

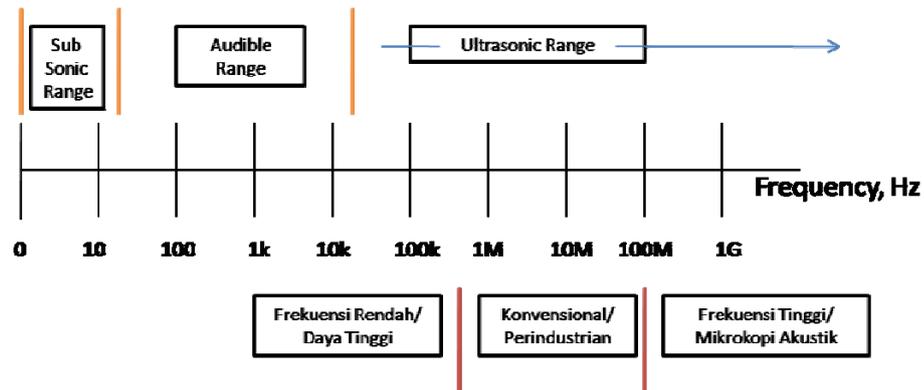
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian dunia yang berkenaan dengan gelombang ultrasonik bukan hal yang baru melainkan sudah berlangsung cukup lama sehingga pemahaman ilmuwan mengenai sifat dan interaksinya terhadap materi sudah dipahami dengan baik (*well defined*). Pada tahun 1929 dan 1935, Sokolov meneliti tentang penggunaan ultrasonik untuk mendeteksi suatu objek. Tahun 1931, Mulhauser mematenkan penelitiannya tentang penggunaan dua buah transduser untuk mendeteksi cacat pada suatu padatan. Firestone di tahun 1940 dan Simons di 5 tahun kemudian (1945) mengembangkan inspeksi ultrasonik dengan teknik pulse-echo (Charles J, 2003). Untuk mengerti mengenai cara kerja sistem tomografi yang didesain baik dalam eksperimen dan simulasi maka diperlukan pemahaman dari sifat dan interaksi gelombang ultrasonik. Untuk itu pada bab kedua ini akan diuraikan mengenai teori-teori yang berkenaan langsung terhadap penelitian yang akan dilakukan.

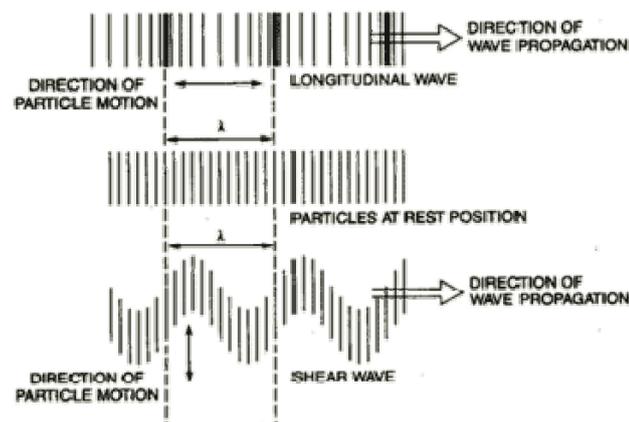
2.1 Gelombang Ultrasonik

Secara alami telah diketahui bahwa telinga manusia layaknya sebuah *Band-pass filter* yang mampu membatasi frekuensi suara yang akan didengar. Frekuensi yang dapat didengar berkisar antara 20 Hz hingga 20 kHz saja. Frekuensi selain rentang tersebut, normalnya tak dapat didengar oleh manusia. Di atas 20 KHz, gelombang suara berfrekuensi ini disebut **Ultrasonik**. Sedangkan dibawah 20 Hz disebut **Infrasonik** (ASM, 1997; Charles J, 2003).

