

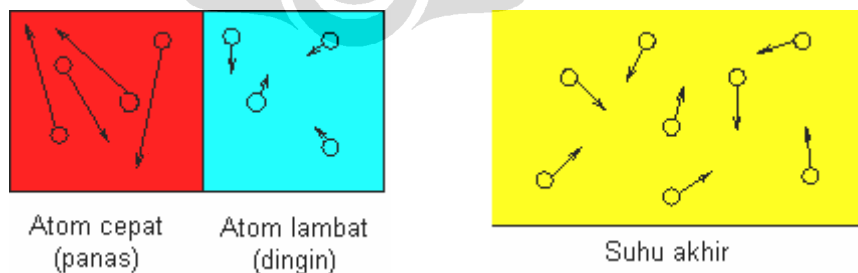
## BAB 2

### FISIKA TERMAL

Dalam fisika termal, perpindahan panas adalah perpindahan energi termal dari benda panas ke benda yang lebih dingin. Ketika sebuah benda memiliki perbedaan suhu dengan lingkungannya atau dengan benda disekitarnya, maka akan terjadi perpindahan energi termal, hal ini akan terus berlangsung hingga mencapai kondisi termal equilibrium antara benda tersebut dengan lingkungannya. Beberapa proses perpindahan panas diantaranya adalah konduksi, konveksi, radiasi serta kombinasi diantara ketiga proses tersebut [9-10].

#### 2.1. KONDUKSI

Konduksi adalah proses perpindahan panas secara spontan melalui materi., dari daerah yang memiliki temperatur lebih tinggi menuju daerah yang memiliki temperatur lebih rendah [11]. Proses perpindahan panas dengan konduksi terjadi karena terjadinya tumbukan antara atom-atom dan molekul-molekul di dalam benda sehingga transfer energi kinetik antar atom-atom tersebut [12]. Dimisalkan terdapat dua buah substrat yang memiliki temperatur yang berbeda dan dipisahkan oleh penghalang (Gambar 2.1). Atom-atom yang berada pada substrat yang suhunya lebih tinggi akan memiliki energi kinetik yang lebih besar dibanding atom-atom yang berada pada substrat yang bersuhu lebih rendah. Karena memiliki energi kinetik yang lebih besar maka atom-atom pada substrat panas akan memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibanding atom-atom pada substrat dingin.



Gambar 2.1 Perpindahan panas melalui proses konduksi [12]

Ketika penghalang tersebut dihilangkan maka, atom-atom cepat akan menumbuk atom-atom lambat. Setelah tumbukan atom-atom cepat akan memberikan sebagian

energinya kepada atom-atom lambat. Transfer energi kinetik dari sisi panas ke sisi dingin disebut perpindahan panas dengan proses konduksi.

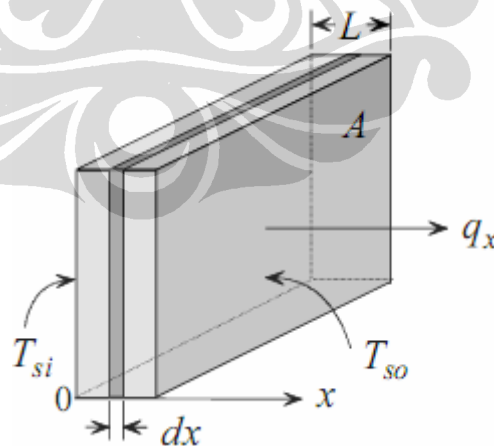
Pada material berbeda akan memiliki rerataan perpindahan panas yang berbeda, hal ini ditentukan oleh konduktivitas termal dari material tersebut. Untuk menentukan persamaan rerataan perpindahan panas pada proses konduksi dapat diturunkan dari Gambar 2.2. Pada Gambar 2.2 temperatur pada permukaan ( $x = 0$ ) adalah  $T_{si}$  dan temperatur pada permukaan lainnya ( $x = L$ ) adalah  $T_{so}$ , ketebalan benda tersebut adalah  $L$  dan luas permukaannya adalah  $A$ . Permukaan pada sisi-sisi lainnya diasumsikan telah terisolasi sehingga panas hanya mengalir pada arah sumbu  $x$  saja. Diasumsikan sistem dalam keadaan *steady state* dan  $q_x$  adalah rerataan panas yang dipindahkan pada arah sumbu  $x$ . Dari hasil percobaan menunjukkan bahwa  $q_x$  sebanding dengan  $A$  dan perbedaan temperatur diantara dua permukaan ( $T_{si} - T_{so}$ ) dan juga berbanding terbalik dengan  $L$  [10].

$$q_x \propto \frac{A(T_{si} - T_{so})}{L} \quad 2.1$$

Dengan menambahkan sebuah konstanta  $K$ , maka didapatkan

$$q_x = k \frac{A(T_{si} - T_{so})}{L} \quad 2.2$$

Dengan  $k$  adalah sifat dari material dan disebut dengan konstanta konduktivitas termal.



