

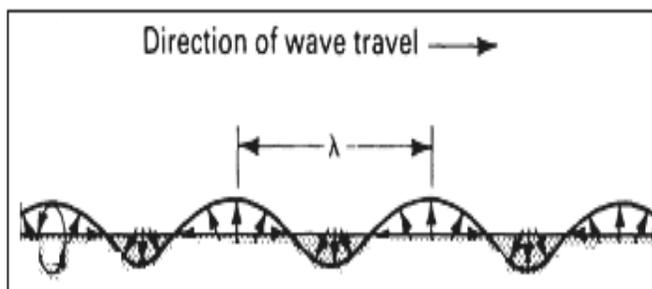
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Analisa dengan metode uji ultrasonik terhadap material didasarkan pada pengukuran dengan beberapa parameter propagasinya, dimana propagasi atau perambatan gelombang ultrasonik erat kaitannya dengan teori dasar getaran dan gelombang suara. Gelombang ultrasonik termasuk di dalam golongan gelombang suara, dimana sifat-sifat fisis yang fundamental seperti frekuensi, panjang gelombang dan cepat rambat menentukan kualitas dan kuantitas dari propagasinya di dalam material. Gelombang ini memiliki frekuensi di atas 20 kHz, namun dalam aplikasinya frekuensi yang digunakan bervariasi antara 0,1 sampai dengan 15 MHz, dan kebanyakan aplikasi menggunakan frekuensi di bawah 10 MHz. Panjang gelombang yang dipakai antara 1 – 10 mm, dan kecepatan yang digunakan antara 1 – 10 km/s.

2.1 GELOMBANG ULTRASONIK

Gelombang ultrasonik merupakan gelombang mekanis yang terdiri dari gerakan yang berulang (osilasi) atau vibrasi atom dari posisi setimbangnya. Untuk melihat karakteristik dari gelombang ultrasonik dapat dianalogikan dengan mudah pada gelombang yang dihasilkan dari batu yang dijatuhkan ke dalam air. Dampak dari jatuhnya batu tersebut akan menghasilkan pergerakan gelombang air yang tadinya dalam keadaan yang setimbang akan berubah dan bergerak menjauhi titik dimana batu bersentuhan dengan air pertama kalinya.



Gambar 2.1 batu yang dijatuhkan pada air⁽¹⁾.

Pada Gambar 2.1 terlihat ada jarak antara dua puncak gelombang yang dihasilkan dari gelombang air yang disebut panjang gelombang, λ . Turunnya puncak gelombang menjadi dasar lembah atau *trough* kemudian naik kembali membentuk puncak berikutnya disebut periode atau *cycle*. Sedangkan jumlah lintasan atau siklus yang dilewati tersebut dalam suatu periode tertentu disebut frekuensi. Puncak tertinggi atau lembah terdalam berjalannya gelombang dari posisi setimbangnya disebut amplitudo. Batu dengan ukuran dan massa yang sama membentur air dengan gaya yang sama akan menghasilkan gelombang yang berjalan pada kecepatan yang berbeda. Partikel-partikel dapat bergerak pada medium yang elastis, tetapi tidak akan berpindah tempat dari orbit kesetimbangannya, hanya energi gelombangnya saja yang berjalan melewati medium tertentu. Amplitudo dan energi dari gelombang suara bergantung dari seberapa besar energi yang disuplai, yaitu dari kecepatan dan atenuasi dari gelombang suara. Konsep dari gelombang ultrasonik secara umum dijelaskan dari hubungan antara kecepatan, frekuensi dan panjang gelombang dengan rumus sebagai berikut :

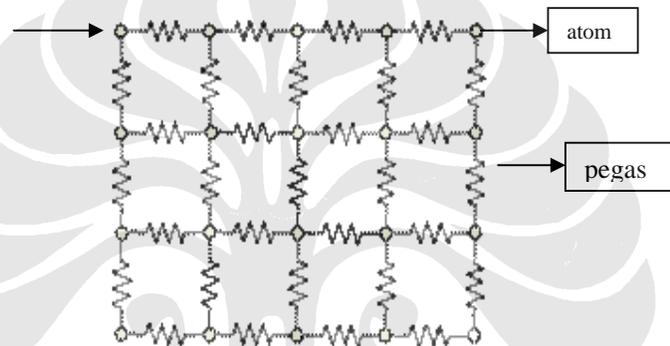
$$V = f \lambda$$

(2.1)