Tak ada yang sia-sia dalam penciptaan alam. Bukan hanya oleh hewan saja gelombang Ultrasonik ini dimanfaatkan, tetapi oleh manusia juga. Awal perkembangannya pemanfaatan Ultrasonik ditujukan untuk tujuan negatif selama perang dunia kedua. Namun kini, telah banyak dipergunakan untuk kemaslahatan hajat hidup orang banyak.



Gambar 2.1 Pembagian rentang frekuensi suara.



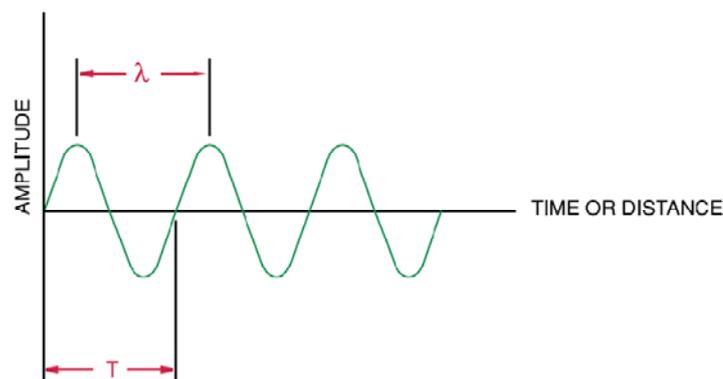
Gambar 2.2 Ciri-ciri gelombang Longitudinal (atas) dan gelombang Transversal (bawah).

Ultrasonik merupakan gelombang suara dengan panjang gelombangnya yang cukup kecil, menjadikannya cukup signifikan untuk dimanfaatkan secara luas dalam bidang industri yaitu **Pengujian Tak Merusak / Nondestructive Testing (NDT)** pada material. Hal ini dikarenakan kecilnya panjang gelombang Ultrasonik maka semakin mudahnya gelombang ini untuk dipantulkan oleh suatu cacat yang kecil di dalam material. Cacat kecil seperti keretakan memiliki suatu *impedansi akustik* yang menyebabkan akan terjadinya pantulan dari gelombang ultrasonik.

2.1.1 Karakteristik Ultrasonik

Pengujian ultrasonik didasari atas adanya peristiwa deformasi yang bervariasi terhadap waktu atau getaran pada material yang biasa disebut sebagai *gelombang akustik*. Gelombang akustik terjadi pada partikel yang atom-atomnya bergerak serempak untuk menghasilkan gelombang mekanik. Suatu material yang tidak berada dalam kondisi di atas batas keelastisitasannya, maka partikel-partikel penyusunnya yang mengalami perpindahan terhadap titik keseimbangannya akan muncul suatu gaya pembalik (*Restoring force*). Gaya inilah yang berperan pada pergerakan osilasi di suatu medium, yang mendasari prinsip dari perambatan gelombang suara.

Perambatan gelombang ultrasonik, pada suatu material dapat ditempuh dengan berbagai tipe perambatan sehingga dikenal terdapat empat mode gelombang, yaitu **gelombang Longitudinal**, **gelombang Transversal (geser)**, **gelombang Rayleigh** dan **gelombang Lamb**. Namun demikian, dalam aplikasinya jenis gelombang Longitudinal dan Transversal-lah yang mayoritas digunakan dalam Inspeksi Ultrasonik. Secara garis besar perbedaan antara gelombang Longitudinal dengan Transversal dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.3 Parameter dasar suatu gelombang

Panjang gelombang, Frekuensi, dan Kecepatan perambatan

Karakteristik gelombang merambat dapat dilihat dari panjang gelombang, frekuensi dan kecepatan perambatannya yang memiliki hubungan matematis sebagai berikut :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

λ : panjang gelombang (m), c : kecepatan gelombang suara (m/s), dan f : frekuensi gelombang suara (Hz).

