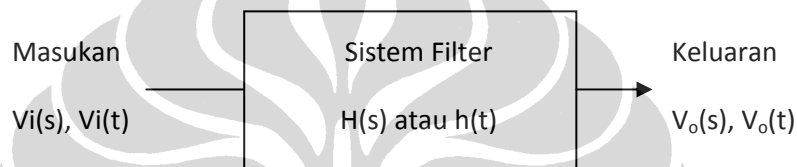


BAB 3

MEMS RESONATOR

3.1 *Bandpass Filter (BPF)*

Filter pada dasarnya merupakan divais untuk memisahkan bagian yang diinginkan dari bagian-bagian yang tidak diinginkan. Filter yang hendak dirancang berfungsi untuk memisahkan frekuensi-frekuensi sinyal yang diharapkan dari frekuensi-frekuensi sinyal yang tidak diharapkan. Secara umum filter dapat digambarkan seperti pada diagram blok 3.1

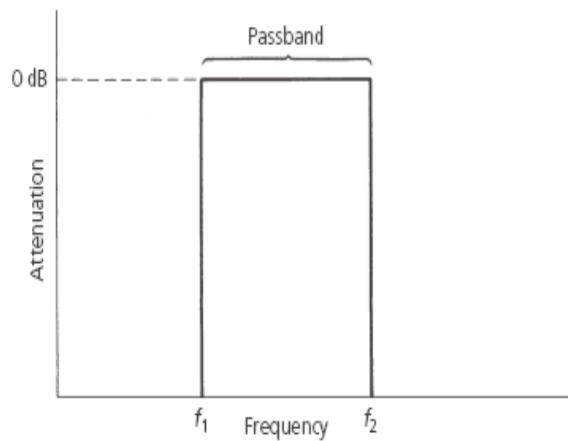


Gambar 3.1 Blok diagram filter [31]

$V_i(t)$ merupakan sinyal dengan beberapa komponen yang frekuensinya berbeda-beda. Rangkaian pemilah frekuensi dalam hal ini memilih sinyal dengan frekuensi tertentu saja, demikian sehingga $v_o(t)$ merupakan tegangan dengan salah satu (daerah) frekuensi saja. Pemisahan frekuensi ini dinyatakan dalam fungsi-alih $H(s)$ atau $h(t)$, yang merupakan perbandingan tegangan sinyal keluaran dan tegangan sinyal masukan.

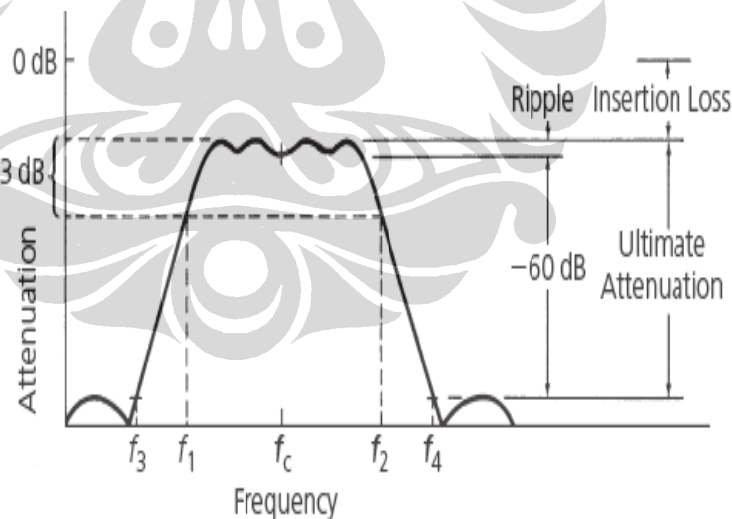
Selektivitas filter merupakan metode yang paling umum untuk klasifikasi filter. Berdasarkan selektivitasnya, filter dibagi menjadi filter *lowpass*, *highpass*, *bandpass* dan *bandstop*. Karena filter yang akan dirancang ditujukan untuk aplikasi *mobile WiMAX* yang mempunyai rentang 2.3 GHz -2.4 GHz maka jenis filter yang akan dipilih adalah *bandpass filter (BPF)*.

BPF melewati suatu rentang pita frekuensi dan meredam frekuensi-frekuensi di bawah atau di atas pita tersebut. Gambar 3.2 merupakan respons filter yang ideal, respons seperti ini disebut respons *brickwall* atau tembok bata karena respons ini berbentuk persegi sempurna [32].



Gambar 3.2 Respons BPF Ideal [32]

Hanya saja dalam praktiknya hal ini tidak mungkin terjadi karena karakter fisik dari komponen-komponen yang menyusunnya. Tidak ada komponen yang sempurna, dan karena itulah tidak akan ada filter yang sempurna. Tapi kita bisa merancang rangkaian filter yang mendekati sempurna dengan cara yang sempurna. Sedangkan gambar 3.3 di bawah ini adalah gambar dari respon filter secara praktek.



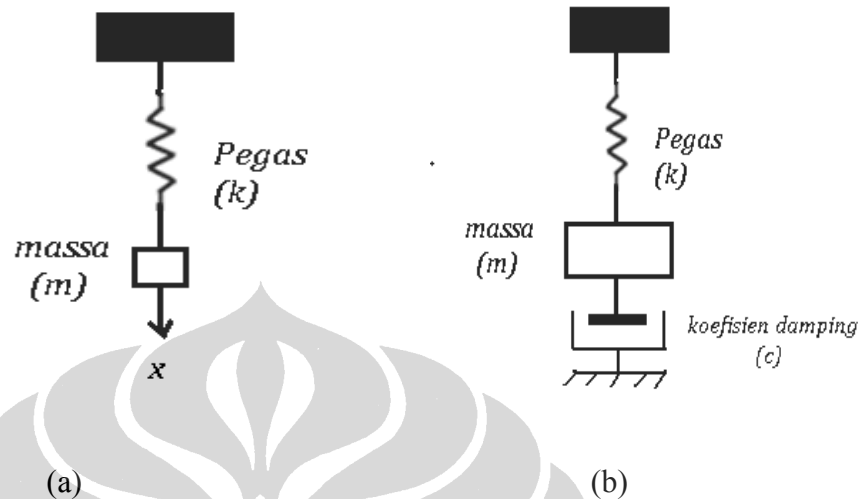
Gambar 3.3 Respons BPF pada umumnya beserta parameter-parameternya [32]

Parameter-parameter yang akan digunakan pada perancangan filter ini dijelaskan pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Parameter-Parameter BPF [32]

No	Parameter	Definisi	Satuan
1	Frekuensi tengah elektris	Frekuensi ditengah-tengah <i>passband</i> filter	Hz
2	<i>Bandwidth</i>	perbedaan antara frekuensi atas dan frekuensi bawah (f_2-f_1) pada rangkaian saat respon amplitudanya 3dB-down	Hz
3	<i>Shape factor</i>	<i>Shape factor</i> adalah derajat pengukuran yang sederhana dari kecuraman kurva. Semakin kecil nilai <i>shape factor</i> maka respon pada kurva akan semakin curam. rangkaian. Nilai idealnya adalah 1 (respon brickwall)	-
4	<i>Insertion Loss</i> (S_{12})	Rugi-rugi yang terjadi karena penyelipan komponen (dalam hal ini BPF) di antara sumber dan generator. Terjadi karena komponen menyerap sinyal dari generator.	dB
5	<i>Return Loss</i> (S_{11})	Rugi-rugi karena adanya daya yang dipantulkan kembali ke sumber oleh komponen. Semakin kecil nilai return loss maka semakin matching rangkaian tersebut.	dB
6	<i>Ripple</i>	Ukuran kedataran dari daerah passband pada rangkaian. Secara fisik, ripple diukur dalam karakteristik respon sebagai perbedaan antara atenuasi maksimum pada passband dengan atenuasi minimum pada passband.	dB
7	Impedansi input dan output	Impedansi input dan output rangkaian filter. Nilai idealnya adalah 50 Ω (matching dengan saluran transmisi)	Ω
8	<i>Quality Factor</i> (Q)	Q merupakan rasio perbandingan antara frekuensi tengah dan frekuensi bandwidth-3dB.	