Gambar 2.2 perpindahan panas secara konduksi pada permukaan benda

Persamaan ini hanya berlaku dalam kondisi *steady state*, nilai  $k$  besarnya konstan (bergantung jenis bahan) dan merupakan konduksi satu dimensi. Persamaan 2.2 dapat dipergunakan untuk menghitung konduksi yang terjadi pada elmen sebesar  $dx$ . Dari

Gambar 2.2  $T_{si} \rightarrow T(x)$ ,  $T_{so} \rightarrow T(x + dx)$  dan  $L$  diganti dengan  $dx$ , sehingga didapatkan

$$q_x = k A \frac{T(x) - T(x + dx)}{dx} = -k A \frac{T(x + dx) - T(x)}{dx} \quad 2.3$$

Karena  $T(x + dx) - T(x) = dT$ , persamaan di atas dapat diubah menjadi

$$q_x = -k A \frac{dT}{dx} \quad 2.4$$

Persamaan 2.4 dapat dipergunakan untuk menghitung fluks panas  $q_x''$ , dimana didefinisikan sebagai banyaknya panas yang mengalir persatuan luas bidang normal terhadap  $x$ , sehingga besarnya  $q_x''$  adalah

$$q_x'' = \frac{q_x}{A} \quad 2.5$$

Dari Persamaan 2.4 maka besarnya fluks panas  $q_x''$  adalah

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad 2.6$$

Persamaan 2.6 merupakan fluks satu dimensi saja, persamaan ini dapat digeneralisasikan menjadi tiga dimensi dengan mengingat bahwa aliran panas merupakan besaran vektor. Persamaan 2.5 dapat diturunkan berdasarkan arah aliran panas menjadi

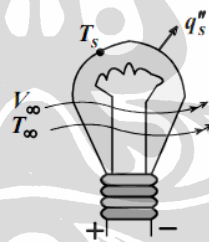
$$q_x'' = -k \frac{\partial T}{\partial x}, \quad q_y'' = -k \frac{\partial T}{\partial y}, \quad q_z'' = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad 2.7$$

Dengan  $x, y$  dan  $z$  adalah kordinat segiempat, Persamaan 2.7 dikenal sebagai hukum fourier untuk konduksi. Tanda negatif pada Persamaan 2.7 menandakan bahwa ketika gradien negatif, maka aliran panas bergerak ke arah positif yaitu ke arah arah suhu menurun, hal ini sesuai dengan hukum termodinamika yang kedua. Konduktivitas  $k$  nilainya tidak harus sama untuk setiap titik pada benda karena Persamaan 2.7 hanya berlaku pada suatu titik di dalam benda dan bukan untuk semua bagian benda tersebut. Pada kenyataannya konduktivitas termal nilainya bervariasi terhadap temperatur. Bagaimanapun Persamaan 2.7 tidak dapat digunakan untuk bahan isotropik dengan nilai  $k$  invarian terhadap arah.

## 2.2. KONVEKSI

Perpindahan panas konveksi adalah mekanisme perpindahan panas karena pergerakan molekul-molekul pada fluida. Pada umumnya pada proses konveksi berhubungan dengan interaksi termal antara permukaan benda dengan fluida yang bergerak disekitar permukaan tersebut. Sebagai contoh sebuah lampu bolham seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3. Suhu permukaan dan fluks panas adalah  $T_S$  dan  $q_S''$ , suhu fluida lingkungan adalah  $T_\infty$ . Besarnya rata-rata energi listrik yang berubah menjadi panas ditentukan oleh kapasitansi dari bolham. Jika perpindahan panas radiasi diabaikan, maka energi yang terdisipasi akan dipindahkan dengan proses konveksi dari permukaan bolham ke fluida lingkungan. Jika temperatur dari permukaan bolham terlalu panas maka ada beberapa hal yang dapat dilakukan untuk dapat menurunkan suhu permukaan bolham tersebut yaitu:

1. Meletakkan kipas angin di dekat bolham yang bertujuan untuk mengalirkan fluida disekitar permukaan bolham.
2. Mengubah jenis fluida, misalkan dengan merubah udara dengan cairan non-konduktif.
3. Memperluas permukaan dengan merancang kembali bentuk geometri dari bolham.



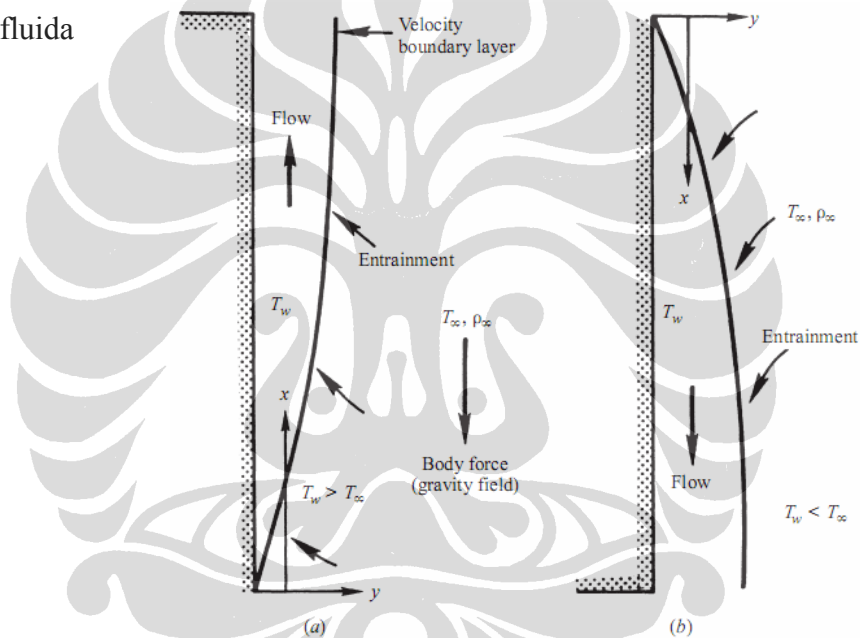
Gambar 2.3 konveksi pada lampu bolham [13]

maka dapat disimpulkan ada tiga faktor utama yang mempengaruhi proses perpindahan panas konveksi yaitu pergerakan fluida, jenis fluida dan bentuk geometri permukaan.