Kecepatan ultrasonik ini akan sangat bergantung pada medium perambatannya dan akan berbeda pada medium yang berbeda (2; 3). Sedangkan hubungan matematis antara kecepatan gelombang dengan karakteristik medium perambatan adalah sebagai berikut :

$$c = \sqrt{\frac{\beta}{\rho}} \quad (2.2)$$

β : modulus bulk ($\text{kg}/(\text{m sec}^2)$), ρ : massa jenis medium (kg/m^3)

Besaran frekuensi dari Ultrasonik yang ditembakkan dari suatu Transduser Ultrasonik tidak akan berpengaruh pada perubahan dari kecepatan perambatannya pada suatu medium. Sehingga yang akan berdampak berubah hanya panjang gelombangnya saja (ASM, 1997; Charles J, 2003).

Tekanan, Intensitas, dan skala dB

Energi suara akan menyebabkan partikel pada medium perambatan merasakan perpindahan dan variasi tekanan lokal. Variasi dari besar tekanan biasanya disebut sebagai Amplitudo Tekanan (P). Amplitudo tekanan merupakan nilai maksimum atau minimum pada suatu material yang dirambati gelombang suara.

Intensitas (I) merupakan besar Daya per satuan luas dan sebanding dengan kuadrat dari Tekanan (Bushberg, et al, 2002).

$$I \sim P^2 \quad (2.3)$$

Nilai relatif antara Intensitas dengan Tekanan diterangkan dalam satuan desibel (dB), hubungan matematisnya adalah sebagai berikut :

$$\text{Rel - Intensity(dB)} = 10 \log \left(\frac{I_2}{I_1} \right) \quad (2.4)$$

atau

$$\text{Rel - Intensity(dB)} = 20 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (2.5)$$

2.1.2 Karakteristik Interaksi Ultrasonik dengan Materi

Atenuasi

Tidak dapat dihindari bahwa adanya suatu pelemahan intensitas dari gelombang suara yang merambat melawati suatu medium. Penyebabnya adalah adanya peristiwa penghamburan (*scattering*) dan penyerapan (*absorption*) (Bushberg, et al, 2002). Penghamburan merupakan pemantulan secara acak gelombang suara yang arahnya berbeda dari arah sebelumnya. Penyerapan merupakan perubahan bentuk energi suara ke bentuk energi lainnya, misal panas. Kombinasi dari kedua efek tadi disebut sebagai **Atenuasi**.

Karakteristik atenuasi sering digunakan sebagai alat pengukuran bagi landasan teori yang menjelaskan fenomena fisika atau kimia perihal pengurangan intensitas suatu ultrasonik. Perubahan amplitudo dari pengurangan suatu gelombang adalah sbb :

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \quad (2.6)$$

Impedansi Akustik

Impedansi akustik (Z) dari suatu material didefinisikan sebagai perkalian antara kerapatan (ρ) dengan kecepatan rambat gelombang suara (c)

$$Z = \rho c \quad (2.7)$$

Z : impedansi akustik ($\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ sec})$)

Nilai impedansi akustik ini berperan penting dalam hal:

- a. Menentukan transmisi dan refleksi dari gelombang suara pada batasan dua material yang memiliki impedansi akustik yang berbeda
- b. Desain pada Transduser Ultrasonik
- c. Menaksir tingkat penyerapan suara pada suatu medium

Impedansi akustik merupakan sifat yang dimiliki medium perambatan gelombang suara dan bukan dari sifat gelombang. Besarnya intensitas gelombang jika dikaitkan dengan karakteristik impedansi adalah sbb :

$$I = \frac{P^2}{2Z} \quad (2.8)$$

Arti fisis dari Impedansi akustik menerangkan nilai hambatan terhadap aliran dari suatu sistem. Volume aliran merupakan perkalian antara kecepatan dari suatu elemen dengan luas penampangnya.