3.2 Filter Mikroelektromekanikal



Gambar 3.4 (a.) Sistem getaran massa – pegas ;

(b) sistem getaran massa-pegas-dashpot [33]

Getaran mekanik adalah dasar dari perancangan filter mikroelektromekanikal. Sistem getaran mekanik yang paling sederhana adalah sistem massa – pegas seperti digambarkan pada Gambar 3.4 a, massa tergantung pada pegas dengan sebuah konstanta pegas k bergetar dari posisi awal kesetimbangan yang memberi gangguan sesaat yang kecil pada massa[33].

Perpindahan massa pada waktu t adalah x dapat diperoleh dari solusi persamaan 3.1 yang berdasar pada hukum II Newton :

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (3.1)$$

Solusi umum dari persamaan 3.1 adalah

$$x = C_1 \cos(\omega t) + C_2 \sin(\omega t) \quad (3.2)$$

Dengan ω adalah frekuensi sudut yang juga sering disebut frekuensi natural dari getaran massa :

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.3)$$

sedangkan C_1 dan C_2 adalah konstanta untuk menentukan kondisi awal yang tepat. Sehingga frekuensi dari getaran massa dapat diperoleh dari persamaan 3.3

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.4)$$

Gambar 3.4b menggambarkan sebuah *dashpot* di dalam sistem gerak mekanik. Dashpot menimbulkan dampak redaman yang menyerupai gesekan sehingga mengecilkan kemampuan sistem untuk bergetar. Diasumsikan *dashpot* memiliki koefisien redaman (c) yang akan menghasilkan perlambatan gaya redaman sebanding dengan kecepatan getaran massa. Persamaan 3.1 dapat dimodifikasi menjadi :

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (3.5)$$

Persamaan 3.5 diatas merupakan persamaan diferensial orde kedua yang dapat diselesaikan dengan mengasumsikan $x = X^{st}$, sehingga persamaan karakteristiknya menjadi :

$$(ms^2 + cs + k)X^{st} = 0 \quad (3.6)$$

$$\left(s^2 + \frac{c}{m}s + \frac{k}{m}\right)X^{st} = 0$$

$$s_{12} = -\frac{c}{2m} \pm \frac{\sqrt{c^2 - 4mk}}{2m}$$

Sehingga solusi umum dari persamaan 3.5 adalah :

$$x = C_1 e^{s_1 t} + C_2 e^{s_2 t} \quad (3.7)$$

dengan C_1 dan C_2 adalah sembarang konstanta yang ditemukan dari kondisi awal. Sistem akan merespon posisi sesaat dari massa x , pada persamaan 3.7 dalam tiga bentuk keadaan tergantung kepada besaran parameter redaman yang didefinisikan sebagai $\lambda = \frac{c}{2m}$ [33], yaitu:

- Sangat teredam (*overdamping*) jika $\lambda^2 - \omega^2 > 0$ sehingga

$$x = e^{-\lambda t}(C_1 e^{t\sqrt{\lambda^2 - \omega^2}} + C_2 e^{-t\sqrt{\lambda^2 - \omega^2}}) \quad (3.8)$$

- Redaman kritis (*critical damping*) jika $\lambda^2 - \omega^2 = 0$, sehingga

$$x = e^{-\lambda t}(C_1 + C_2 t) \quad (3.9)$$

- Kurang teredam (*underdamping*), jika $\lambda^2 - \omega^2 < 0$, sehingga

$$x = e^{-\lambda t}(C_1 \cos \sqrt{\omega^2 - \lambda^2} t + C_2 \sin \sqrt{\omega^2 - \lambda^2} t) \quad (3.10)$$

3.2.1 Koefisien Redaman (*damping coefficient*)

Koefisien redaman (c) pada persamaan 3.5 memiliki dampak yang signifikan terhadap sifat fisik dari sistem getaran mekanik [33]. Redaman adalah sebuah hambatan yang ditimbulkan oleh gesekan antara permukaan benda yang bergetar dengan fluida disekitarnya dapat berupa udara maupun zat cair. Dalam rancangan *microaccelerometer*, redaman dapat terjadi dengan dua cara yang berbeda yaitu:

1. *Squeeze damping coefficient* (koefisien redaman pada lapisan tipis yang diberi tekanan) *microaccelerometer* karena adanya pemampatan fluida disebabkan oleh gerakan benda.
2. *Shear resistance* (penggeseran hambatan) untuk mendapatkan gaya yang seimbang.

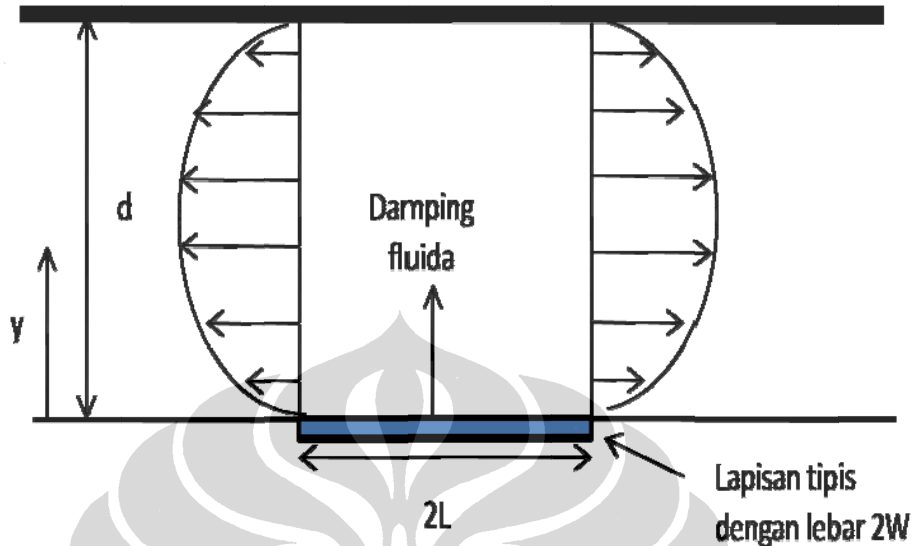
Koefisien redaman sebuah lapisan tipis yang diberi tekanan dapat diperoleh dari hubungan sederhana

$$F_D = c v(t) \quad (3.11)$$

Dengan F_D adalah gaya hambatan yang bergerak dalam benda, c adalah koefisien redaman dan $v(t)$ adalah kecepatan benda.