Pada umumnya proses perpindahan panas konveksi dibagi menjadi dua jenis proses. Jika pergerakan fluida disebabkan karena pengaruh dari luar (seperti kipas angin) maka proses ini disebut *forced convection*. Dilain pihak jika pergerakan fluida terjadi karena tidak ada pengaruh dari luar dan mengalir secara alamiah karena adanya perbedaan kerapatan yang disebabkan karena adanya perbedaan temperatur atau perbedaan konsentrasi karena pengaruh medan gravitasi, proses ini disebut konveksi alamiah.

## Konveksi Alamiah

Seperti yang telah dijelaskan di atas bahwa mekanisme konveksi alamiah, atau jenis perpindahan panas dimana pergerakan fluida bukan dikarenakan karena sumber eksternal (seperti pompa, kipas angin, dll) tetapi disebabkan karena perbedaan kerapatan dalam fluida yang disebabkan karena perbedaan temperatur atau perbedaan konsentrasi karena pengaruh medan gravitasi. Pada konveksi alamiah, fluida yang berada disekitar sumber panas akan menerima panas sehingga kerapatannya berkurang. Berkurangnya kerapatan ini menyebabkan fluida dingin disekitarnya akan mengisi daerah tersebut. Selanjutnya fluida dingin ini akan menerima panas dan proses akan terus berlanjut sehingga membentuk sebuah siklus. Daya penggerak pada konveksi alamiah adalah buoyancy yang merupakan hasil dari perbedaan kerapatan pada fluida



Gambar 2.4 Konveksi alamiah pada permukaan vertikal [14]

Untuk mengerti tentang konveksi alamiah dapat dijelaskan contoh kasus perpindahan panas pada permukaan vertikal yang permukaannya sangat luas dan memiliki temperatur uniform (Gambar 2.4). Jika suhu permukaan pelat  $T_w$  lebih tinggi dibanding suhu lingkungan  $T_\infty$ , fluida yang bersebelahan dengan permukaan vertikal tersebut akan mendapat panas, menyebabkan fluida menjadi lebih ringan (asumsikan fluida akan terekspansi karena panas) sehingga fluida tersebut naik. Fluida dari daerah tetangganya akan bergerak mengisi daerah yang ditinggalkan oleh fluida yang naik. Sebagian besar fluida akan terekspansi jika dipanaskan, sehingga terjadi penurunan kerapatan karena kenaikan suhu.

Salah satu cara untuk menentukan besarnya rata-rata panas yang dialirkan antara permukaan benda dengan fluida disekitarnya adalah dengan menggunakan hukum Newton tentang pendinginan [13]. Dari hasil eksperimen yang dilakukan Newton didapatkan bahwa besarnya fluks permukaan dalam konveksi adalah sebanding dengan perbedaan suhu antara permukaan dengan fluida disekitarnya.

$$q' \propto (T_s - T_\infty) \quad 2.8$$

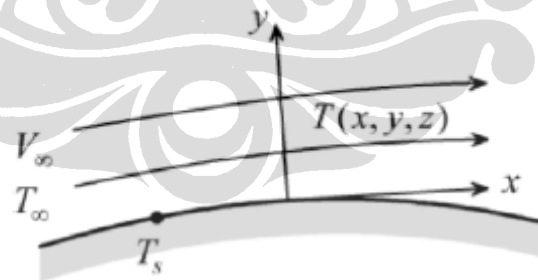
dengan  $q'$  adalah fluks permukaan,  $T_s$  adalah suhu permukaan dan  $T_\infty$  adalah suhu fluida yang berada cukup jauh dari permukaan. Dengan menambahkan sebuah konstanta maka persamaan di atas menjadi

$$q' = h(T_s - T_\infty) \quad 2.9$$

dengan konstanta  $h$  adalah koefisien aliran panas. Tidak seperti konduktivitas termal  $k$ , koefisien aliran panas bukan merupakan sifat material. Koefisien aliran panas nilainya bergantung pada bentuk ukuran benda, jenis fluida, pergerakan fluida dan pada beberapa kasus tergantung juga terhadap perbedaan temperatur,  $\Delta T = (T_s - T_\infty)$

$$h = f(\text{bentuk, jenis fluida, pergerakan fluida, } \Delta T) \quad 2.10$$

Meskipun tidak secara eksplisit dijelaskan tentang distribusi temperatur pada Persamaan 2.8, penentuan analitik konstanta  $h$  membutuhkan pengetahuan tentang distribusi suhu pada fluida bergerak. Hal ini dapat dijelaskan dengan mengkombinasikan hukum Fourier dengan hukum Newton.



Gambar 2.5 Aplikasi hukum Fourier pada permukaan benda [13]

Aplikasi dari hukum Fourier pada arah- $y$  untuk permukaan yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 adalah

$$q' = -k \frac{\partial T(x, 0, z)}{\partial y} \quad 2.11$$

dengan  $y$  adalah garis normal pada permukaan,  $\partial T(x, 0, z) / \partial y$  adalah gradien temperatur fluida pada permukaan dan  $k$  adalah konduktivitas termal dari fluida.