Refleksi dan Refraksi

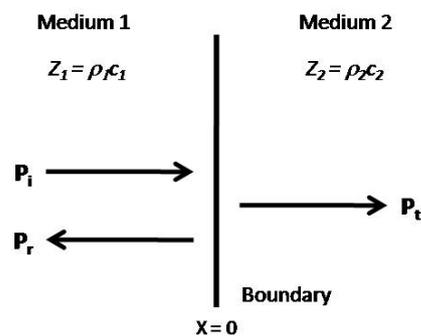
Gelombang akustik yang datang pada perbatasan dua medium yang berbeda nilai impedansi akustiknya akan mengalami peristiwa refleksi dan transmisi. Amplitudo dan intensitas tekanan dari gelombang yang direfleksikan dan ditransmisikan bergantung kepada karakteristik impedansi akustik dan sudut datangnya gelombang.

Pada Gambar 2.4, amplitudo tekanan untuk gelombang datang, refleksi, dan transmisi ditunjukkan oleh notasi P_i , P_r dan P_t . Sedangkan Z_1 dan Z_2 mendefinisikan notasi Impedansi akustik masing-masing medium. Kemudian didefinisikan pula *Koefisien Tekanan Transmisi* T_p (sebagai rasio P_t/P_i) dan *Koefisien Tekanan Refleksi* R_p (sebagai rasio P_r/P_i). Dengan mengacu pada persamaan (2.8) maka *Koefisien Intensitas Transmisi* T_I dan *Koefisien Intensitas Refleksi* R_I dapat ditulis sbb :

$$T_I = \frac{I_t}{I_i} = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} |T_p|^2 \quad (2.9)$$

dan

$$R_I = \frac{I_r}{I_i} = |R_p|^2 \quad (2.10)$$



Gambar 2.4 Refleksi dan Transmisi pada arah searah garis normal.

Daya yang ditransmisikan sebanding dengan perkalian antara Intensitas dengan luas penampang. Berkas gelombang yang direfleksikan akan memiliki

luas penampang yang sama dengan berkas gelombang yang datang, namun tidak demikian halnya dengan luas penampang berkas gelombang yang ditransmisikan. *Koefisien Daya Transmisi* T_π dan *Koefisien Daya Refleksi* R_π adalah sbb :

$$T_\pi = \frac{A_t}{A_i} T_I = \frac{A_t \rho_1 c_1}{A_i \rho_2 c_2} |T_P|^2 \quad (2.11)$$

dan

$$R_\pi = R_I = |R_P|^2 \quad (2.12)$$

Dengan mengacu pada kekekalan energi maka $T_\pi + R_\pi = 1$

Selanjutnya, kasus pertama pada Gambar 2.4 yang sederhana dimana gelombang datang tanpa ada penyimpangan sudut terhadap garis normal, akan didefinisikan gelombang datang, refleksi dan transmisi sbb :

$$p_i = P_i e^{i(\omega t - k_1 x)} \quad (2.13)$$

$$p_r = P_r e^{i(\omega t + k_1 x)} \quad (2.14)$$

$$p_t = P_t e^{i(\omega t - k_2 x)} \quad (2.15)$$

Yang harus diperhatikan adalah tanda x berbeda pada gelombang transmisi, dan bilangan gelombang k_1 dan k_2 yang berbeda akibat dari perbedaan fase kecepatan c_1 dan c_2 . Kemudian akan ditentukan kondisi batas yang cocok pada kasus. Tekanan akustik pada kedua sisi batas adalah sama, dan kecepatan partikel terhadap batas juga sama. Sehingga persamaan matematis kondisi batas dapat ditulis sbb :

$$p_i + p_r = p_t$$

$$u_i + u_r = u_t \quad \text{pada } x = 0$$

Kemudian Tekanan dibagi oleh kecepatan transmisi menghasilkan

$$\frac{p_i + p_r}{u_i + u_r} = \frac{p_t}{u_t} \quad \text{pada } x = 0 \quad (2.16)$$

Bidang gelombang memiliki $p/u = \pm \rho c$, sehingga hal ini akan menyatakan sifat kontinuitas dari impedansi akustik pada sekitar batas dua medium. Gelombang datang, refleksi, dan transmisi harus sesuai/cocok dengan persamaan *tekanan/kecepatan = impedansi akustik*, dengan demikian

$$Z_1 = \frac{p_i}{u_i} = -\frac{p_r}{u_r} \quad \text{dan} \quad Z_2 = \frac{p_t}{u_t}$$