Koefisien redaman pada sebuah lapisan tipis yang diberi tekanan, berdasarkan dua sumber (Newell 1968 dan Starr 1990) yang digambarkan pada Gambar 3.5 yang menjelaskan sebuah getaran pelat tipis dengan panjang $2L$ dan

lebar $2W$ dengan jarak celah antara pelat (*gap*) $H(t)$. Jika $y(t)$ adalah posisi letak pelat, dan \dot{y} adalah kecepatan gerak pelat.



Gambar 3.5 Koefisien redaman pada sebuah lapisan tipis yang diberi tekanan[33]

Untuk redaman jalur fluida yang tidak dapat dimampatkan, persamaan gaya hambatan F_D adalah :

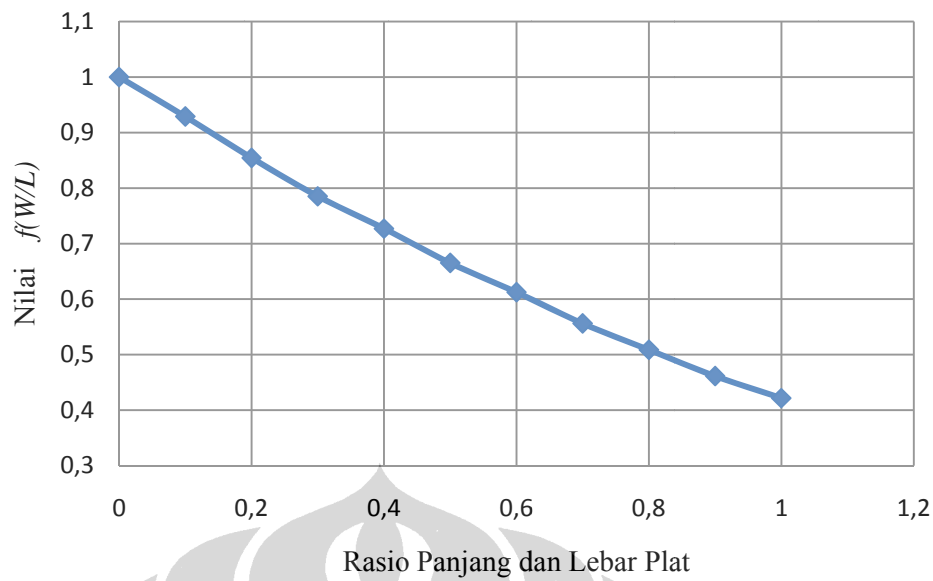
$$F_D = 16f \left(\frac{W}{L} \right) W^3 L \left(\frac{\partial y(t)}{\partial t} \right) H_t^3 \quad (3.12)$$

Sehingga koefisien redaman c dapat diperoleh dengan menghubungkan persamaan 3.11 dengan persamaan 3.12 :

$$c = 16 f \left(\frac{W}{L} \right) W^3 L H_t^3 \quad (3.13)$$

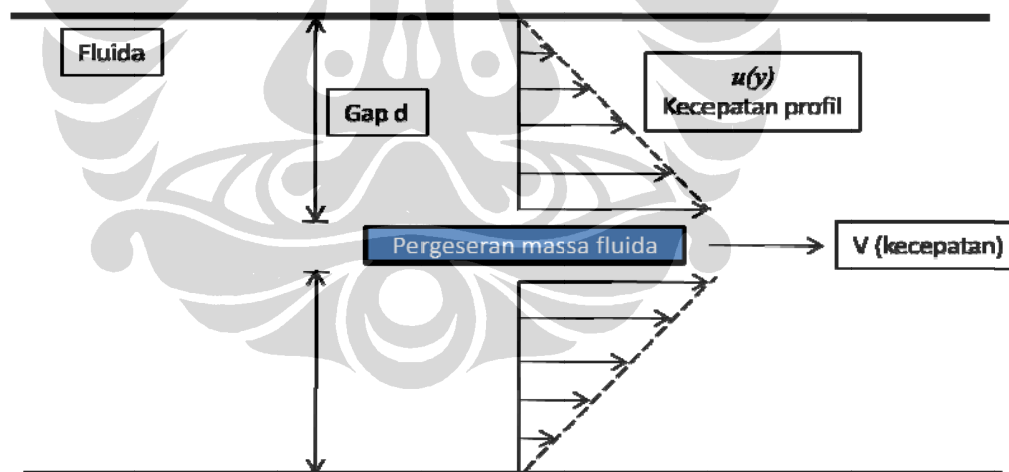
Sedangkan $f(W/L)$ sebuah koefisien yang nilainya bergantung pada perbandingan dari lebar dan panjang dari plat. Nilai dari $f(W/L)$ dapat diketahui dengan melihat grafik pada Gambar. 3.6.

Dengan demikian koefisien redaman pada sebuah lapisan tipis yang diberi tekanan yang tidak dapat dimampatkan tidak dipengaruhi oleh sifat fluida.



Gambar. 3.6 Grafik Nilai $f(W/L)$ sebagai fungsi dari rasio antara panjang dan lebar pelat [33]

Koefisien damping dalam kasus pergeseran hambatan (*shear impedance*) diperlihatkan pada Gambar 3.7



Gambar 3.7 Damping dalam kasus pergeseran massa fluida [33]

Tegangan geser baik pada bagian atas maupun bagian dasar permukaan batang dapat dinyatakan dengan :

$$\tau_s(y) = \mu \frac{d(\mu)y}{dy} \quad (3.14)$$

Dimana μ = viscositas dinamik fluida dan $u(y)$ = kecepatan profil dalam fluida sedang v adalah kecepatan fluida. Kecepatan profil memiliki hubungan linear dengan kecepatan fluida dan berbanding terbalik dengan lebar *gap* dengan persamaan :

$$\mu(y) = \frac{v_y}{d} \quad (3.15)$$

Kita dapat memperoleh tegangan geser permukaan di permukaan kontak (τ_o) menggunakan persamaan 3.14 dengan fungsi kecepatan :

$$\tau_o = \frac{\mu v}{d} \quad (3.16)$$

Dari persamaan 3.16 kita dapat menentukan persamaan gaya geser (*shear force*) F_D pada permukaan bagian atas dan bagian dasar dari batang :

$$F_D = \tau_o(2LW) = \frac{2\mu LW}{d} v \quad (3.17)$$

koefisien damping (c) dapat diperoleh dengan menghubungkan persamaan 3.11 dengan persamaan 3.17 sebagai berikut :