Dengan mengkombinasikan Persamaan 2.8 dengan 2.10 didapatkan persamaan untuk h adalah

$$h = -k \frac{\frac{\partial T(x,0,z)}{\partial y}}{(T_s - T_\infty)} \quad 2.12$$

Dari hasil ini dapat dilihat bahwa untuk dapat menentukan h secara analitik harus terlebih dahulu menentukan distribusi temperatur. Kembali pada Gambar 2.3 (bolham) dengan menggunakan hukum newton didapatkan persamaan untuk suhu permukaan

$$T_s = T_\infty + \frac{q_s}{h} \quad 2.13$$

Untuk nilai  $q'$  dan  $T_\infty$  tetap, suhu permukaan  $T_s$  dapat diubah-ubah dengan cara mengubah nilai h. Hal ini bisa dilakukan dengan cara mengubah fluida, bentuk permukaan dan pergerakan fluida. Tetapi dilain pihak untuk suhu permukaan  $T_s$  dan  $T_\infty$  tetap, dari Persamaan 2.8 dapat dilihat fluks permukaan dapat diubah dengan cara mengubah nilai h. Karena h bukan merupakan properti sehingga nilai tidak dapat ditabulasikan berdasarkan konduktivitas termal, entalpi, densital, dll. Meskipun demikian nilai h dapat ditabulasikan berdasarkan proses pada fluida. Tabel 2.1 menunjukkan jangkauan aproksimasi nilai h untuk beberapa kondisi.

Tabel 2.1 Nilai h untuk beberapa kondisi [13]

| Process                  | $h$ ( $W/m^2 - ^\circ C$ ) |
|--------------------------|----------------------------|
| <b>Free convection</b>   |                            |
| Gases                    | 5-30                       |
| Liquids                  | 20-1000                    |
| <b>Forced convection</b> |                            |
| Gases                    | 20-300                     |
| Liquids                  | 50-20,000                  |
| Liquid metals            | 5,000-50,000               |
| <b>Phase change</b>      |                            |
| Boiling                  | 2,000-100,000              |
| Condensation             | 5,000-100,000              |

### 2.3. AKTUATOR MEMS

Mikroaktuator adalah sebuah divais yang penting bagi MEMS untuk melakukan fungsi fisik. Mikroaktuator dibutuhkan untuk memandu resonator untuk beresilasi pada frekuensi resonannya. Mereka juga dibutuhkan untuk menghasilkan gerakan mekanik yang berfungsi sebagai pemindai atau saklar. Mikroaktuator dengan menggunakan gaya elektromagnetik adalah jenis mikroaktuator yang umum digunakan. Dengan semakin berkembangnya teknologi, maka semakin banyak jenis aktuator diantaranya mikroaktuator elektrostatik, mikroaktuator ekspansi termal, mikroaktuator piezoelektrik yang dipergunakan untuk mendisain beberapa jenis struktur untuk keperluan aplikasi yang spesifik. Pada subbab selanjutnya akan dijelaskan prinsip dasar dari mikroaktuator berdasarkan prinsip aktuatornya.

#### 2.3.1. Aktuator Elektrostatik

Konfigurasi dasar dari aktuator elektrostatik adalah kapasitor dengan kapasitas variabel. Besarnya kapasitas dari kapasitor keping sejajar adalah:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad 2.14$$

Persamaan untuk aktuator elektrostatik dapat diturunkan dari persamaan daya listrik yang tersimpan pada kapasitor. Daya dapat diperoleh dari banyaknya energi yang tersimpan pada kapasitor persatuan waktu,  $P = dW / dt$ . Besarnya energi listrik untuk kapasitor yang dialiri medan listrik sebesar E adalah

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 V = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 ayx \quad 2.15$$

Dengan q adalah muatan listrik yang terdapat pada keping kapasitor, V adalah volume bahan dielektrik yang terletak diantara keping dan besaran lainnya dapat dilihat pada Gambar 2.6.

Jika variasi jarak antar keping pada kapasitor diperhitungkan maka persamaan daya menjadi

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{\partial W}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial W}{\partial q} \frac{dq}{dt} \quad 2.16$$

Pada Persamaan 2.15,  $dx/dt$  menyatakan kecepatan pergerakan dari keping sedangkan  $dq/dt$  besarnya arus listrik yang dipakai untuk mengisi kapasitor. Hasil dari sisi kanan

Persamaan 2.15 berupa daya maka  $\frac{\partial W}{\partial x}$  merupakan gaya elektrostatik  $F \perp$  untuk

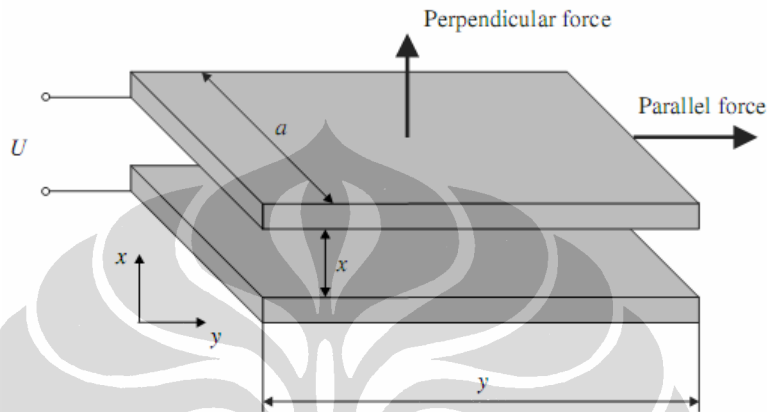


menggerakkan keping,  $\frac{\partial W}{\partial q}$  adalah tegangan yang jatuh pada kapasitor U. Dari hasil-

hasil yang telah didapat dan dari Persamaan 2.14 maka

$$F_{\perp} = \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 ay \quad 2.17$$

$$U = \frac{\partial W}{\partial q} = \frac{q}{C} \quad 2.18$$



Gambar 2.6 Bentuk skematik sebuah kapasitor variabel pada aktuator elektrostatik [3]

