

BAB III

RESONATOR MEMS

3.1 OSILATOR

Osilator adalah suatu rangkaian elektronik yang bekerja sendiri membangkitkan atau memproduksi getaran-getaran listrik berbentuk sinusoidal/nonsinusoidal. Ada banyak jenis osilator, dan banyak konfigurasi sirkuit yang berbeda yang menghasilkan osilasi. Sinyal nonsinusoidal, seperti gelombang persegi banyak digunakan dalam aplikasi pewaktu dan kontrol dan sinyal gergaji umumnya ditemukan dalam rangkaian osiloskop. Osilator dengan gelombang sinusoidal digunakan dalam berbagai aplikasi, misalnya dalam peralatan elektronik seperti radio, dalam peralatan ukur (seperti analisa jaringan dan sinyal generator), dan peralatan telekomunikasi (sistem nirkabel) [25].

Osilator secara umum dapat diklasifikasikan ke dalam dua kelompok: osilator relaksasi dan osilator harmonik. Sebuah osilator relaksasi cenderung memiliki karakteristik kandungan derau fase yang kecil dan harmonik tinggi. Sebuah osilator harmonik adalah kemampuan untuk menghasilkan sinyal mendekati sinusoidal dengan derau fase yang baik dan kemurnian spektrum yang tinggi. Osilator harmonik biasanya menggunakan sirkuit resonan LC, kristal, atau resonator MEMS untuk menghasilkan frekuensi osilasi.

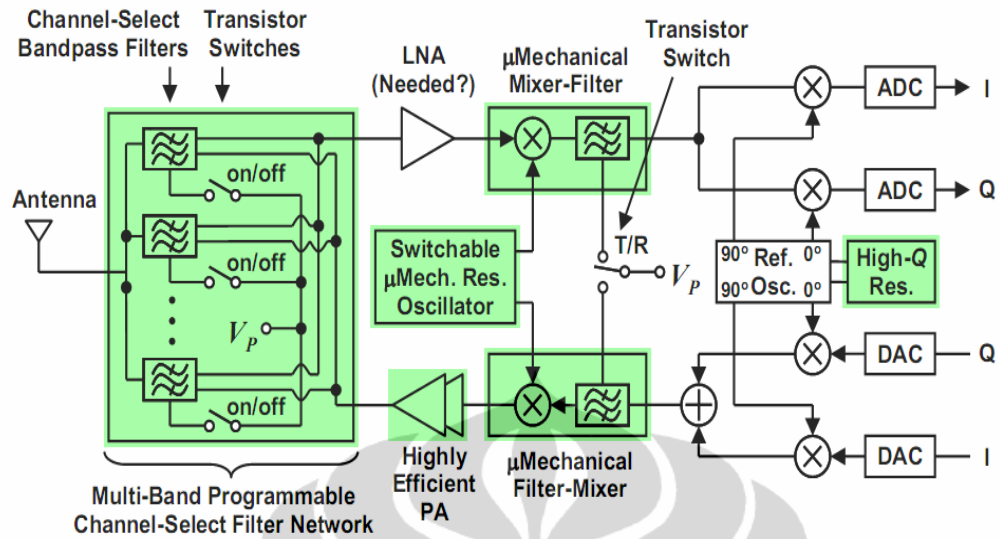
Osilator umumnya bekerja berdasarkan prinsip umpan balik (feedback) artinya umpan balik diperlukan untuk mempertahankan osilasi. Sirkuit ini memiliki peran yang sangat penting dalam peralatan telekomunikasi modern dan dapat digunakan pada semua perangkat yang membutuhkan frekuensi baik pemancar atau penerima, atau keduanya (transceiver). Osilator biasanya digunakan dalam penerima dan pemancar sehubungan dengan mixer apabila sinyal radio tersebut memerlukan konversi frekuensi baik keatas maupun kebawah. Beberapa osilator beroperasi hanya pada satu frekuensi, dan karena itu tidak memerlukan kontrol, namun bila menggunakan banyak frekuensi dan untuk mendapatkan performansi yang tinggi harus dilengkapi dengan sirkuit kontrol. Dalam rencana desain MEMS resonator untuk osilator WiMAX ini hanya bekerja pada satu frekuensi, yakni 2.3 GHz [2].

3.2 *MICRO-ELECTROMECHANICAL SYSTEM (MEMS) RESONATOR*

Istilah *micro-electromechanical systems* (MEMS) mengacu pada sekumpulan mikrosensor dan aktuator yang dapat mengindra lingkungannya serta dapat memberikan reaksi terhadap perubahan pada lingkungan dengan menggunakan suatu pengendali *microcircuit* [6]. Sistem ini mencakup, selain kemasan mikroelektronika, struktur antena yang terintegrasi untuk memberi sinyal-sinyal perintah pada struktur elektromekanis mikro untuk fungsi sensor dan aktuator yang diharapkan. Sistem ini juga membutuhkan suplai daya mikro, relay mikro dan unit pemroses sinyal mikro. Komponen-komponen mikro membuat sistem lebih cepat, handal, murah dan mampu menjalankan fungsi-fungsi yang lebih kompleks.

Pada awal tahun 1990-an, MEMS muncul bersama bantuan pengembangan proses fabrikasi *integrated circuit* (IC), dimana sensor, aktuator dan fungsi-fungsi kontrol dikofabrikasi dalam silikon. Sejak saat itu, kemajuan riset MEMS sangat pesat karena adanya modal yang kuat dari pemerintah dan dunia industri. Sebagai tambahan dari komersialisasi divais-divais MEMS yang kurang terintegrasi, seperti akselerometer mikro, *inkjet printer head*, cermin-cermin mikro untuk proyeksi, dan lain-lain, konsep dan kelayakan dari divais-divais MEMS yang lebih kompleks telah diusulkan dan didemonstrasikan untuk berbagai aplikasi seperti mikrofluida, *aerospace*, biomedis, analisis kimia, komunikasi nirkabel, penyimpanan data, optik, dan sebagainya [26].

Meskipun bagian resonator μ -mechanical bergetar dan berdiri sendiri, dapat diaplikasikan untuk synthesizer osilator local. Gambar 3.1 memperlihatkan tipikal sebuah rangkaian *transceiver* yang di dalamnya ada bagian osilator yang bisa menggunakan komponen resonator μ -mechanical [27].