$$c = \frac{F_D}{v} = \frac{2\mu LW}{d} \quad (3.18)$$

Viscositas dinamik pada beberapa jenis fluida diperlihatkan pada Tabel 3.2

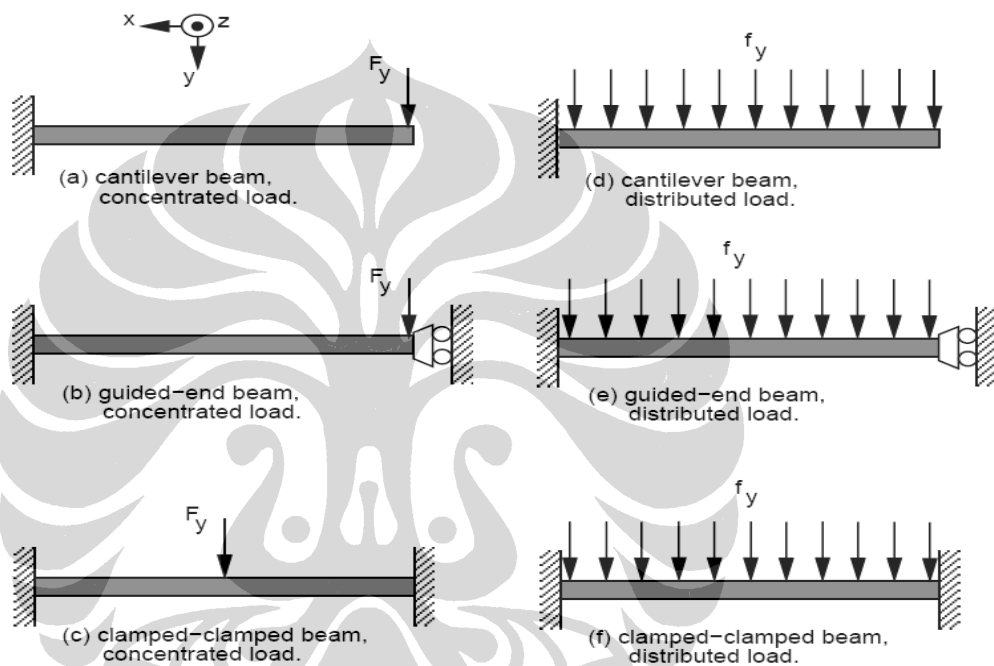
Tabel 3.2 Viscositas dynamic fluida (dalam 10^{-6} N-s/m²)[33]

Fluida yang dapat dimampatkan					
	0°C	20°C	60°C	100°C	200°C
Udara	17,08	18,75	20,00	22,00	25,45
Helium	18,60	19,41	21,18	22,81	26,72
Nitrogen	16,60	17,48	19,22	20,85	24,64
Fluida yang tidak dapat dimampatkan					
	0°C	20°C	40°C	60°C	80°C
Alkohol	1772,52	1199,87	834,07	591,80	432,26
Kerosene	2959,00	1824,23	1283,18	971,96	780,44
Air	1752,89	1001,65	651,65	463,10	351,00
Minyak Silicon		740			

3.2.2 Konstanta Pegas pada Batang Sederhana

Bentuk batang resonator seperti *cantilever*, *guided-end beam* dan *clamped-clamped beam* dengan variasi batang dengan beban yang terpusat maupun menyebar merata digambarkan pada Gambar 3.8. Untuk kasus beban terpusat pada batang, konstanta pegas dapat didefinisikan sebagai [8] :

$$k_x = \frac{F_x}{x} ; k_y = \frac{F_y}{y} ; k_z = \frac{F_z}{z} \quad (3.19)$$



Gambar 3.8 Variasi bentuk batang dengan beban terpusat dan meyebar [8]

Besar perpindahan pada masing-masing variasi batang dengan panjang (L), lebar (w) dan tebal (h) ditunjukkan pada Tabel 3.3 dan Tabel 3.4 :

Tabel 3.3 Rumus perpindahan pada variasi batang dengan beban terpusat[8]

<i>Cantilever beam</i>	<i>Guided-end beam</i>	<i>Clamped-clamped beam</i>
$x = \frac{F_x L}{Ehw}$	$x = \frac{F_x L}{Ehw}$	$x = \frac{F_x L}{4Ehw}$
$y = 4 \frac{F_y L^3}{Ehw^3}$	$y = \frac{F_y L^3}{Ehw^3}$	$y = \frac{1}{16} \frac{F_y L^3}{Ehw^3}$
$z = 4 \frac{F_z L^3}{Ewh^3}$	$z = \frac{F_z L^3}{Ewh^3}$	$z = \frac{1}{16} \frac{F_z L^3}{Ewh^3}$

Tabel 3.4 Rumus perpindahan pada variasi batang dengan beban menyebar [8]

<i>Cantilever beam</i>	<i>Guided-end beam</i>	<i>Clamped-clamped beam</i>
$x = \frac{f_x L}{E}$	$x = \frac{f_x L}{E}$	$x = \frac{f_x L}{4E}$
$y = \frac{3 f_y L^4}{2 E h w^3}$	$y = \frac{1 f_y L^4}{2 E h w^3}$	$y = \frac{1 f_y L^4}{32 E h w^3}$
$z = \frac{3 f_z L^4}{2 E w h^3}$	$z = \frac{1 f_z L^4}{2 E w h^3}$	$z = \frac{1 f_z L^4}{32 E w h^3}$

3.2.3 Clamped-Clamped MEM Resonator (CC- MEMS Resonator)

Resonators merupakan elemen kunci dalam realisasi filter dan osilator . Sejumlah pendekatan untuk resonators telah diselidiki dalam konteks teknologi MEMS seperti telah dibahas pada bab sebelumnya.

Filter elektromechanical bersifat seperti resonator dan dianalisis dalam bentuk karakteristik elektrikal dan mekanikal. Sifat mekanis dari filter yang penting adalah frekuensi resonansi dan faktor kualitasnya. Beberapa bentuk filter menggunakan gabungan dua atau lebih resonator menggunakan element *kopling* untuk meningkatkan hasil yang ingin dicapai.

Sifat mekanis resonator tergantung kepada bentuk, bahan yang digunakan dan faktor- faktor berkenaan dengan mode getaran. Untuk menyederhanakan analisa resonator kita menggunakan beberapa asumsi (Johnson, 1983 dalam RF Mems and their aplikation ,2003) :

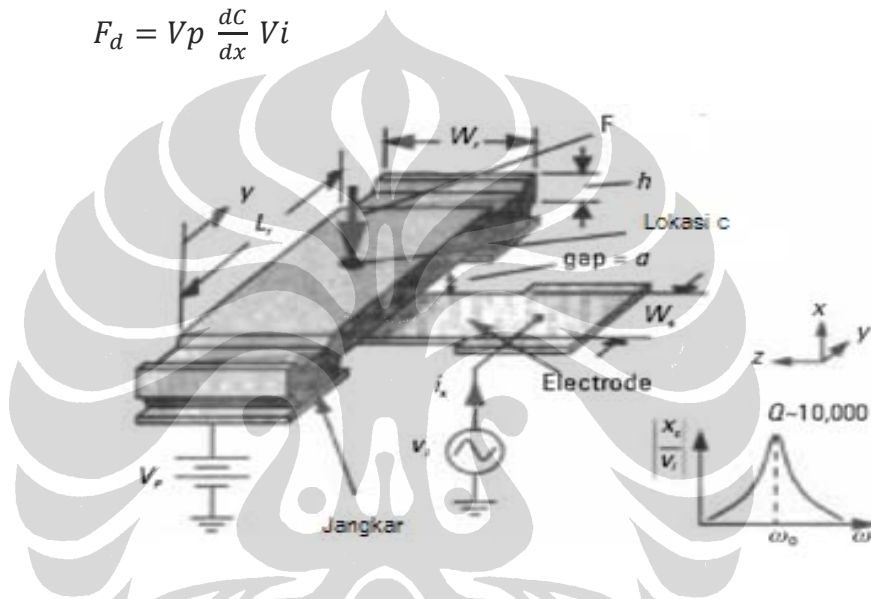
- Getaran adalah amplitude yang kecil dan hubungan *stress-strain* adalah linear,
- Tidak ada *internal losses* dan *external damping* dari getaran yang disebabkan oleh hambatan udara
- Dampak dari garafitasi *external* dan gaya magnetic dapat diabaikan.