Substitusi kedua persamaan di atas ke persamaan (2.16) sehingga diperoleh

$$Z_1 \frac{p_i + p_r}{p_i - p_r} = Z_2$$

Dengan mengolah persamaan di atas untuk membuat hubungan $1 + R_p = T_p$ untuk mendapatkan koefisien refleksi dan transmisi :

$$R_p = \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right] \quad \text{dan} \quad T_p = \left[\frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \right]$$

Sedangkan untuk koefisien intensitas Transmisi T_I dan koefisien intensitas Refleksi R_I dirumuskan sebagai berikut :

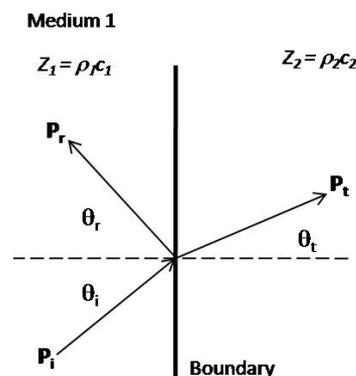
$$R_I = \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right]^2 \quad \text{dan} \quad T_I = \left[\frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \right]$$

Dalam hal praktis tentunya arah datang gelombang suara tidak sesedarhana seperti kasus di atas. Ada kemiringan yang terjadi pada arah datangnya gelombang suara, seperti pada Gambar 2.5.

Gelombang datang, refleksi, dan transmisi

Dengan mengaplikasikan hukum Snell maka didapat koefisien Refleksi

$$R = \frac{Z_2/Z_1 - (\cos\theta_t/\cos\theta_i)}{Z_2/Z_1 + (\cos\theta_t/\cos\theta_i)}$$



Gambar 2.5 Refleksi dan Transmisi pada arah miring (menyimpang dari garis normal).

Koefisien refleksi ini dikenal sebagai *Koefisien Refleksi Rayleigh*. Kemudian pula dapat disimpulkan sudut transmisinya θ_t :

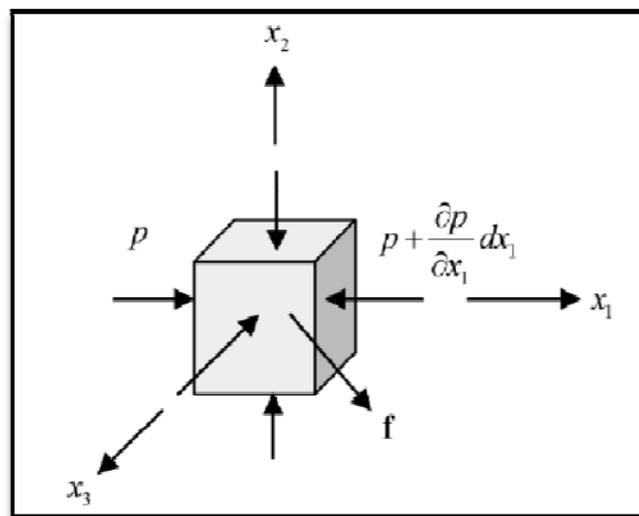
$$\theta_t = \sqrt{1 - (c_2 - c_1)^2 \sin^2 \theta_i}$$

2.1.3 Penjalaran Gelombang Ultrasonik di Padatan

Untuk mencari persamaan gerak gelombang suara di suatu medium padat, agar mudahnya dapat dilihat dengan menganggap suatu medium sebagai fluida yang non-viscous (*ideal compressible*) (8). Dalam kasus ini, masing-masing partikel medium fluida hanya mengalami tekanan yang bekerja pada permukaannya, Gambar 3.1. Jika terdapat perambatan gelombang mekanik yang melalui partikel-partikel tsb pada arah sumbu x_1 , maka kita dapat mencari hubungan antara besaran-besaran fisika yang bekerja pada partikel-partikel tsb.