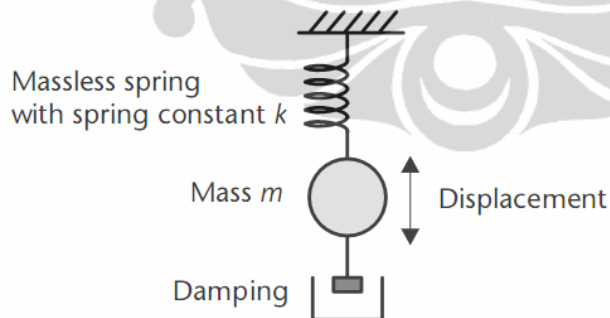
Gambar 3.1. Transceiver dengan sebagian modul yang dapat menggunakan MEMS. [27]

3.2.1 MEMS dasar

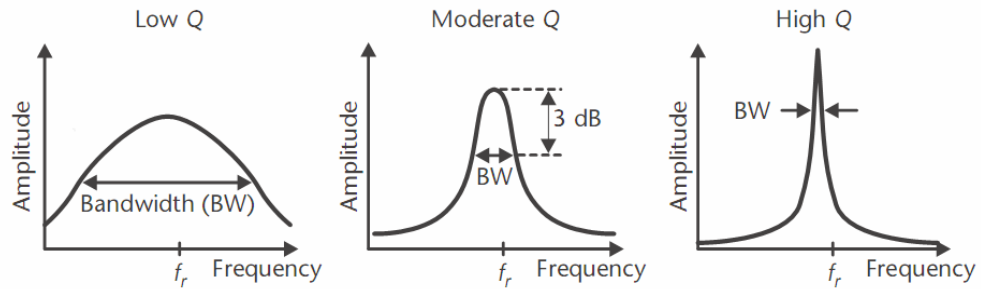
Sebuah sistem mekanis sederhana dan sebuah pegas dengan konstanta pegas k dan massa m memiliki frekuensi resonan :

$$f_r = \left(\frac{1}{2\pi}\right)\sqrt{k/m} \quad (3.1)$$

dimana akan beresilasi secara natural jika massa berubah dan bebas (terlihat pada gambar 3.2) [28].



Gambar 3.2. Ilustrasi sebuah mechanical osilator terdiri dari elemen sebuah pegas, masa dan damping yang merepresentasikan kerugian mechanical [28]



Gambar 3.3. Ilustrasi efek kualitas factor, Q , yang berhubungan dengan amplitudo osilasi dan frekuensi.[28]

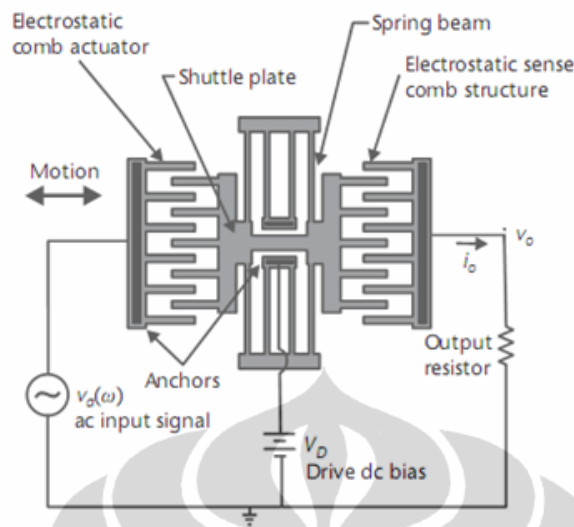
Jika gaya eksternal mengenai massa pada frekuensi resonansi, amplitudo *displacement* akan naik secara cepat sampai dibatasi oleh kerugian dalam sistem pada kondisi *steady state* (kerugian ini dikenal sebagai *damping*). Ketika benda mendapat resonan pada frekuensi di atas atau di bawah frekuensi resonansi, amplitudonya akan mengecil dan puncak amplitudonya tepat pada frekuensi resonansi. Dalam rangkaian electronics hal dapat dianalogikan dengan rangkaian seri atau paralel kombinasi kapasitor dan inductor, dengan tahanan seri kecil. Penentuan faktor kualitas, Q , dari rangkaian listrik atau alat mekanik didefinisikan sebagai rasio dari energi maksimum yang disimpan selama siklus dengan energi yang hilang per siklus [28].

$$Q = \frac{\text{maximum energy stored during cycle}}{\text{energy lost per cycle}} = \frac{\text{resonant frequency}}{\text{bandwidth at } 1/\sqrt{2} \text{ of maximum}} \quad (3.2)$$

Jadi, sirkuit atau perangkat dengan nilai Q yang lebih tinggi akan memiliki respon yang lebih besar (misalnya, *displacement*) ketika mendapat resonan pada frekuensi resonansi (terlihat pada gambar 3.3) [28].

3.2.2 Comb-Drive Resonator

Salah satu desain awal resonator *surface-micromachined* [29], yang sekarang umum digunakan di berbagai perangkat MEMS, adalah struktur comb-drive yang dikembangkan di Universitas California, Berkeley, California (terlihat pada gambar 3.4)



Gambar 3.4. Ilustrasi sebuah resonator *micromachined folded-beam comb-drive*. [28]

Struktur ini terdiri dari *folded springs* pendukung sebuah *shuttle plate* yang berosilasi bolak-balik dan seterusnya pada bidang permukaan wafer. *folded springs* meringankan tegangan residu dan memberikan layout yang lebih kompak. Sebuah tegangan yang diberikan, baik positif atau negatif, menghasilkan suatu kekuatan elektrostatik antara *anchor comb* kiri dan *shuttle comb* yang menarik *shuttle plate* ke kiri pada gambar 3.4. Gaya listrik F_e diberikan oleh :

$$F_e = \frac{1}{2} \left(\frac{dC}{dx} \right) V^2 \quad (3.3)$$

dimana V adalah tegangan yang diberikan, dan $\frac{dC}{dx}$ adalah kecepatan peningkatan dalam kapasitansi sebagai jari tumpang tindih meningkat dan konstan untuk suatu desain yang telah diberikan. Karena tegangan adalah kuadrat, gaya selalu menarik. Bila tegangan ac sinusoidal $v_a \cos(\omega t)$ dicatukan, dimana v_a adalah amplitudo dan ω adalah frekuensi dalam rad/s. Frekuensi resonansi sebagai berikut [28] :

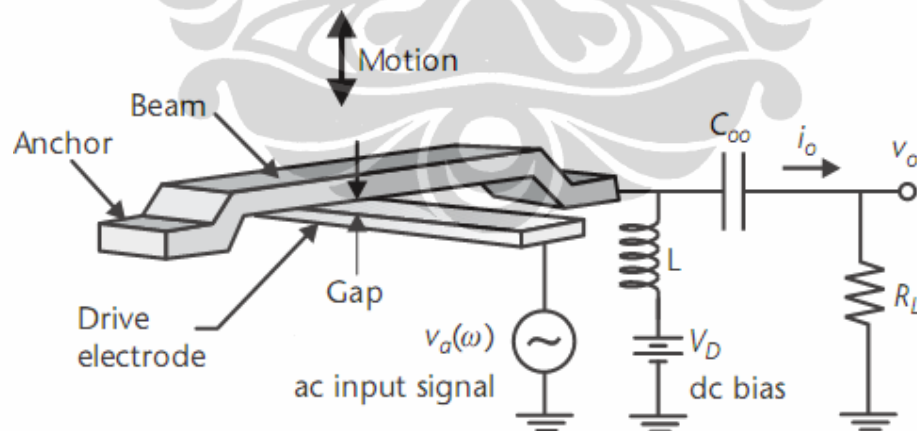
$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{total}}{m_p + 0.25m_c + 0.34m_b}} \quad (3.4)$$

dimana k_{total} , m_p , m_c , dan m_b berturut-turut adalah *system spring* konstan, masa *shuttle*, masa konektor dan masa *spring beams*