CC- MEMS resonator terdiri dari dua penyangga, batang resonator yang terletak di atas elektroda seperti pada Gambar 3.9 Batang resonator memiliki panjang L_r , lebar W_r dengan ketebalan H , dan terbuat dari material dengan

modulus Young E dan berat jenis ρ . Elektroda memiliki lebar W_e dan d adalah jarak pemisah antara elektroda dengan batang resonator [35].

Dalam operasinya masukan tegangan DC (V_p) pada resonator dan tegangan masukan AC (V_i) diterapkan pada elektroda, $C = \frac{\epsilon_0 W_r W_e}{d_0}$ didefinisikan sebagai daerah tumpang tindih antara elektroda dengan batang resonator dan kombinasi tegangan menghasilkan gaya elektrostatis (F_d) antara elektroda dan resonator sebesar :

$$F_d = V_p \frac{dC}{dx} V_i \quad (3.20)$$



Gambar 3.9 CC- MEMS resonator[35]

Yang menyebabkan resonator bergetar vertikal sejauh $x(t)$, dengan demikian turunan $\frac{dC}{dx}$ mewakili perubahan kapasitansi elektroda terhadap resonator per unit perpindahan diberikan oleh :

$$\frac{dC}{dx} = \frac{W_r W_e}{d_0^2} \quad (3.21)$$

dimana d_0 jarak elektroda dan resonator pada kondisi statik (tidak ada resonansi), ketika frekuensi dari V_i bersesuaian dengan frekuensi resonansi, resonator mulai bergetar dengan amplituda perpindahan dari nol ke puncak pada lokasi y diberikan oleh :

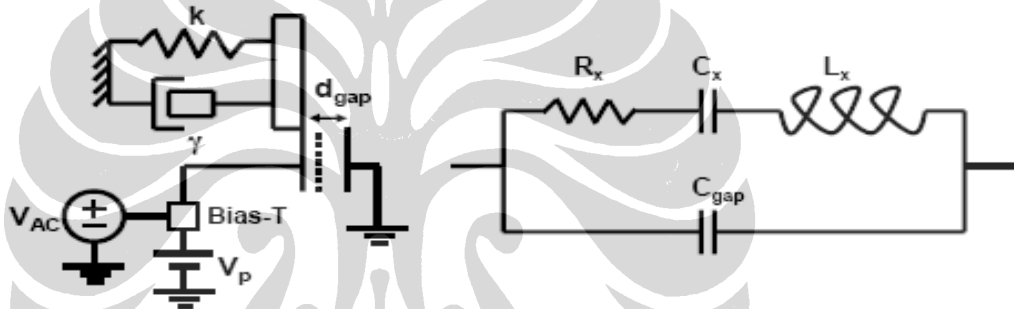
$$x(y) = \frac{Q F_d}{k_{reff}(y)} = \frac{Q}{k_{reff}(y)} V_p \frac{dC}{dx} V_i \quad (3.22)$$

Dengan $k_{re\text{ff}}$ adalah kekakuan efektif pada lokasi y . Perpindahan batang sebagai tanggapan pada tegangan V_i mendorong arus kapasitor sebesar :

$$i_x = V_p \frac{dc}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (3.23)$$

3.2.4 Rangkaian Ekivalen Elektrik Resonator

Elektrostatik resonator MEMS dapat dimodelkan secara mekanis dan elektrik dengan sistem beresonansi teredam seperti ditunjukkan pada Gambar.3.10 dimana analogi ekivalen mekanik ke elektrik dinyatakan pada Tabel 3..5. Masukan system mekanik adalah gaya (F) dan kelurannya adalah perpindahan gerak (*displacement*).



Gambar 3.10 Skema model mekanik dan elektrik sebuah elektrostatik resonator[4]

Kopling kapasitansi *gap* (C_{gap}) menggambarkan kapasitansi statis antara resonator dan elektroda [4]. Nilai kualitas faktor (Q) juga dapat dihitung dengan membagi frekuensi resonansi dengan lebar bandwidth 3dB di bawah puncak signal.

$$Q = \frac{f_r}{\Delta B_{3dB}} \quad (3.24)$$

Tabel 3.5 Ekivalen mekanik ke elektrik [36]

Variabel mekanik	Variabel Elektrik
Koefisien redaman (c)	Hambatan (R_x)
Kekakuan mekanik ⁻¹ (1/k)	Kapasitansi (C_x)
Massa (m)	Induktansi (L_x)
Gaya (F)	Tegangan (V)
Kecepatan (v)	Arus (I)

Efek redaman tidak berpengaruh terhadap perpindahan di luar bandwidth frekuensi resonansi,. Oleh karena itu, jika resonator dipengaruhi oleh gangguan faktor luar (seperti getaran lingkungan atau transportasi) dengan frekuensi jauh di bawah atau di atas frekuensi resonansi, dampaknya dapat diabaikan pada tanggapan resonator [4]. Hubungan elektrostatis antara aktuasi electrode dan bagian resonator berkaitan dengan faktor kualitas Q sebagai:

$$c_o = \frac{2\pi f_o m_o}{Q} \quad \text{dan} \quad \eta = \frac{V_p \epsilon_o}{d_o^2} \quad (3.25)$$

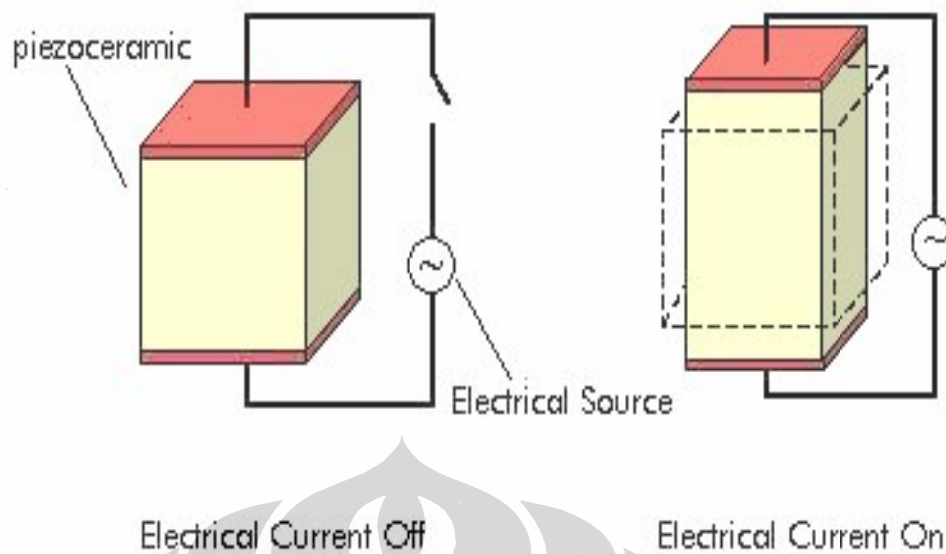
sehingga nilai ekivalen elektrik dari rangkaian mekanikal resonator menjadi :

$$R_x = \frac{c_o}{\eta^2}, \quad L_x = \frac{m}{\eta^2}, \quad C_x = \frac{\eta^2}{k} \quad (3.26)$$

3.3 Piezoelektrik

Efek piezoelektrik mendeskripsikan hubungan antara tekanan mekanis dan tegangan listrik dalam benda padat. Efek ini bersifat reversibel: tekanan mekanis yang diberikan pada material akan menghasilkan tegangan dan tegangan listrik yang diberikan akan mengubah sedikit dimensi benda padat (perubahan volume hingga 4%) seperti terlihat pada gambar 3.11. Dalam fisika, efek piezoelektrik dapat disebut sebagai tautan antara bidang elektrostatis dan mekanis.