Besarnya kapasitas dari kapasitor dapat divariasikan selain dengan mengubah-ubah jarak antar keping sejajar (dengan menggunakan  $F_{\perp}$ ) juga dapat dilakukan dengan cara mengubah-ubah besarnya luas penampang dari keping kapasitor yaitu dengan menggeser keping ke arah sumbu y (Gambar 2.6), besarnya gaya untuk menggerakkan keping pada arah sumbu y adalah

$$F_{\parallel} = \frac{\partial W}{\partial y} = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 ax \quad 2.19$$

dengan menggabungkan Persamaan 2.17 maka Persamaan 2.16 dan 2.18 dapat ditulis kembali menjadi

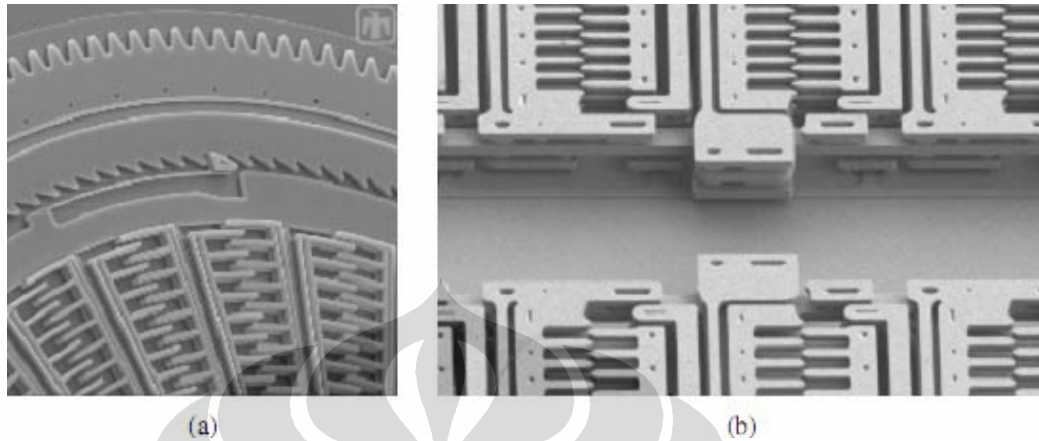
$$F_{\parallel} = \frac{1}{2} \varepsilon U^2 \frac{a}{x} \quad \text{dan} \quad F_{\perp} = \frac{1}{2} \varepsilon U^2 \frac{ay}{x^2} \quad 2.20$$

Dari Persamaan 2.19 dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu:

1. Interaksi elektrostatik memiliki cakupan yang pendek. Besarnya gaya elektrostatik akan turun secara drastis ketika aktuator dinaikkan.
2. Gaya tegak lurus lebih besar dibanding gaya paralel.  $F_{\perp} \approx 10^3 F_{\parallel}$
3. Interaksi elektrostatik sesuai dengan aplikasi mikro

Aktuator elektrostatik memanfaatkan baik gaya tegak lurus  $F_{\perp}$  atau gaya paralel  $F_{\parallel}$ . Aktuator elektrostatik lebih dikenal secara umum sebagai *comb drives*.

Comb drive dapat digunakan untuk mengembangkan aktuator linier maupun rotasi. Gambar 2.7 menggambarkan kedua konsep tersebut. Pada kedua kasus, gaya paralel dihasilkan oleh interaksi elektrostatik yang merupakan hasil dari rotasi interdigital dan pergerakan translasi.

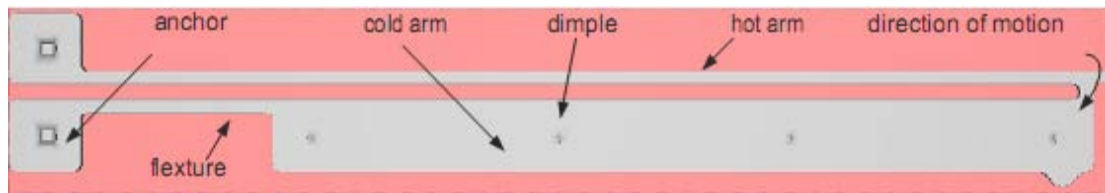


Gambar 2.7 Aktuator elektrostatik *drive actuators*: (a) aktuator rotasi , (b) aktuator linier. [9]

### 2.3.2. Aktuator Termal

Bentuk dasar dari thermal actuator dapat dilihat pada Gambar 2.8. Pada thermal actuator, ukuran lengan panas biasanya lebih tipis dibanding dengan lengan dingin, sehingga hambatan listrik pada lengan panas akan lebih besar dibanding dengan lengan dingin. Ketika listrik melewati kedua lengan tersebut maka akan timbul panas pada kedua lengan tersebut. Panas ini terjadi karena adanya interaksi antara pergerakan partikel yang disebabkan karena arus dengan ion-ion atomik yang terdapat pada konduktor. Pergerakan partikel bermuatan dalam rangkaian listrik disebabkan karena adanya medan listrik yang berasal dari sumber tegangan, ketika partikel bermuatan tersebut menumbuk ion-ion atom maka dia akan memberikan sebagian energi kinetiknya ke ion-ion atom tersebut. Peningkatan energi kinetik (energi getar) dari ion-ion tersebut akan menimbulkan panas sehingga terjadi peningkatan temperatur dari konduktor tersebut.