3.2.3 Resonator balok (*Resonator beams*)

Untuk membangun struktur micromachined resonansi dengan frekuensi yang lebih tinggi dari sebelumnya, dicapai dengan sebuah *comb-drive*, massa harus diturunkan. Resonator balok telah dipelajari secara ekstensif di Universitas Michigan, Ann Arbor [30, 31], untuk tujuan ini, dan Discera, Inc, Ann Arbor, Michigan, adalah yang meng-komersialisasikan mereka untuk osilator sebagai frekuensi referensi untuk mengganti kristal kuarsa dalam telepon selular. Keuntungannya meliputi [28] : ukuran lebih kecil, kemampuan untuk membangun beberapa frekuensi referensi yang berbeda pada satu chip, frekuensi resonan yang lebih tinggi, frekuensi linier lebih variasi dengan suhu lebih beraneka ragam, dan kemampuan untuk mengintegrasikan sirkuit, baik pada chip yang sama atau pada chip sirkuit terikat MEM chip, semua dengan biaya relatif lebih rendah dibandingkan dengan teknologi tradisional.

Resonator balok yang paling sederhana adalah balok yang dengan kaku dijepit di kedua ujungnya dan digerakkan oleh elektroda yang mendasarinya (terlihat pada gambar 3.5). Sebuah tegangan dc yang dicatukan antara balok dan penggerak elektroda menyebabkan pusat balok itu membelokkan ke bawah; penghilangan catuan memungkinkan untuk pergerakan kembali ke atas.



Gambar 3.5. Ilustrasi sebuah resonator balok dan sebuah tipikal sirkuit untuk mengukur sinyal [28]

Balok dijepit pada kedua ujungnya dengan angkur pada substrat. Kapasitansi antara resonan balok dan penggerak elektroda bervariasi dengan defleksinya

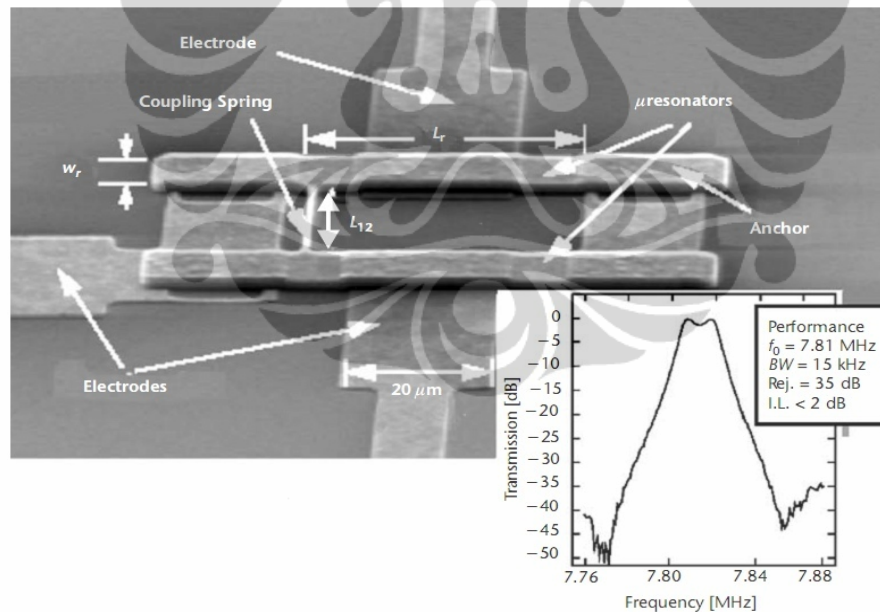
(pembelokannya). Frekuensi resonansi orde pertama dari gambar 3.5 di atas diperoleh :

$$f_r = 1.03 \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{t}{L^2}} \quad (3.5)$$

dimana E , ρ , t dan L berturut-turut adalah Young's modulus, density, ketebalan balok dan panjang balok

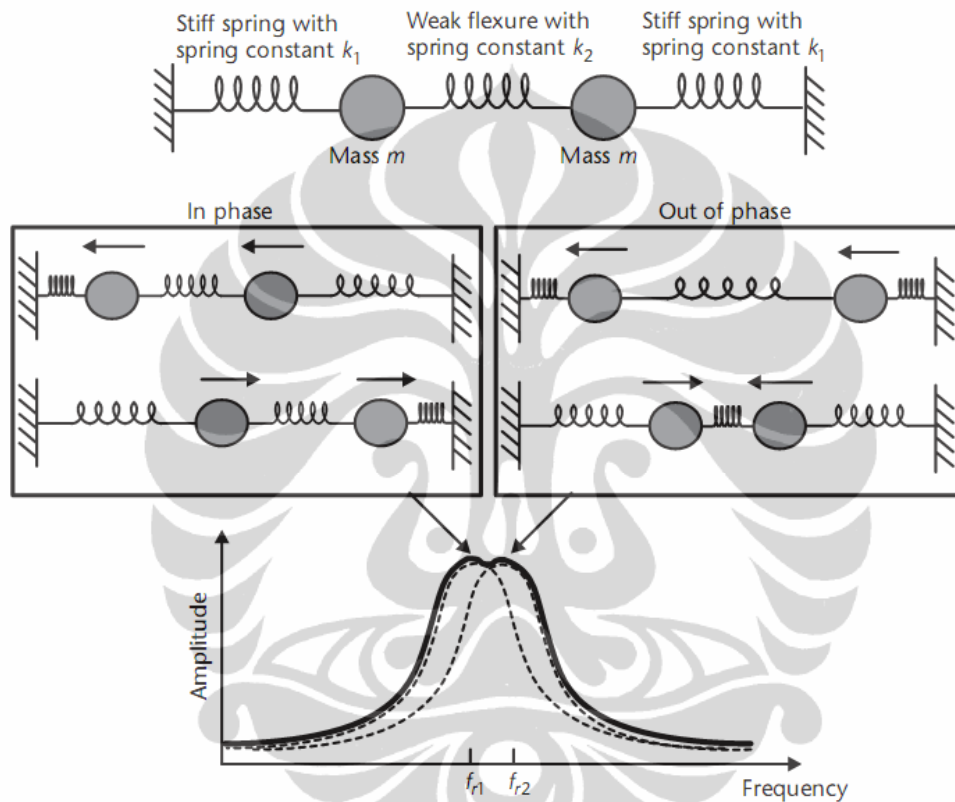
3.2.4 Resonator yang digandeng (*Coupled-Resonator*)

Resonator hanya ditinjau memiliki karakteristik bandpass sangat sempit, membuatnya cocok untuk pengaturan frekuensi dalam rangkaian osilator tetapi tidak untuk filter *bandpass* yang lebih umum. *Bandpass* filter melewati sebuah rentang frekuensi, dengan lengkungan yang curam pada kedua sisinya. Dua atau lebih *microresonators*, baik *comb-drive* atau jenis *clamped-clamped beam*, bisa dihubungkan bersama oleh pegas lemah atau lentur untuk membuat filter bandpass lebih berguna (terlihat pada gambar 3.6).