Efek piezoelectric terdapat dalam dua domain, yaitu efek piezoelectric langsung (*direct piezoelectric effect*) dan *reverse piezoelectric effect*. *Direct piezoelectric effect* menggambarkan kemampuan material untuk mengubah tegangan mekanik menjadi muatan listrik, sedangkan *reverse piezoelectric effect* (*converse piezoelectric effect*) menggambarkan kemampuan material untuk mengubah potensial listrik yang terjadi menjadi energi mekanik. *Direct piezoelectric effect* dapat difungsikan sebagai sensor sedangkan *reverse piezoelectric effect* dapat difungsikan sebagai aktuator. Ketika material mengalami *deformasi* atau ketegangan, tegangan listrik dapat diperoleh di sepanjang permukaan material melalui elektroda.



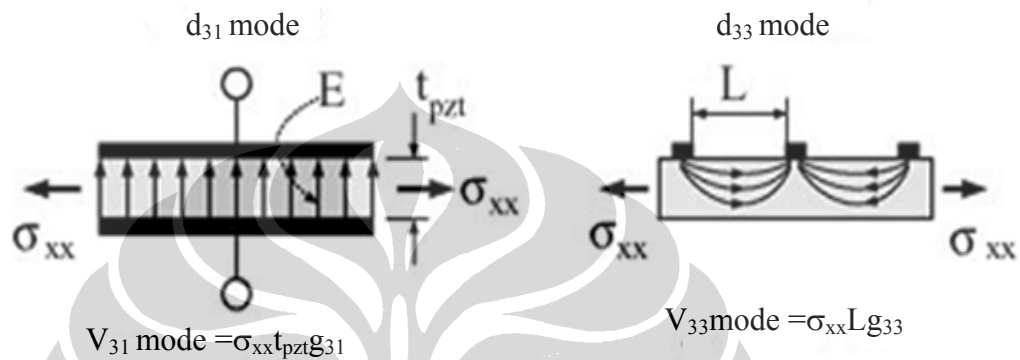
Gambar 3.11 Dampak Tegangan Listrik pada Material Piezoelektrik [36]

Seluruh bahan material piezoelectric mempunyai komposisi *dipole* listrik (kutub positif dan kutub negatif) yang berorientasi secara random yang tidak mempunyai pusat simetri, namun ketika terdapat medan listrik yang sangat kuat, *dipole* listrik akan mampu untuk menyesuaikan relatif terhadap medan listrik. Proses tersebut dikenal sebagai *poling* (pengkutuban). Dan ketika suatu tekanan mekanik diterima oleh kristal piezoelektrik bentuk simetris dari tiap-tiap muatan listrik tersebut berubah menjadi tidak simetris yang akan menghasilkan tegangan listrik. Berdasarkan arah datangnya tekanan, terdapat tiga operasi yang dapat dilakukanyaitu *transverse effect*, *longitudinal effect*, dan *shear effect*.

Berbagai variasi teknik telah diterapkan untuk mempelajari mode planar orthotropik pelat persegi panjang elastis dan piezoelektrik. Telah ditemukan bahwa pelat dapat mendukung 4 tipe *contour extensional modes*: *diagonal-shear* (diagonal-geser), *dilation type* (tipe dilatasi), *flexure along the major axis* (lentur sepanjang sumbu utama) dan *flexure along the minor axis* (lentur sepanjang sumbu minor). [36]

Sebuah struktur resonator dirancang untuk menghasilkan tegangan pada film tipis piezoelektrik sebagai balok bergetar. Ada dua mode piezoelektrik d31 dan d33, yang umumnya digunakan dalam transduser piezoelektrik. Gambar 3.12

tampak pemotongan melintang dari kedua mode piezoelektrik. Keduanya dibedakan oleh apakah arah medan listrik tegak lurus terhadap arah tegangan masukan (d_{31}) atau sejajar dengan arah tegangan masukan (d_{33}). Berdasarkan teknologi piezoelektrik beberapa besaran fisika dapat diukur, yang paling umum adalah tekanan dan kecepatan.



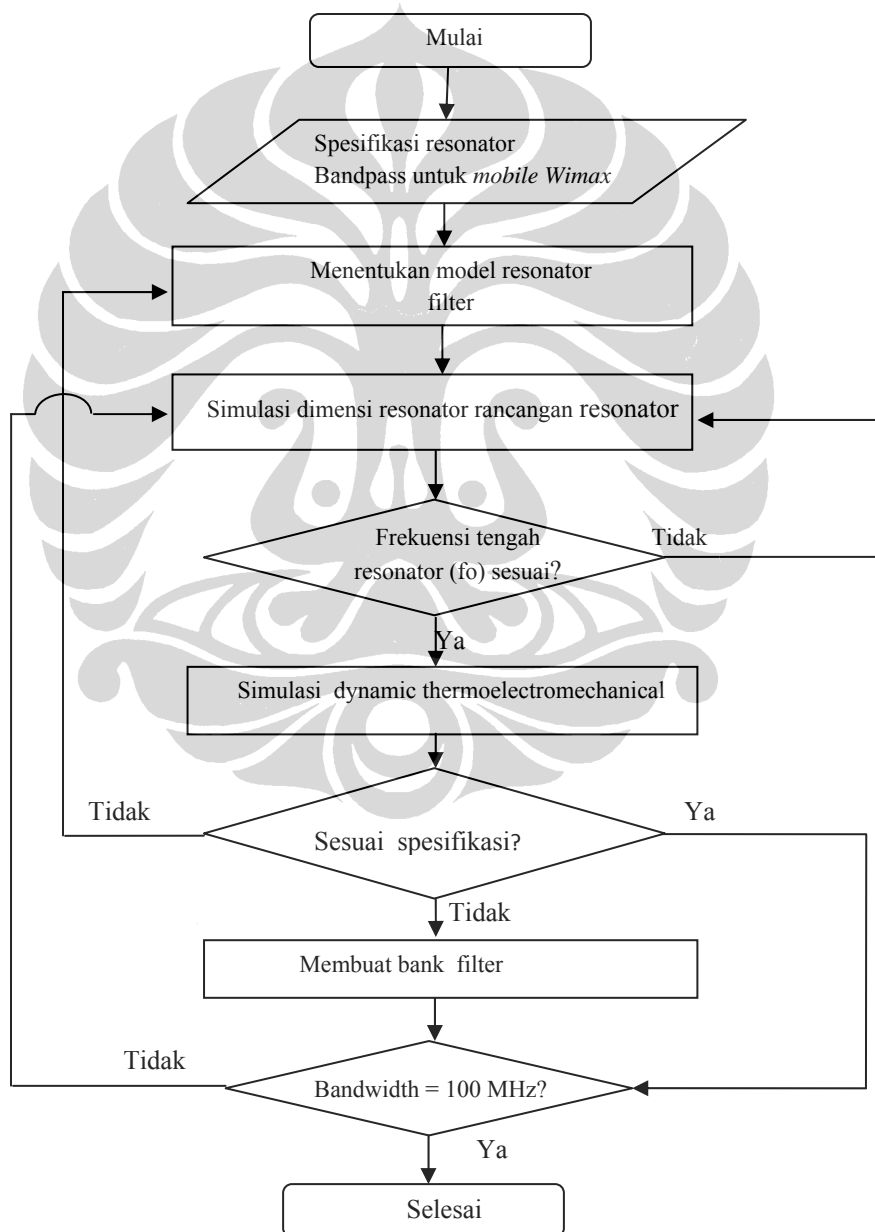
Gambar 3.12. Dua mode konversi piezoelektrik dari masukan tekanan mekanis.[36]