Mencari persamaan geraknya dapat dilakukan dengan mengaplikasi Hukum Newton III.

dengan F_x : resultan gaya – gaya yang bekerja pada sumbu x (N), m : suatu massa yang dikenai gaya F_x (Kg), dan a_x : percepatan yang dihasilkan oleh adanya F_x (ms^{-2}).



Gambar 2.6 Tekanan dan *body forces* yang bekerja pada elemen ideal, *compressible fluid*

Dengan beberapa gaya yang bekerja antara lain ;

- Tekanan p pada arah x_1 positif
- Tekanan $p + \frac{\partial p}{\partial x_1} dx_1$ pada arah x_1 negatif
- Body forces* f (*force/unit volume*) pada berbagai arah positif

Pergeseran partikel yang bergantung terhadap waktu, $u(x,t)$. Sehingga resultan gaya-gaya tsb,

$$pdx_2dx_3 - (p + \partial p)dx_2dx_3 + f_1dx_1dx_2dx_3 = \rho dx_1dx_2dx_3 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}$$

Dimana p : tekanan (Nm^{-2}), ρ : massa jenis (Kgm^{-3}), u_1 : pergeseran pada arah sumbu x_1 (m), f_1 : body force arah sumbu x_1 (gaya/satuan volume).

Dengan demikian akan didapat persamaan gerak dalam bentuk vektor,

$$-\nabla p + f = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \rho \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.17)$$

Dimana $\frac{\partial u}{\partial t}$: kecepatan dari partikel yang bergeser.

Pada medium padat persamaan gerak gelombang ultrasonik tidaklah sesederhana di atas. Tekanan yang terjadi pada padatan merupakan tensor stress. Sehingga persamaan di atas lebih tepat jika ditulis sbb,

$$\sum_{j=1}^3 \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2.18)$$

Generalisasi dari uraian persamaan di atas menggunakan **Hukum Hooke** adalah sbb,

$$\tau_{11} = \lambda \Delta + 2\mu \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \quad \tau_{12} = \mu \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right)$$

$$\tau_{22} = \lambda \Delta + 2\mu \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \quad \tau_{13} = \mu \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right)$$

$$\tau_{33} = \lambda \Delta + 2\mu \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \quad \tau_{23} = \mu \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right)$$

Dengan λ dan μ adalah **konstanta lame**. Kedua konstanta ini jika dihubungkan dengan **modulus Young** dan **rasio Poisson**.

$$\lambda = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2.19)$$

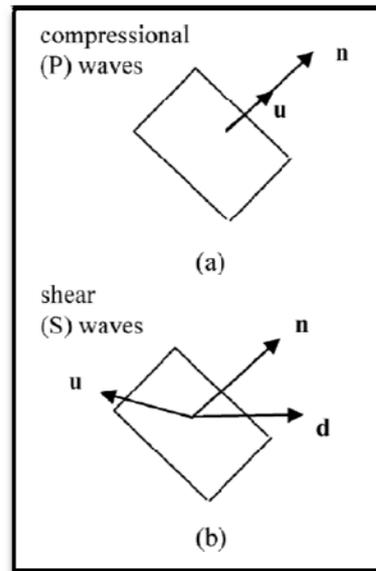
$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.20)$$

Dengan mensubstitusikan uraian persamaan generalisasi Hukum Hooke ke dalam persamaan (2.18), maka akan didapatkan **persamaan Navier** untuk *displacement/* perpindahan partikel.

$$\mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot u) - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (2.21)$$

Terdapat dua tipe gelombang datar yang mungkin terjadi pada medium *isotropic*, padat elastis. Yaitu gelombang-P (**P-waves**) dan gelombang-S (**S-**

waves) datar. P-waves biasa dianggap gelombang tekanan, kompresional, primer, longitudinal (L), dilatational, atau irrotational. S-waves dianggap sebagai gelombang geser, sekunder, transversal (T), distortional, equivoluminal atau rotational. Kedua gelombang ini disebut gelombang Bulk selama keduanya merambat pada volume padatan.