Gambar 3.6 Scanning elektron mikrograf dari permukaan polysilicon micro-machined bandpass filter yang terdiri dari dua resonator balok terjepit digabungkan oleh pegas sedikit lentur ditengahnya. Eksitasi dan perabaan terjadi antara balok dan elektroda di bawahnya pada permukaan substrat. Ukuran setiap resonator balok panjang $41 \mu\text{m}$, lebar $8 \mu\text{m}$, dan tebal $2 \mu\text{m}$. Kopling panjang $20 \mu\text{m}$ dan lebar $0,75 \mu\text{m}$ [32]

Untuk mem-visualisasikan efek kompleks ini, dapat kita bayangkan dua resonator sederhana secara fisik terpisah tapi sama terdiri dari masa dan pegas. Resonator ini dapat secara bebas berosilasi pada frekuensi alami yang ditentukan oleh masa dan konstanta pegas. Dengan menambahkan kelemahan dan kelenturan pegas yang sesuai antara dua masa (terlihat pada gambar 3.7) membatasi osilasi yang diijinkan dari sistem kedua balok tersebut.



Gambar 3.7. Ilustrasi resonator yang identik, dengan masing-masing masa dan pegas digabungkan oleh pegas sedikit lentur yang sesuai ditengahnya. Sistem ini mempunyai 2 mode osilasi resonan, untuk gerakan sefase dan beda fase, menghasilkan sebuah karakteristik *bandpass*. [28]

Kedua massa dapat bergerak baik dalam sefase atau beda fase dengan menghormati satu sama lain, hal ini adalah modus osilasi dua system. Ketika yang bergerak dalam fase yang sama, tidak ada perpindahan relatif antara dua massa dan akibatnya tidak mengembalikan gaya dari sedikit kelenturannya. Frekuensi osilasi dari mode yang pertama ini selanjutnya sama dengan frekuensi alami dari resonator tunggal. Ketika dua massa bergerak beda fase dengan menghormati satu

sama lain, namun, perpindahannya kearah yang berlawanan dengan segera setiap waktu. Gerakan ini menghasilkan perpindahan relatif terbesar di kopling lentur, sehingga menghasilkan gaya pemulih, yang menurut hukum kedua Newton, menyediakan frekuensi osilasi yang lebih tinggi. Kopling secara fisik dari dua massa secara efektif membagi dua frekuensi resonansi yang saling tumpang tindih (dari dua resonator yang identik) menjadi dua frekuensi yang berbeda, dengan beda separasi frekuensi tergantung pada kekakuan dari kopling lentur. Frekuensi yang dihasilkan akibat peng-kopel-an dua resonator sebagai berikut :

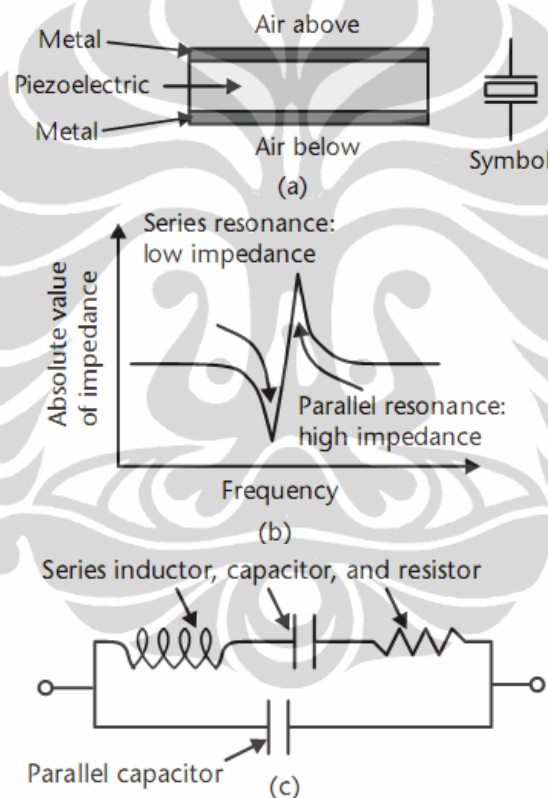
$$f_{r1} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_1}{m}} ; \quad f_{r2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_1 + 2k_2}{m}} \quad (3.6)$$

Dalam fisika, dikatakan bahwa kopling mengangkat degenerasi dari mode osilasi. Untuk sebuah kopling pegas yang sangat kompatibel, dua frekuensi terpisah cukup dekat satu sama lain bahwa keduanya secara efektif membentuk *passband* sempit. Peningkatan jumlah osilator terkopel dalam rantai linier memperluas lebar *passband* ini, tetapi juga meningkatkan jumlah riak. Secara umum, jumlah mode osilasi sama dengan jumlah osilator terkopel dalam rantai tersebut.

3.2.5 *Film Bulk Acoustic Resonators*

Cara lain untuk membuat resonan frekuensi *microelectromechanical* adalah dengan menggunakan bahan piezoelektrik. Dengan cara mengapit sebuah bahan piezoelektrik dengan elektroda dan rugi energi mekanis yang rendah antara dua elektroda, resonator yang dibuat [terlihat pada gambar 3.8(a)]. Ketika suatu sinyal ac dicatukan di seluruh piezoelektrik, gelombang akustik merambat dengan kecepatan suara dalam materi dan menghasilkan osilasi. Jika bagian atas dan bawah permukaan perangkat ini udara atau vakum, ada sebuah ketidakcocokan impedansi akustik, dan gelombang tersebut dipantulkan kembali dan sebagainya melalui ketebalan. Ketika panjang gelombang akustik sama dengan dua kali ketebalan, gelombang berdiri terbentuk (resonansi mekanis) dan impedansi listrik rendah [terlihat pada gambar 3.8(b)]. Respons frekuensi perangkat seperti ini biasanya dimodelkan dengan menyederhanakan rangkaian R-L-C ditunjukkan pada gambar 3.8(c).

Induktansi dan kapasitansi seri dalam model mewakili energi kinetik dari massa bergerak dan energi yang tersimpan berturut-turut akibat kompresi dan perluasan materi, sedangkan resistor seri merupakan rugi energi. Resistensi ini relatif kecil dengan desain dan proses yang baik, memungkinkan faktor kualitas Q lebih dari 1.000 di perangkat produksi. Ada juga kapasitansi listrik yang signifikan antara plat, yang diwakili oleh kapasitor paralel. Kapasitor dan induktor seri dalam sistem ini memiliki sebuah resonansi seri - impedansi rendah seperti pada gambar 3.8(b). Karena kapasitor paralel, sistem juga meramalkan secara terpisah, resonansi paralel - impedansi tinggi seperti pada gambar 3.8(b).