BAB 4

PERANCANGAN RESONATOR FILTER BANDPASS MENGUNAKAN MEMS RSG

4.1 Tahapan Perancangan Resonator

Pada bagian ini akan dibahas mengenai langkah-langkah perancangan resonator filter yang dilakukan adalah sebagai berikut :



Gambar 4.1 Diagram Alir Perancangan

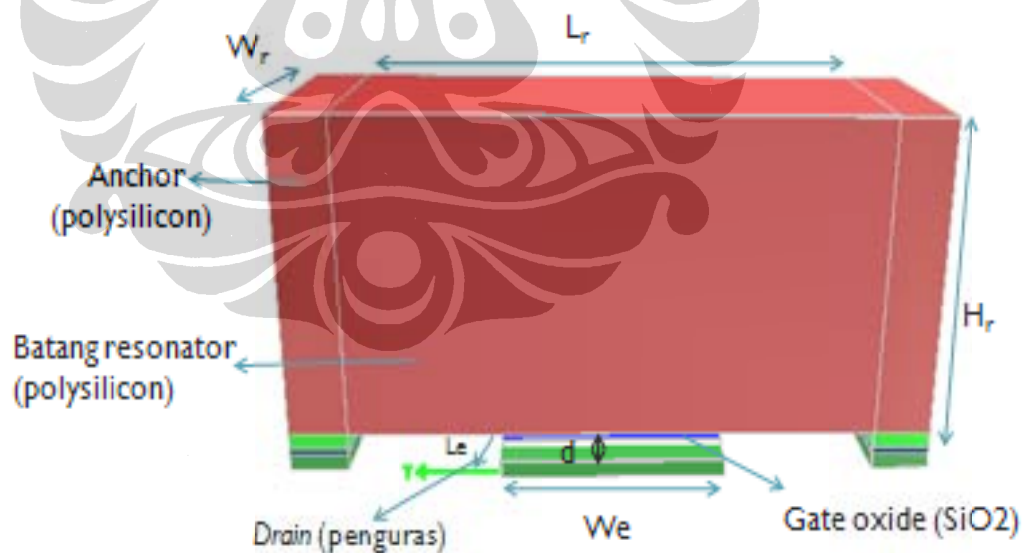
4.2 Spesifikasi Bandpass Filter

Spesifikasi bandpass filter didasarkan kepada spesifikasi standar WiMAX IEEE 802.16e yang diaplikasikan di Indonesia pada frekuensi kerja 2,3 GHz dengan rentang pita frekuensi 2,300 -2,400 GHz .

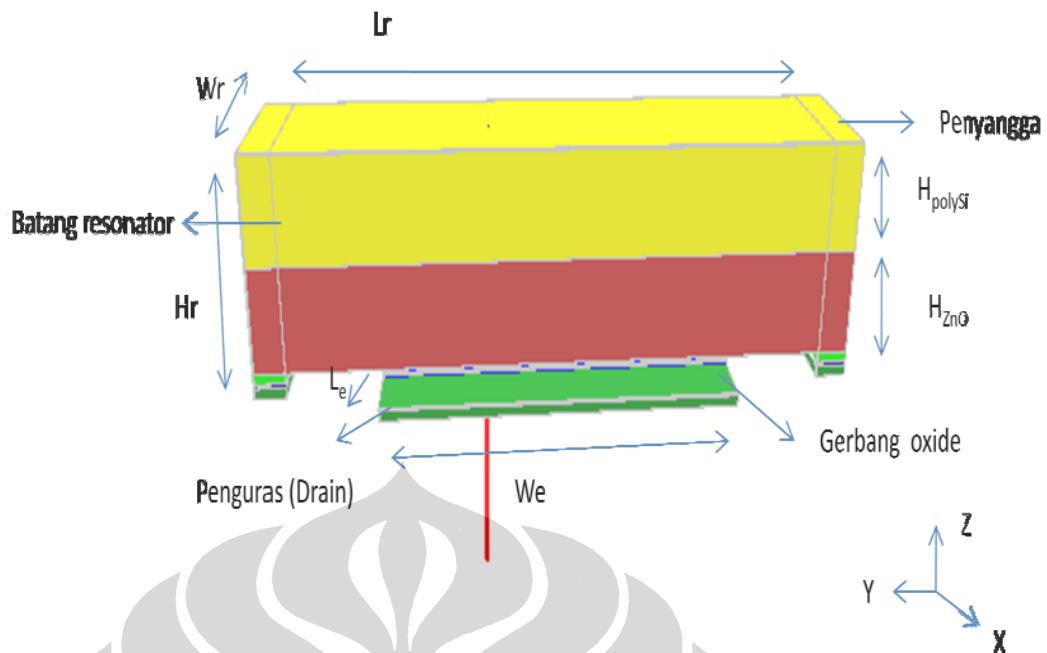
Bandpass filter RF dalam sistem penerima RF *mobile* WiMAX baik yang menggunakan arsitektur *superheterodyne* maupun *direct-convention* berada tepat setelah antenna dengan spesifikasi filter seperti pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Spesifikasi resonator BPF *mobile* WiMAX pada frekuensi 2,3 GHz[13]

No	Parameter	Nilai
1	Frekuensi tengah resonansi	2,35 GHz
2	<i>Rentang frekuensi kerja</i>	100 Mhz
3	<i>Channel bandwith</i>	5 MHz
4	Impedansi <i>input</i> dan <i>output</i>	50 ohm



Gambar 4.2 (a) Rancangan Filter RSG MOSFET berbahan polysilicon



Gambar 4.2 (lanjutan) (b) Rancangan Filter RSG MOSFET berbahan polysilicon/ZnO

4.3 Penentuan Model Resonator Bandpass Filter

Pemilihan model MEMS *bandpass filter* didasarkan pada spesifikasi tujuan penelitian ini yaitu untuk mendapatkan resonator yang dapat menghasilkan frekuensi resonansi tengah 2,35 GHz sehingga dapat digunakan sebagai resonator bandpass filter untuk aplikasi *mobile WiMAX* pada frekuensi 2,3 GHz.