Gelombang suara berjalan berdasarkan interval waktu yang tetap, bergantung pada deformasi atau vibrasi pada material, yang biasanya selalu mengarah kepada sifat akustiknya. Setiap material terdiri dari atom-atom, yang apabila diberikan penekanan secara eksesif, maka dapat melewati batas kesetimbangannya. Sifat akustik pada material berpusat pada partikel-partikel yang mengandung atom-atom yang bergerak secara serentak menghasilkan gelombang mekanis. Ketika suatu material tidak diberikan tegangan tarik atau kompresi melewati batas elastisnya, partikel-partikel yang terdapat didalamnya akan membentuk gerakan elastis yang berulang atau *elastic oscillations*. Inilah yang disebut sebagai gelombang elastis mekanis. Gelombang ultrasonik merupakan gelombang yang elastis mekanis, karena karakternya yang dapat memantul secara elastis dan merambat secara mekanis.

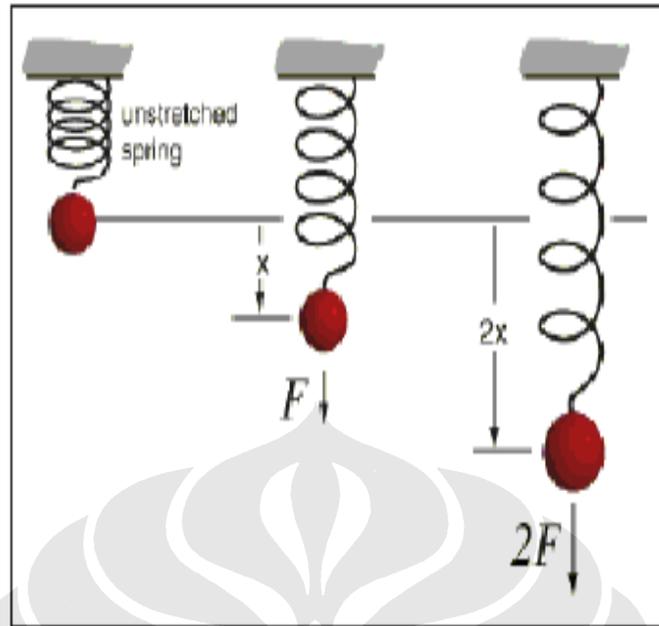
2.1.1 Karakteristik Gelombang Ultrasonik

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa gelombang suara merambat bergantung kepada vibrasi-vibrasi atau gerakan dari partikel-partikel didalam material, hal ini dikarenakan massa-massa dari partikel atom dan konstanta pegas dari setiap material berbeda-beda. Gelombang ultrasonik dapat digambarkan sebagai kumpulan osilasi dengan jumlah yang tidak terbatas atau partikel-partikel yang terhubung secara elastis. Setiap partikel saling dipengaruhi oleh pergerakan partikel lain disebelahnya dan masing-masing inersia atau kelembaman dan elastis akan mengembalikan gaya pada setiap partikelnya.



Gambar 2.2 ilustrasi atom yang saling terikat melalui pegas⁽⁸⁾.

Perambatan gelombang ultrasonik didalam suatu material memiliki karakter yang reflektif atau memantul yang apabila dihubungkan dengan teori fisika gelombang, maka dapat dianalogikan dengan hukum Hook (*Hook's Law*) pada ilustrasi pegas. Massa pada pegas memiliki frekuensi gema tunggal (*single resonant frequency*), ditentukan oleh nilai konstanta pegas k dan massanya m . Dibawah batas elastis setiap material, terdapat hubungan yang linear antara pergerakan partikel (*particle displacement*) dan gaya untuk partikel kembali ke titik setimbangnya. Linieritas ini dijelaskan dengan hukum Hook.



Gambar 2.3 ilustrasi pegas berdasarkan hukum Hook⁽⁸⁾.

Hukum Hook menjelaskan bahwa gaya balik dari pegas proporsional pada panjang ketika pegas mengalami peregangan atau tertarik, dan bergerak pada arah berlawanan. Hukum Hook dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$F = (-) k x$$

(2.2)

Dimana :

F = gaya pegas,

k = konstanta pegas

x = jarak pergerakan partikel (*particle displacement*).