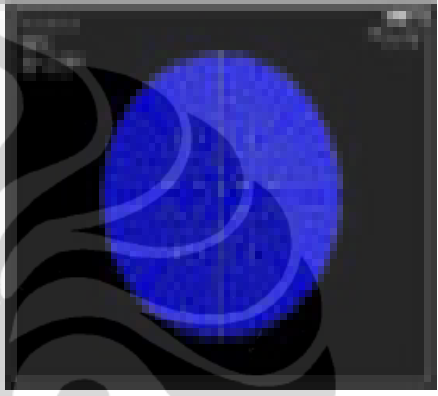
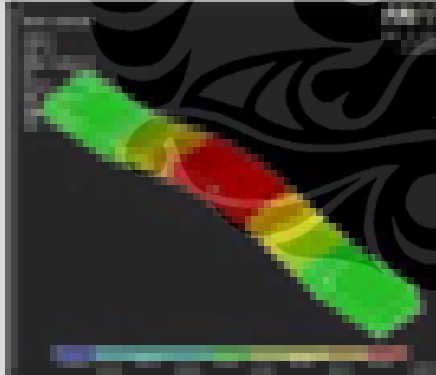
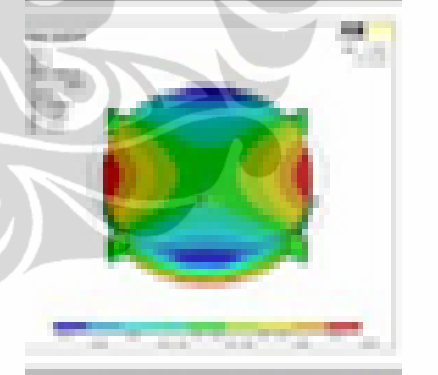


Gambar 3.8. Film bulk acoustic resonator (FBAR): (a) potongan melintang sebuah FBAR dan simbol; (b) impedansi versus frekuensi sebuah individual FBAR; (c) ekuivalen rangkaian listrik.[28]

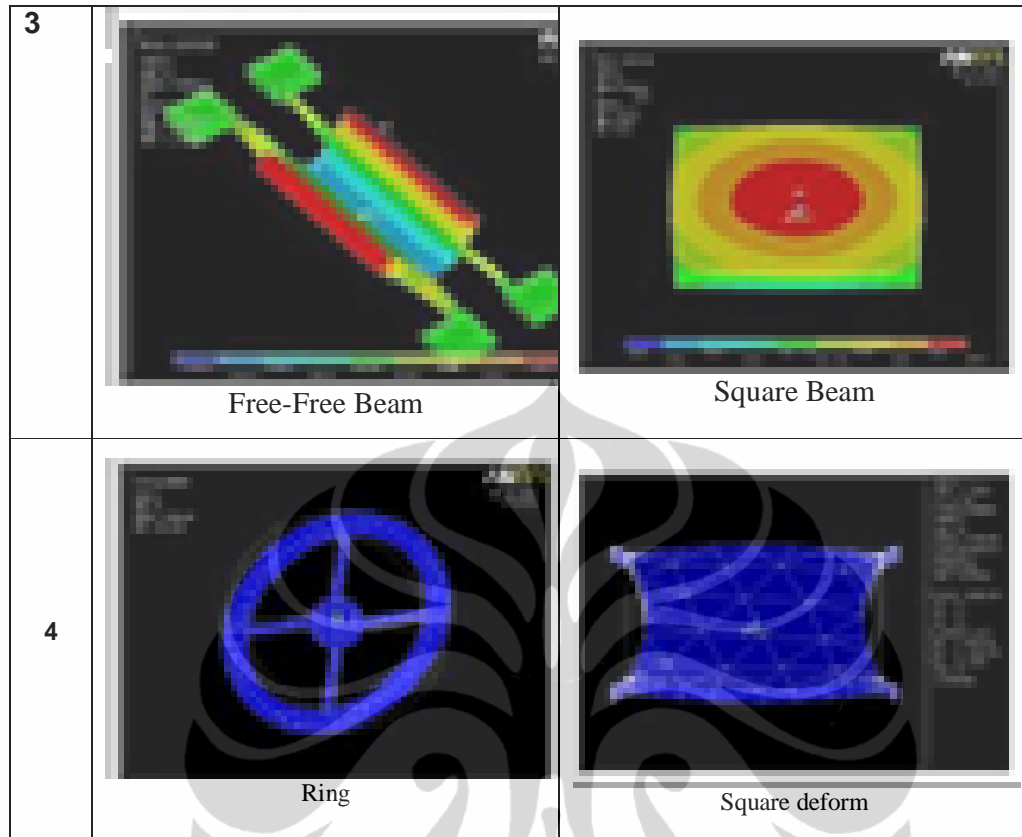
3.3 OSILATOR MEMS

Tulisan ini akan menjelaskan pertama MEMS resonator dapat digunakan untuk frekuensi referensi sistem elektronik, mulai dari operasi perangkat silikon resonator, level teknologi kemasan wafer, dengan keandalan kapasitas proses

manufaktur. Kedua, MEMS osilator dibandingkan dengan osilator kristal kuarsa dalam hal jitter, konsumsi daya, dan stabilitas suhu. Terakhir, untuk memastikan kinerja yang baik pada real aplikasi elektronik, osilator MEMS silikon tidak hanya telah lulus tes keandalan standar JEDEC seperti penuaan, *solder reflow*, *thermal shock*, dan *autoclave*, tetapi juga sudah dibuktikan di beberapa sistem elektronik termasuk kinerja tinggi camcorder [33].

No	Mode <i>Flexure</i>	Mode <i>Bulk</i>
1	 <p data-bbox="565 1024 732 1056"><i>Folded Beam</i></p>	 <p data-bbox="995 1024 1239 1056"><i>Disk Contour Mode</i></p>
2	 <p data-bbox="500 1461 805 1493">Clamped-Clamped Beam</p>	 <p data-bbox="987 1461 1255 1493">Disk Wineglass mode</p>

Gambar 3.9 Matrik micromechanical resonator & bentuk mode getarannya [33].



Gambar 3.9 (Lanjutan) Matrik micromechanical resonator & bentuk mode getarannya [33].

Desain resonator untuk aplikasi osilator dapat dikategorikan berdasarkan mode getaran - pada dasarnya modus *flexure* dan modus *bulk acoustic*. Seperti ditunjukkan dalam gambar 3.9, modus *flexure* termasuk *folded beam*, *clamped-clamped beam*, *free-free beam*, dan *ring resonator*. Biasanya resonator modus *flexure* frekuensi kurang dari 100 MHz karena keterbatasan kekakuan mekanis resonator. Oleh karena itu resonator modus *bulk acoustic* menjadi salah satu kunci untuk mendorong frekuensi resonator di atas 100 MHz bahkan bisa sampai 5 Ghz. Jenis resonator meliputi resonator disk dengan kedua modus *contour* dan *wineglass*, dan resonator persegi dengan modus ekstensi dan deformasi.