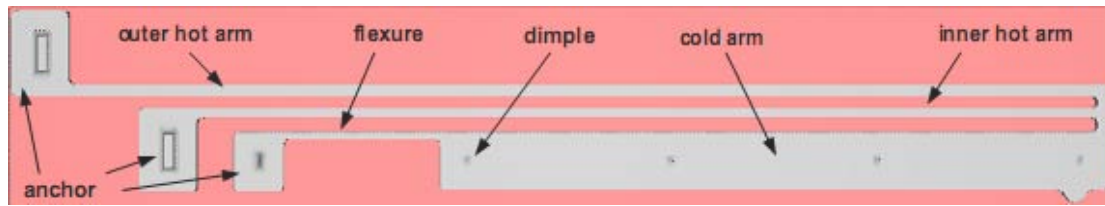
Panas yang timbul pada lengan panas akan lebih tinggi dibandingkan dengan panas yang timbul pada lengan dingin. Hal ini menyebabkan temperatur pada lengan panas akan lebih tinggi dibanding dengan lengan dingin, karena kedua lengan tersebut terbuat dari bahan yang sama, maka memiliki koefisien muai yang sama. Karena perbedaan suhu diantara kedua lengan tersebut, maka berasnya pemuaian pada kedua lengan tersebut akan berbeda. Perbedaan pemuaian pada kedua lengan tersebut menyebabkan rotasi pada actuator.



Gambar 2.8 Bentuk dasar thermal actuator [15]

Meskipun bentuk dasar *thermal actuator* dapat menghasilkan defleksi yang lebih besar dibanding *electrostatic actuator* tanpa membutuhkan sumber tegangan listrik yang besar, tetapi ada beberapa keterbatasan pada tradisional *thermal actuator*. Idealnya *flexure* dibuat sekecil mungkin karena semakin kecil *flexure* dapat dibuat, maka diharapkan semakin besar defleksi yang dapat dihasilkan karena perbedaan pemuaian antara kedua lengan tersebut, tetapi jika ukuran *flexure* lebih kecil dibanding dengan lengan panas, maka temperatur yang timbul pada *flexure* dapat lebih tinggi dibandingkan dengan lengan panas sehingga bisa menyebabkan terjadinya *over heating*. Untuk menjaga elastisitas defleksi maka *flexure* harus dibuat cukup panjang, tetapi jika *flexure* terlalu panjang maka defleksi pada *thermal actuator* akan berkurang. Selain itu karena arus juga mengalir melewati *flexure* dan lengan dingin, maka hambatan pada *flexure* dan lengan dingin juga akan memberikan kontribusi terhadap hambatan *actuator* secara keseluruhan. Energi yang terserap pada *flexure* dan lengan dingin tidak memberikan kontribusi yang penting terhadap besarnya defleksi pada *thermal actuator*. Hanya power yang diserap oleh panas saja yang secara langsung memiliki kontribusi yang besar dalam defleksi thermal actuator. Masalah efisiensi dalam penggunaan energi listrik juga perlu menjadi perhatian karena besarnya hambatan pada *flexure* dan lengan dingin sebanding dengan lengan panas.

Beberapa rancangan telah dikembangkan untuk mengatasi kekurangan-kekurangan yang terdapat pada bentuk dasar thermal actuator. *Thermal actuator* dengan dua lengan panas merupakan salah satu jenis *thermal actuator* yang telah dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan pada *thermal actuator* dasar. Pada *Thermal actuator* dengan dua lengan panas (Gambar 2.9), arus listrik hanya mengalir pada kedua lengan panas, sehingga lengan dingin dan *flexure* tidak lagi merupakan bagian dari rangkaian listrik.



Gambar 2.9 Thermal actuator dengan dua lengan panas [16]

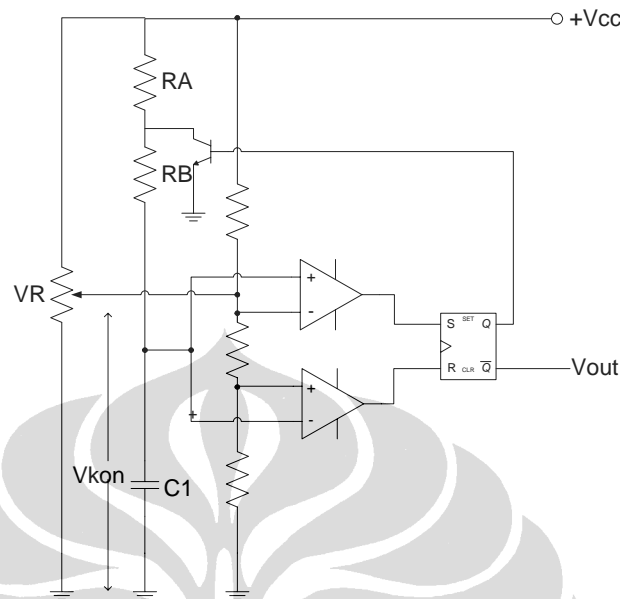
Hal ini dapat meningkatkan secara dramatis efisiensi karena seluruh energi yang terserap oleh *actuator* dipakai dalam proses defleksi pada *thermal actuator*. Disamping itu *flexure* dapat dibuat lebih tipis dibanding lengan panas karena tidak ada arus yang mengalir melewati *flexure*.