Gambar 2.7 Perpindahan P-waves dan S-waves arah sumbu \mathbf{n} pada padatan elastik isotropik.

Solusi persamaan dari gelombang datar ini $\mathbf{u} = U\mathbf{n} f(t - \mathbf{x} \cdot \mathbf{n} / c_p)$ akan cocok dengan persamaan Navier jika

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (2.22)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} \quad (2.23)$$

2.2 Transduser Ultrasonik

Gelombang ultrasonik dihasilkan dan dideteksi oleh sebuah transduser. Transduser merupakan sebuah perangkat yang akan metransformasikan suatu bentukan energi ke bentukan energi lain. Transduser ultrasonik akan merubah energi listrik menjadi energi mekanik atau sebaliknya (Bushberg, et al, 2002).

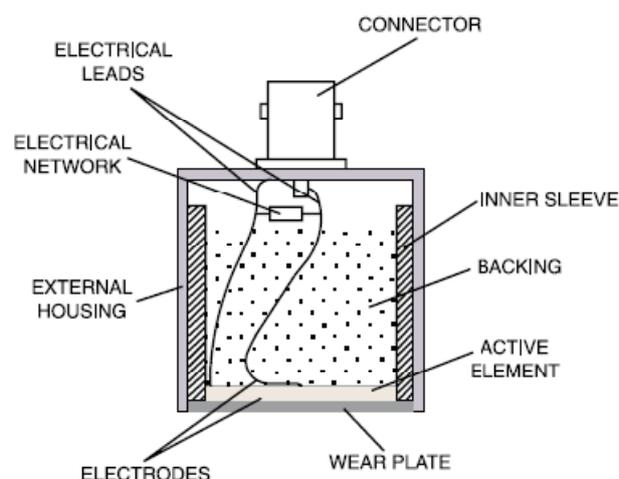
Komponen utama dari sebuah transduser ultrasonik adalah elemen aktif, *damping block*, dan *wear plate*.