Osilator dalam sistem nirkabel terdapat dua konteks: referensi frekuensi stabil yang berdiri sendiri dan osilator tegangan yang dikontrol (VCOs) yang membentuk bagian dari fase-terkunci synthesizer loop (PLL). Secara tradisional, osilator yang terbaik, berdasarkan ukuran kemurnian spektrum derau fase,

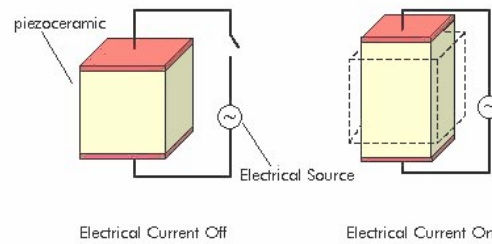
menggunakan kristal kuarsa resonator [4]. Sayangnya, sejak resonator kuarsa tidak dapat diintegrasikan (*integrable*) dengan proses konvensional sirkuit terpadu, hal ini harus dibawa sebagai eksternal komponen yang tidak menyatu dalam satu chip (*off-chip*). Di sisi lain, sebagian besar komponen dalam VCO adalah *integrable*, kecuali untuk varactor tersebut. Sejak komponen *off-chip* berkontribusi untuk sistem yang lebih mahal, penelitian di bidang pengembangan RF *on-chip* resonator MEMS^Â berbasis varactors baru-baru ini diterima cukup baik. Pada bagian ini pembahasan dibatasi hanya meliputi sebuah *micromechanical* osilator.

Terdapat kebutuhan signifikan akan resonator sebagai pembangkit frekuensi untuk osilator berukuran kecil, berharga murah, serta memiliki unjuk kerja yang relatif tinggi pada frekuensi operasi 2.3 GHz untuk osilator WiMAX. Osilator tradisional (*lumped* elemen) yang pada umumnya berukuran besar dan relatif kompleks merupakan penghambat dalam miniaturisasi sistem. Untuk divais-divais yang bekerja berdasarkan mode-mode elektromagnetik, hal tersebut akan menyebabkan penghambat dalam miniaturisasi sistem secara keseluruhan.

Oleh karena itu, penelitian mengenai respons piezoelektrik dari material-material tertentu yang menghasilkan frekuensi resonansi memungkinkan pembuatan resonator yang ukurannya lebih kecil. Teknologi ini memungkinkan produksi dari resonator yang ukuran sisinya dapat mencapai beberapa puluh mikron. Selain itu, proses yang digunakan untuk manufaktur divais-divais tersebut akan membuat resonator dapat diproduksi pada *wafer* [6].

3.3.1 Piezoelektrik

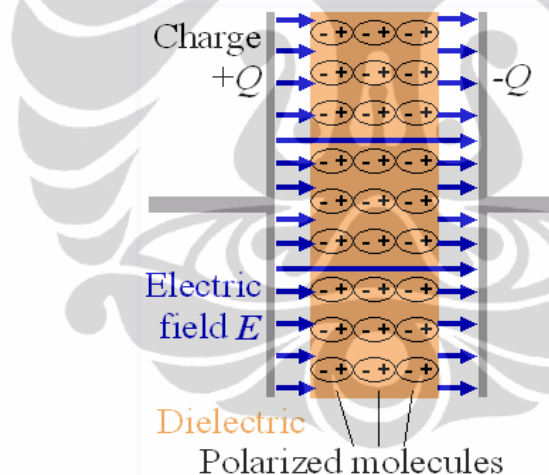
Efek piezoelektrik mendeskripsikan hubungan antara tekanan mekanis dan tegangan listrik dalam benda padat. Efek ini bersifat reversibel: tekanan mekanis yang diberikan pada material akan menghasilkan tegangan dan tegangan listrik yang diberikan akan mengubah sedikit dimensi benda padat (perubahan volume hingga 4%, terlihat pada gambar 3.10). Dalam fisika, efek piezoelektrik dapat disebut sebagai tautan antara bidang elektrostatis dan mekanis.



Gambar 3.10 Dampak Tegangan Listrik pada Material Piezoelektrik [34]

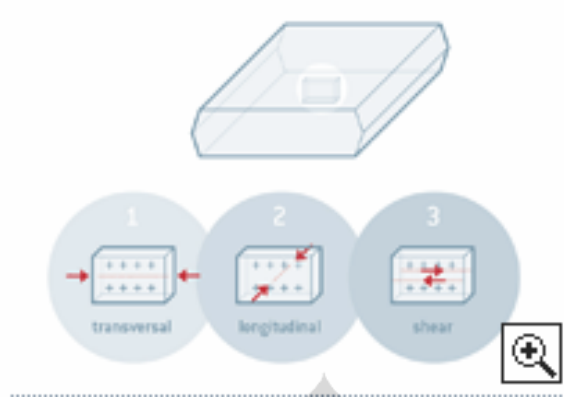
Contoh dari efek piezoelektrik adalah kristal *lead zirconatetitanate* yang akan mengalami perubahan dimensi sampai maksimal 0.1 % jika diberi tegangan listrik.

Pada sebuah kristal piezoelektrik, muatan listrik positif dan muatan listrik negatif adalah terpisah, namun tersebar secara simetris. Sehingga secara keseluruhan kristal bersifat netral (terlihat pada gambar 3.11).



Gambar 3.11 Penyebaran Muatan Listrik dari Kristal Piezoelektrik [34]

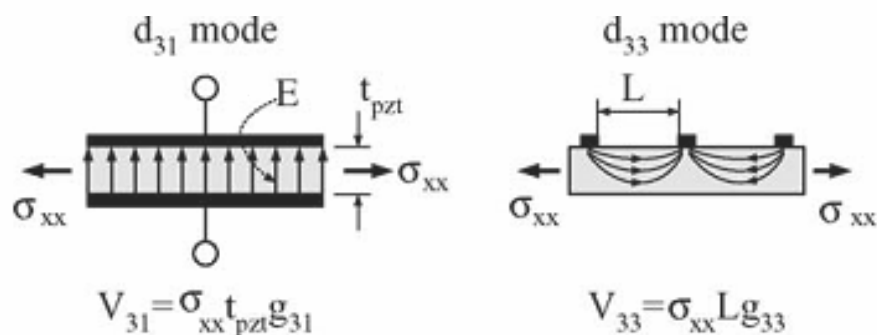
Masing-masing sisi membentuk kutub listrik. Dan ketika suatu tekanan mekanik diterima oleh kristal piezoelektrik bentuk simetris dari tiap-tiap muatan listrik tersebut berubah menjadi tidak simetris yang akan menghasilkan tegangan listrik. Sebagai contoh, 1 cm kubik kristal quartz dengan tekanan mekanik sebesar 2000 Newton akan menghasilkan tegangan listrik sebesar 12500 Volt. Berdasarkan arah datangnya tekanan, terdapat tiga operasi yang dapat dilakukan yaitu *transverse effect*, *longitudinal effect*, dan *shear effect* (terlihat pada gambar 3.12).



Gambar 3.12 *Transverse Effect, Longitudinal Effect & Shear effect* [34]

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). [35]

Sebuah struktur resonator dirancang untuk menghasilkan tegangan pada film tipis piezoelektrik sebagai balok bergetar. Ada dua piezoelektrik mode d31 dan d33, yang umumnya digunakan dalam transduser piezoelektrik. Gambar 3.13 tampak pemotongan melintang dari kedua mode piezoelektrik. Keduanya dibedakan oleh apakah arah medan listrik tegak lurus terhadap arah tekanan mekanik (mode d31) atau sejajar dengan arah tekanan mekanik (mode d33).



