_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_2O_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_2O_3 (20 nm), CuO (50–60 nm)/water | enhancement of h with ϕ and Pe . Al_2O_3 showed more enhancement than CuO |
| Natural convective heat transfer: | | | |
| Putra et al. [55] | horizontal cylinder | CuO (87.3 nm), Al_2O_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 |