2.2.1 Elemen Aktif

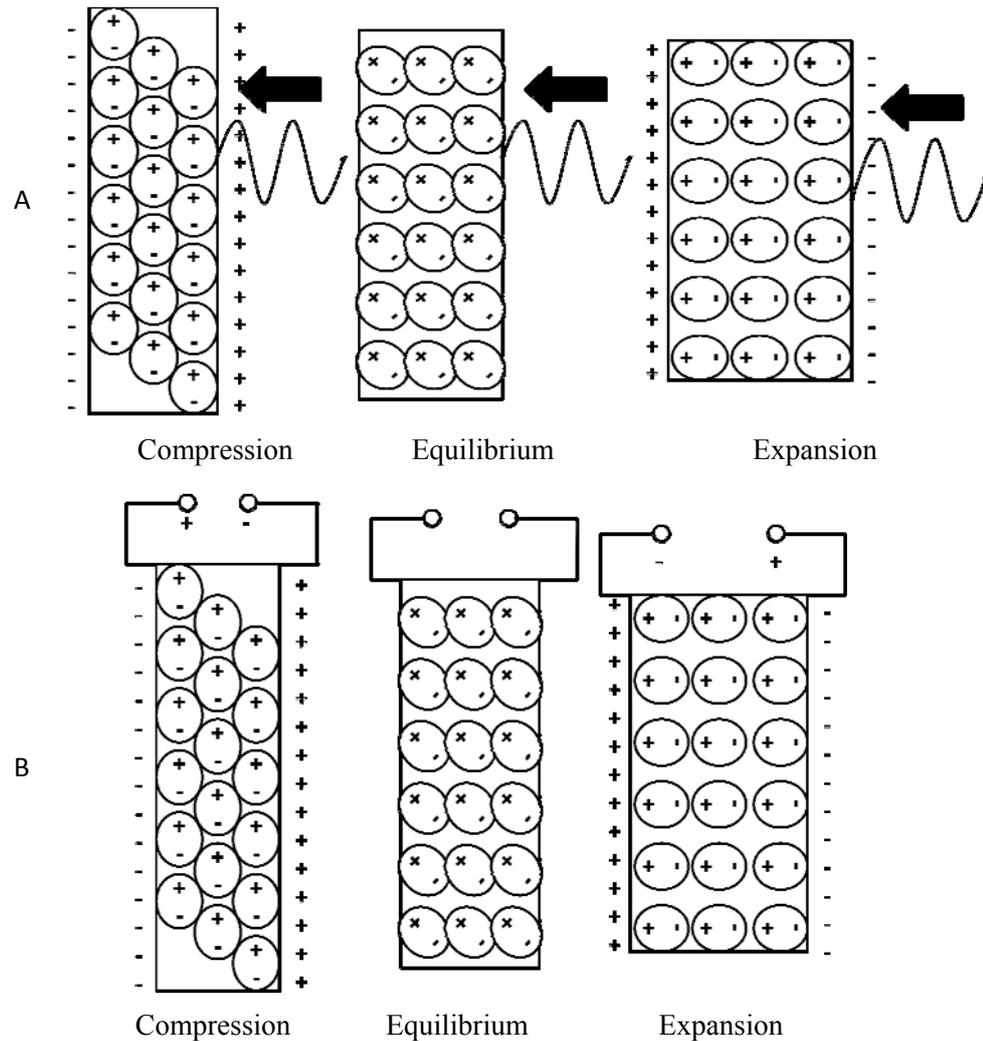
Elemen aktif merupakan material piezoelectric. Komponen ini akan merubah energi listrik menjadi energi mekanik (suara) berdasarkan pada peristiwa deformasi struktur Kristal. Dan sebaliknya suatu energi mekanik yang menyentuh permukaan material ini akan dirubah menjadi energi listrik. Material piezoelectric dikarakterisasikan oleh susunan molekul-molekul dipole listrik.

Dipole listrik merupakan sekumpulan molekul penyusun yang terdiri dari muatan listrik negatif dan positif yang berjumlah sama.

Ketika tekanan luar memberikan efek tegangan mekanik pada permukaan piezoelectric, seketika itu deretan dari dipole-dipole akan terganggu dari posisi keseimbangannya. Hal ini mengakibatkan adanya ketidakseimbangan distribusi muatan. Kemudian akan mengakibatkan perbedaan potensial dimana satu sisi akan bermuatan positif dan yang lainnya bermuatan negatif. Elektroda yang berada di permukaan akan segera mengukur besarnya tegangan tersebut, dimana nilainya akan proporsional dengan amplitudo tekanan mekanik yang timbul. Begitupun sebaliknya, pemberian tegangan pada permukaan piezoelectric akan menyebabkan ekspansi dan kontraksi mekanik dari elemen transduser.



Gambar 2.8 Diagram skematik interior Transduser Ultrasonik



Gambar 2.9 Elemen piezoelectric

2.2.2 Damping Block

Damping block merupakan lapisan yang berada di belakang element piezoelectric, yang akan menyerap energi ultrasonik yang datang dan melemahkan sinyal ultrasonik yang merambat pada *casing* transduser. Komponen ini juga akan melakukan peredaman untuk menghasilkan pulsa ultrasonik dengan lebar pulsa yang pendek.

2.2.3 Wear Plate

Tujuan dari penggunaan wear plate ini adalah upaya melakukan tindakan proteksi transduser terhadap keadaan lingkungannya. Dalam kasus seperti kontak transduser, wear plate ini haruslah memiliki daya tahan penggunaan yang awet dan tahan terhadap korosi. Sedangkan untuk transduser immersion,

angle-beam, dan delay line penggunaan wear plate ini memiliki tujuan tambahan yaitu sebagai sebuah transformer akustik antara elemen aktif yang berimpedansi akustik tinggi dan air.