Gambar 3.13. Dua mode konversi piezoelektrik dari masukan tekanan mekanis.[36]

Berdasarkan teknologi piezoelektrik beberapa besaran fisika dapat diukur, yang paling umum adalah tekanan dan kecepatan.

Piezoelektrisitas adalah efek gabungan dari sifat elektris bahan yaitu: fluks listrik, permitivitas listrik, medan listrik dan Hukum Hooke [34]

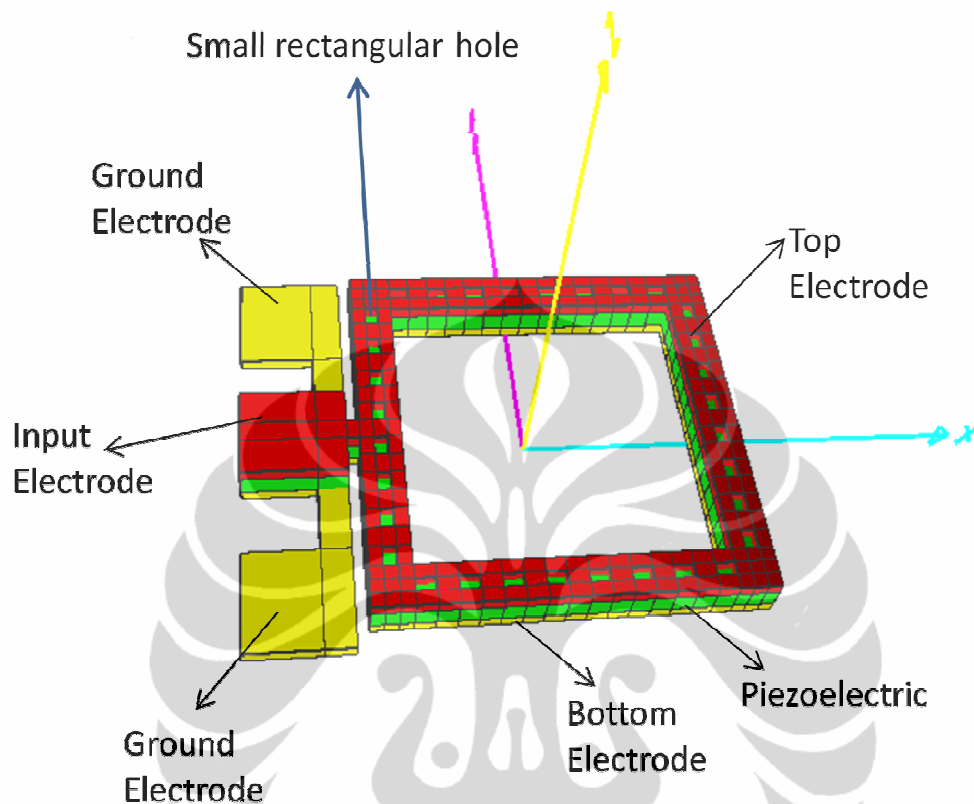
3.3.2 Prinsip kerja *Contour-mode MEMS Resonator Piezoelectric*

Sebuah resonator yang dibentuk dari piezoelektrik yang diapit oleh kedua elektroda baik bagian atas maupun bawah, bila diberikan catuan tegangan listrik pada kedua bidang lateral elektroda tersebut akan menghasilkan getaran dengan modus bulk acoustic dan *displacement* dengan nilai terbesarnya tepat pada frekuensi resonansinya. [35]

Contour-mode dari getaran adalah dibangkitkan pada sumbu-c piezoelektrik film melalui koefisien d_{31} piezoelektrik. Dengan menerapkan medan listrik bolak-balik melintasi ketebalan film piezoelektrik, struktur MEMS mengembang dan berkontraksi secara lateral dan dapat dibangkitkan pada getaran resonan dimana frekuensinya ditentukan oleh dimensi bidang perangkat. Frekuensi getaran umumnya ditentukan oleh lebar dari strukturnya, sedangkan dimensi yang kedua dapat digunakan untuk mengontrol ekivalen *motional* resistansi dan kapasitansi statis perangkat. Pengaturan Frekuensi melalui teknik litografik memungkinkan definisi pelipatgandaan frekuensi perangkat pada substrat yang sama dan secara drastis mengurangi toleransi manufaktur pada ketebalan film (dengan 10x) yang bukannya saat ini dituntut dengan penyediaan secara komersial teknologi seperti FBARs dan *shear* resonator kuarsa. [24].

MEMS Osilator seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.14 terdiri dari bahan piezoelectric diapit elektroda polysilicon atas dan bawah. Dibandingkan dengan [35], desain geometri sedikit dimodifikasi dengan membuat lubang persegi kecil $6 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ sepanjang balok *ring* dan hasilnya akan dianalisis dengan bentuk balok yang tidak berlubang. Output yang diinginkan dari osilator adalah menghasilkan frekuensi 2,3 GHz sesuai peraturan Menteri Kominfo Republik Indonesia untuk implementasi WiMAX. Dengan meniru referensi [35], akan dicoba untuk dieksplorasi lebih lanjut sampai mendapatkan hasil yang diinginkan sesuai perencanaan desain. Desain akan divariasikan dalam berbagai

ukuran, khususnya ketebalan piezoelectric dan kedua elektrodanya untuk mendapatkan hasil yang paling optimal.



Gambar 3.14 Bentuk geometri desain cincin persegi mode kontur

Menurut [35] [37], persamaan frekuensi resonansi cincin lingkaran diberikan oleh:

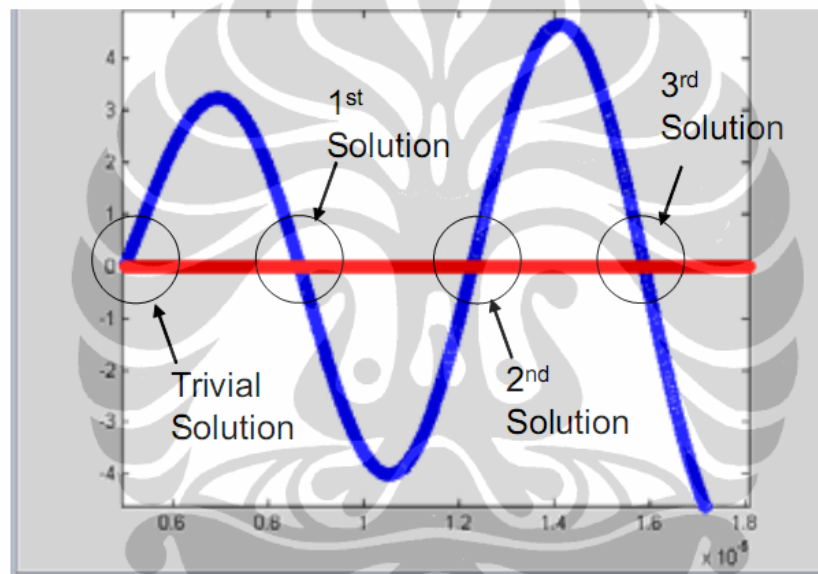
$$\begin{aligned}
 & [J_1(h_{ring}r_i)\sigma - J_1(h_{ring}r_i) + r_i h_{ring} J_0(h_{ring}r_i)] \cdot [Y_1(h_{ring}r_0)\sigma - Y_1(h_{ring}r_0) \\
 & + r_0 h_{ring} Y_0(h_{ring}r_0)] - [Y_1(h_{ring}r_i)\sigma - Y_1(h_{ring}r_i) \\
 & + r_i h_{ring} Y_0(h_{ring}r_i)] \cdot [J_1(h_{ring}r_0)\sigma - J_1(h_{ring}r_0) \\
 & + r_0 h_{ring} J_0(h_{ring}r_0)] = 0
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