#### 2.4. VOLTAGE CONTROLLED OSCILLATOR (VCO) [17]

Voltage Controlled Oscillator (VCO) adalah sebuah osilator yang frekuensi keluarannya dapat divariasikan dengan cara mengubah-ubah tegangan luar yang diaplikasikan ke alat tersebut. Gambar 2.10 menunjukkan sebuah rangkaian dasar VCO dimana frekuensi keluarannya dapat divariasikan dengan cara mengubah-ubah tegangan kontrolnya.

Cara kerja dari rangkaian pada Gambar 2.10 adalah sebagai berikut. Ketika pin Q dari flip-flop dalam kondisi rendah maka transistor menjadi *cut-off* dan kapasitor C1 akan terisi. Pada saat kapasitor terisi, tegangan pada kaki *noninverting comparator* sebelah atas akan naik. Ketika tegangannya telah melebihi tegangan pada kaki *invertingnya* (besarnya tergantung tegangan kontrol yang digunakan) maka keluaran dari *comparator* sebelah atas akan tinggi. Keluaran dari *comparator* sebelah atas akan mengeset flip-flop sehingga keluaran Q menjadi tinggi. Ketika nilai Q menjadi tinggi maka transistor akan saturasi dan pada kondisi ini kapasitor akan membuang muatannya melalui  $R_B$ . Pada saat kapasitor melepas muatan maka tegangan pada kaki *inverting comparator* bawah akan turun dan ketika tegangannya lebih kecil dari tegangan pada kaki *noninvertingnya* maka keluaran *comparator* bagian bawah akan tinggi sehingga flip-flop akan reset. Tegangan keluaran akan tinggi selama flip-flop dalam keadaan reset dan tegangan keluaran akan rendah ketika flip-flop dalam keadaan set. Jika tegangan kontrol dinaikkan maka waktu yang diperlukan untuk mengisi dan melepas muatan dari kapasitor akan lebih lama sehingga frekuensi gelombang yang dihasilkan akan turun. Begitu pula jika kapasitas dari kapasitor diperbesar maka waktu pengisian dan pelepasan muatan juga akan lebih lama sehingga jangkauan frekuensi yang dihasilkan akan lebih rendah. Sebaliknya jika

kapasitas kapasitor yang digunakan diperkecil, maka waktu pengisian dan pelepasan muatan akan lebih cepat sehingga jangkauan frekuensi yang dihasilkan akan lebih tinggi.

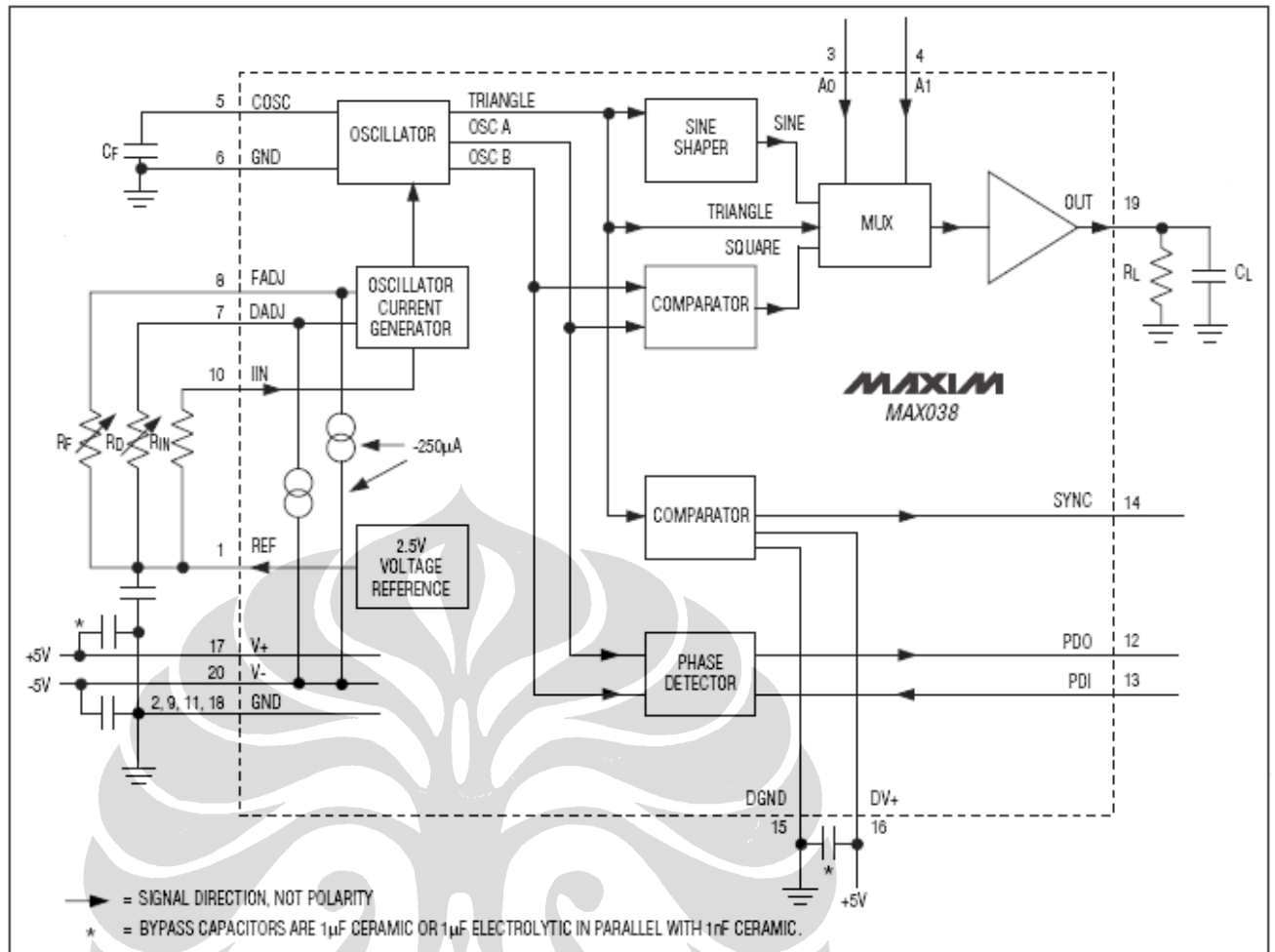


Gambar 2.10 Rangkaian dasar VCO [17]