Untuk mencapai frekuensi tinggi, resonator yang digunakan harus kaku, akibatnya perpindahan mekaniknya menjadi sangat kecil sehingga sulit mendeteksi perpindahan resonator saat beresonansi dengan menggunakan pendeteksi kapasitansi klasik. Keterbatasan ini dapat ditanggulangi dengan mendeteksi variasi kapasitans menggunakan prinsip arsitektur MOSFET [4], oleh karena itu digunakan model resonator *suspended gate* (RSG) MOSFET. RSG MOSFET pada prinsipnya merupakan sebuah resonator yang dianggap sebagai *mobile gate* yang bergetar diatas daerah source (sumber), daerah saluran arus (*channel*) dan daerah penguras (*drain*) dari bagian deteksi MOSFET, sehingga keluar dari resonator dapat langsung dikuatkan oleh pendeteksi MOSFET. Dengan demikian model ini diharapkan dapat menjadi cikal bakal piranti filter+LNA (*low noise amplifier*) yaitu suatu perangkat yang dapat

memfilter frekuensi dengan noise yang kecil kemudian sinyal keluaran filter dikuatkan oleh MOSFET yang tergabung dalam satu alat.

Model batang resonator yang digunakan adalah *clamped-clamped* resonator yaitu model resonator yang masing-masing ujungnya ditahan oleh sebuah penyangga, sehingga memungkinkan untuk mendapatkan resonator yang lebih kaku dibanding dengan model *cantilever*, *guided-end* dan *free-free resonator*.

4.4 Proses Simulasi

Proses simulasi rancangan menggunakan *software Intellisuite* yaitu suatu program simulasi dengan analisa pendekatan FEM (*finite element methods*), dimana struktur obyek (domain) dibagi menjadi elemen-elemen kecil (subdomain) dengan dimensi hingga (*finite*). Elemen-elemen tersebut terbagi antara satu dengan yang lain melalui titik pertemuan yang disebut *nodes* atau titik-titik nodal. untuk mensimulasikan perubahan bentuk (*deformasi*) resonator .

4.4.1 Pembuatan Model Resonator Bandpass Filter

Tahap pertama adalah tahap pembuatan model resonator bandpass filter dengan menggunakan 3D builder disertai dengan ukuran dimensi dari resonator.

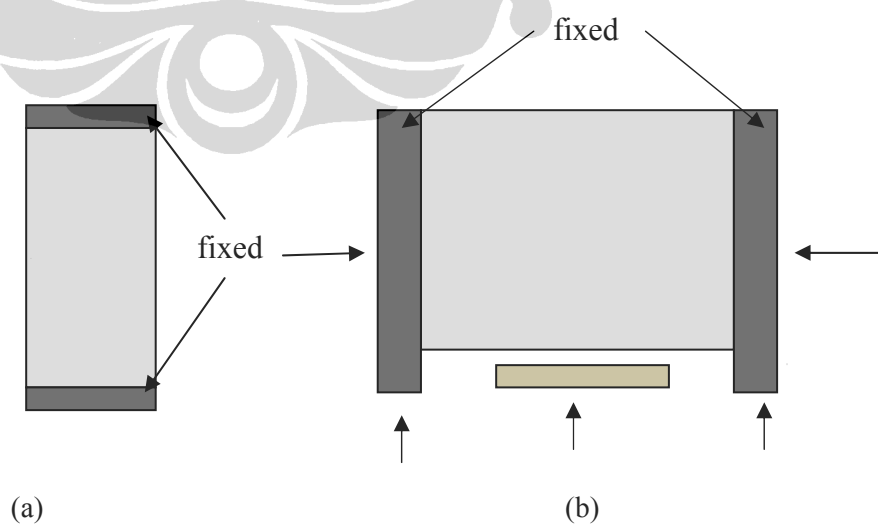
Berdasarkan teori filter mikromekanikal bahwa karakteristik resonator dipengaruhi oleh beberapa parameter masukan yaitu dimensi, struktur material yang dipilih, permitivitas material, kerapatan massa dan sebagainya. Maka parameter-parameter masukan rancangan yang akan diubah dan dioptimalkan untuk mendapatkan hasil sesuai spesifikasi teknik yang diharapkan adalah tebal, lebar, dan panjang batang resonator untuk melihat pengaruh perubahan dimensi dan perubahan massa terhadap frekuensi tengah resonansi yang dihasilkan oleh batang resonator. Dimensi resonator didapat dengan melakukan pendekatan rumus 3.4 dan melakukan simulasi dengan *software intellesuite*, serta dianalisis hasilnya kemudian di cari ukuran yang paling optimum, dengan mempertimbangkan beberapa aspek antara lain kemudahan dalam hal fabrikasi nantinya. Desain resonator bandpass filter terlihat pada Gambar 4.2

4.4.2 Simulasi Frekuensi ThermoElectroMechanical

Tahap berikutnya adalah dengan memasukkan model 3D *builder* ke dalam *ThermoElectroMechanical* dengan cara memilih menu *file>>output to analysis module>>thermoelectromechanical*. Struktur resonator bandpass filter yang telah dimasukkan ke dalam simulator ini akan disimpan dalam file dengan ekstensi *nama_file.savenya*.

Untuk simulasi dengan menggunakan *thermoelectromechanical* ada tiga macam simulasi yang dapat dipilih yaitu *static*, *frequency* dan *dynamic*. Untuk tahap pertama dalam simulasi *thermoelectromechanical* adalah simulasi untuk mengetahui pengaruh dimensi resonator filter yaitu panjang, lebar dan tebal resonator terhadap frekuensi resonansi. Maka simulasi yang digunakan adalah *frequency>>static stress*

Selanjutnya dalam simulator *ThermoElectroMechanical* akan didefinisikan material dari struktur rancangan. Untuk mengubah parameter bahan pada *ThermoElectroMechanical* dapat dilakukan dengan memilih menu *Material>>Check/Modify*. Setiap lapisan struktur dibuat dengan material yang sama dengan pertimbangan mempermudah dalam proses pabrikan. Tahap awal rancangan batang resonator dibuat dari bahan polysilicon dengan lapisan insulator menggunakan bahan *silicon dioksida* (SiO_2)



Gambar. 4.3 Kondisi *fixed* pada resonator bandpass filter
(a) Tampak atas (b) tampak samping

Tahap berikutnya adalah menentukan bagian dari resonator filter yang akan dijadikan bagian yang *fixed*, dengan menggunakan menu *Boundary>>Fixed* dan memilih permukaan mana yang akan dijadikan bagian yang tidak bergerak. Dalam desain resonator filter yang akan digunakan pada simulasi ini, bagian batang resonator yang akan dijadikan bagian *fixed* adalah semua bagian *anchor* yang berfungsi untuk menjepit kedua batang resonator sehingga dapat diperoleh batang resonator yang lebih kaku. Seperti terlihat pada Gambar 4.3

Setelah semua dilakukan maka analisis dapat dilakukan dengan memilih menu *analysis>>start frequency analysis*. Hasil simulasi ini akan diperoleh nilai frekuensi resonator dari batang resonator yang disimulasi.

4.4.3 Simulasi Dynamic ThermoElectroMechanical

Untuk mengetahui hubungan antara *displacement* resonator sebagai keluaran dari system mekanikal resonator dengan frekuensi resonansi maka kita dapat menganalisis rancangan menggunakan simulasi dynamic pada simulator *thermoelectromechanical* dengan memilih menu *simulation>>simulation setting>>dynamic>>stress/displac (mode based)*. Dari analisis ini akan diperoleh grafik hubungan antara *displacement* dan frekuensi resonator.

4.5 Pembuatan bank filter

Bank filter dibuat dari beberapa resonator filter yang disusun secara parallel untuk mendapatkan besar bandwidth yang diinginkan dengan tambahan RF switch sebagai selektor.