dimana h_{ring} adalah sebuah konstanta yang tergantung terhadap target frekuensi resonansi dan propertis struktur material :

$$h_{ring} = \frac{2\pi f_0}{\sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}}}
 \tag{3.8}$$

dimana f_0 adalah frekuensi resonansi dan E , ρ dan σ adalah berturut-turut adalah modulus Young struktur material, kepadatan massa dan rasio Poisson's dari

piezoelektrik (σ). Jari-jari dalam dan jari-jari luar cincin (*ring*) berturut-turut dilambangkan oleh r_i dan r_o . Besaran J dan Y adalah fungsi Bessel jenis pertama dan kedua. Sebuah contoh dari beberapa solusi yang diberikan oleh persamaan (3.7) ditunjukkan pada gambar 3.15. Pada kasus ini, target frekuensi $f_0 = 1\text{GHz}$ dan jari-jari dalam $r_i = 5\ \mu\text{m}$; modulus Young material $E = 110\ \text{GPa}$, $\rho = 2,23 \times 10^3\ \text{kg/m}^3$ dan $\sigma = 0,2$. Solusi pertama yang diberikan grafis pada gambar 3.15 adalah solusi pertama persamaan (3.7), $r_i = r_o$. Solusi kedua memberikan sebuah nilai nol pada persamaan antara $8\ \mu\text{m}$ dan $10\ \mu\text{m}$. Secara numerik, solusinya diperoleh pada $8.66\ \mu\text{m}$.



Gambar 3.15 solusi grafik persamaan (3.7) untuk parameter-parameter: $E = 110\ \text{GPa}$, $\rho = 2.23 \times 10^3\ \text{kg/m}^3$, $\sigma = 0.2$, target frekuensi $f_0 = 1\ \text{GHz}$ dan jari-jari dalam $r_i = 5\ \mu\text{m}$. solusi pertamanya $r_o = 8.66\ \mu\text{m}$ [37].

Bentuk modus cincin (*ring*) dijelaskan oleh persamaan berikut [35]:

$$u_r(r) = \left(A \frac{\partial J_1(hr)}{\partial r} + B \frac{\partial Y_1(hr)}{\partial r} \right) \quad (3.9)$$

dimana $u_r(r)$ adalah *displacement* kearah radial, $h = \omega/c$ (c sama dengan kecepatan suara dalam material film), r adalah koordinat radial, dan A dan B adalah dua konstanta yang dapat dicari dengan menerapkan kondisi batas dari tekanan nol pada jari-jari dalam dan jari-jari luar permukaan *ring*-nya. Meskipun

persamaan (3.8) dan (3.9) relatif akurat, tetapi cukup rumit dalam prakteknya. Mode ini dapat didekati oleh [38] yang menyatakan bahwa ketika jari-jari cincin R_{ave} rata-rata jauh lebih besar dari lebar (W) ring, modus getaran ring dapat didekati oleh salah satu bar di panjangnya yang bergetar.

Untuk bentuk persegi, resonator ini memberikan dua jenis persegi resonansi [37]: modus Lam'e, di mana dua sisi resonator berlawanan bergerak tidak sefase dengan tetap memperhatikan dua sisi lainnya, dan modus ekstensional, dimana empat sisi bergerak dengan tetap menjaga bentuk persegi resonator tersebut. Modus ekstensional dapat didekati sebagai superposisi dari dua gelombang suara yang ortogonal dengan *displacement* diberikan oleh $u_x = A \sin x x / L$ dan $u_y = A \sin x y / L$, A adalah amplitudo getaran dan x dan y menunjukkan posisi pada plat. Masa efektif dan konstanta pegas efektif berkaitan dengan geometri perangkat diberikan persamaan berikut:

$$m = \rho h L^2 \quad (3.10)$$

$$k = \pi^2 E_{2D} h \quad (3.11)$$

dimana ρ adalah kerapatan lapisan structural, h adalah tinggi divais, L adalah panjang sisi persegi dan E_{2D} adalah elastisitas modulus efektif untuk ekspansi dalam 2-D. Elastisitas modulus efektif dapat dipertimbangkan dengan ke-kakuan mekanikal material dengan persamaan :

$$E_{2D} = c_{11} + c_{12} - 2 \frac{c_{12}^2}{c_{11}} \quad (3.12)$$

dimana c_{11} and c_{22} adalah kekakuan mekanikal pada dua arah yang saling tegak lurus dari plat persegi.

Parameter rangkaian ekuivalen listrik sebuah cincin (*ring*) lingkaran, dinyatakan sebagai [35]:

$$\begin{aligned} f_0 &\approx \frac{1}{2W} \sqrt{\frac{E_p}{\rho(1-\sigma^2)}} & C_0 &\approx \epsilon_0 \epsilon_{33} \frac{2\pi R_{AVE} W}{T} \\ R_m &\approx \frac{\pi}{8} \frac{T}{2\pi R_{AVE}} \frac{\rho^{\frac{1}{2}} (1-\sigma^2)^{1/2}}{E_p^{3/2} Q d_{31}^2} \\ C_m &\approx \frac{8}{\pi^2} \frac{W 2\pi R_{AVE}}{T} \frac{d_{31}^2 E_p}{1-\sigma} \\ L_m &\approx \frac{\rho}{8} \frac{WT}{2\pi R_{AVE}} \frac{(1-\sigma^2)^2}{d_{31}^2 E_p^2} \end{aligned} \quad \dots\dots (3.13)$$

dimana f_0 adalah frekuensi resonansi, C_0 adalah kapasitansi statis (parallel), R_m , C_m dan L_m berturut-turut *motional resistance*, *capacitance* dan *inductance*, ϵ_0 adalah permitivitas udara, ϵ_{33} adalah permitifitas relatif piezoelektrik, R_{AV} adalah jari-jari rata-rata lingkaran ($1/2 (r_i + r_o)$), W adalah lebar cincin (*ring*), T adalah ketebalan plat, Q adalah faktor kualitas, E_p adalah modulus Young piezoelektrik, σ adalah Poisson rasio piezoelektrik dan d_{31} adalah kofisien piezoelektrik.

Persamaan yang sama berlaku untuk sebuah bentuk cincin (*ring*) persegi, dimana $2\pi R_{AVE}$ diganti oleh keliling garis pinggir rata-rata cincin persegi (4 x sisi). Keliling efektif berbeda dengan keliling persegi yang sebenarnya dari struktur material, oleh karena itu perlu sebuah faktor koreksi γ yang nilainya < 1 [35].