#### 2.4.1. MAX 038 [18]

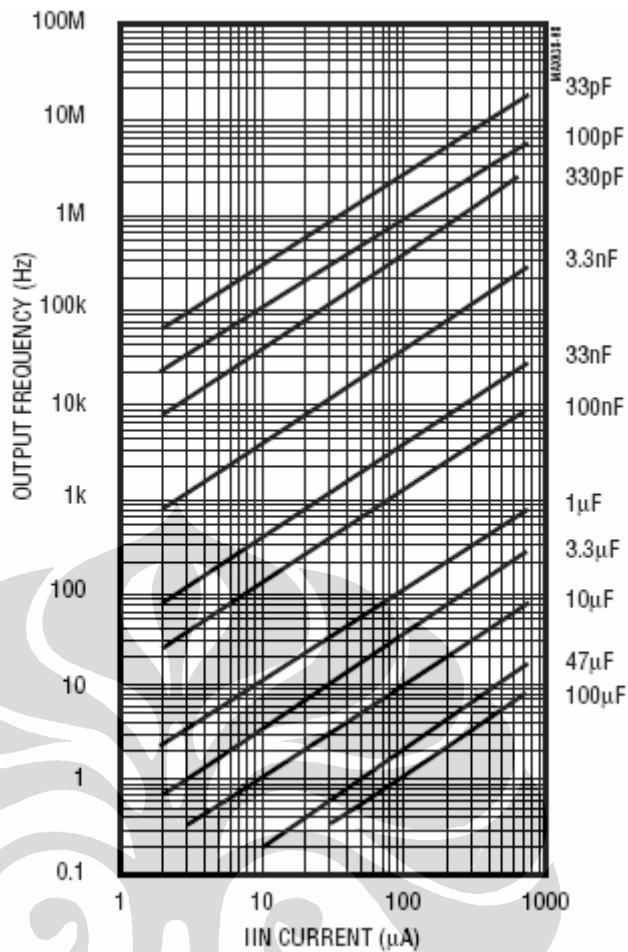
MAX038 adalah generator fungsi frekuensi tinggi yang dapat menghasilkan *low-distortion* gelombang sinus, segitiga, kotak pada frekuensi dari 1Hz hingga 20MHz, dengan penggunaan komponen eksternal minimum. Frekuensi dan duty cycle dapat dengan bebas dikendalikan dengan cara mengatur arus, tegangan atau hambatan. Bentuk gelombang keluaran dapat dipilih dengan memvariasikan masukan A0 dan A1 pada IC.

MAX038 bekerja pada tegangan masukan  $\pm 5V \pm 5\%$ . Dasar dari osilator dari divais ini adalah proses pengisian dan pelepasan muatan dari kapasitor CF yang secara simultan menghasilkan gelombang segitiga dan kotak (Gambar 2.11). Proses pengisian dan pelepasan muatan ini di atur oleh arus IIN dan diatur oleh tegangan pada FADJ dan DADJ. Arus pada IIN dapat divariasikan antara  $2\mu A$  sampai  $750\mu A$ .



Gambar 2.11 diagram blok MAX038 [18]

*Duty cycle* dapat divariasikan dari 10% sampai 90% dengan memvariasikan masukan pada DADJ sebesar  $\pm 2.3V$ . Tegangan ini akan mengubah perbandingan waktu pengisian dan pelepasan pada kapasitor  $C_F$ . Frekuensi keluran berbanding terbalik dengan nilai kapasitor  $C_F$ . Hubungan variasi frekuensi dengan arus  $I_{IN}$  serta kapasitas kapasitor  $C_F$  yang dipergunakan dapat dilihat pada Gambar 2.12



Gambar 2.12 Grafik hubungan antara frekuensi keluaran dengan arus IIN [18]

Rangkaian pembentuk gelombang sinus akan mengubah bentuk gelombang segitiga menjadi *low-distortion* gelombang sinus dengan amplitudo konstan. Selanjutnya gelombang sinus, segitiga dan kotak masuk ke dalam *multiplexer*. Pemilihan bentuk gelombang yang akan dihasilkan dapat menggunakan kombinasi masukan A0 dan A1.

Tabel 2.2 Pemilihan bentuk gelombang [18]

| A0 | A1 | Bentuk gelombang |
|----|----|------------------|
| X  | 1  | Sinus            |
| 0  | 0  | kotak            |
| 1  | 0  | segitiga         |

X = Don't care

Gelombang segitiga juga diumpankan ke rangkaian pembanding yang akan menghasilkan *high-speed square-wave SYNC* dimana dapat digunakan untuk mensinkronisasikan osilator lainnya. Rangkaian SYNC memiliki sumber tegangan yang berbeda dan dapat di non-aktifkan.