Dari perumusan diatas dapat dijelaskan bahwa F merupakan gaya yang ditimbulkan pegas, k merupakan konstanta pegas, dan x adalah perubahan panjang pada partikel pegas. Hukum Hook juga berhubungan dengan hukum II Newton, dimana dikatakan bahwa gaya yang diberikan pada material akan dseimbangkan oleh massa dan percepatan partikelnya. Perumusan hukum II Newton adalah sebagai berikut :

$$F = m a$$

(2.3)

Dari rumus hukum II Newton diatas, akan terdapat suatu korelasi dimana dengan gaya yang diberikan pada material akan diseimbangkan oleh gaya kembali pada arah yang berkebalikan, yang tergantung pada jumlah perubahan pergerakan partikel dan konstanta pegas, sehingga kedua hukum tadi dapat dirumuskan menjadi :

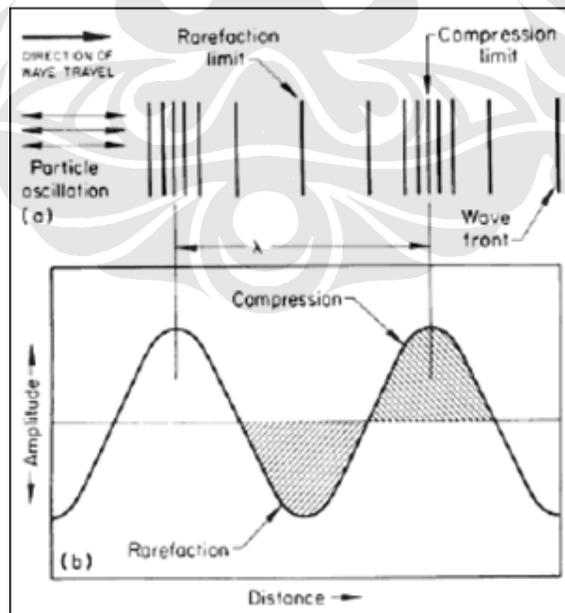
$$ma = -kx$$

(2.4)

2.1.2 Macam-macam gelombang Ultrasonik

Gelombang ultrasonik di dalam material dapat merambat dengan tiga macam pola gelombang yang sering digunakan, yaitu gelombang longitudinal, gelombang transversal, gelombang permukaan atau *Rayleigh waves*.

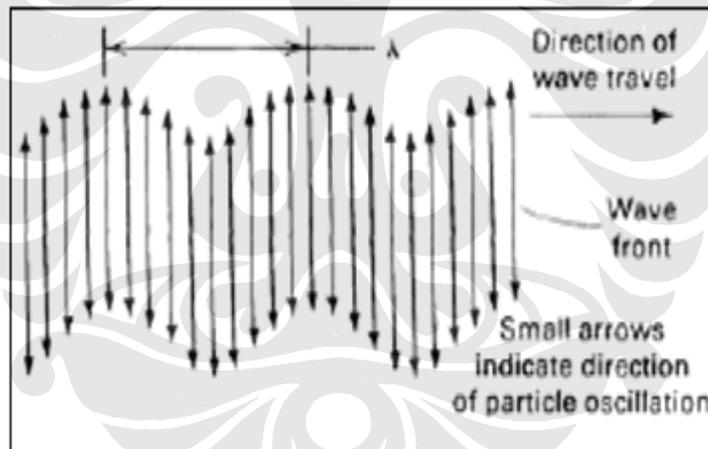
Gelombang longitudinal merupakan gelombang yang paling sering digunakan untuk pengujian ultrasonik. Kelebihan gelombang ini adalah kemampuannya yang dapat merambat di dalam zat cair dan gas, sama baiknya seperti pada material solid. Mekanisme gelombang ini adalah perambatannya sejajar dengan arah gerakan atom yang digetarkan.



Gambar 2.4 Skematik gelombang longitudinal⁽¹⁾.

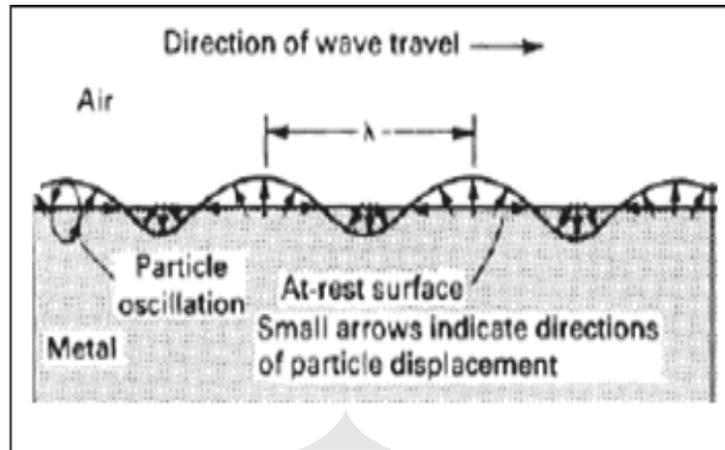
Gambar (a) diatas menunjukkan partikel yang berosilasi pada arah propagasi gelombang, yang menghasilkan penipisan dan pemanjangan gelombang, dengan plot amplitudo perubahan gerakan partikel versus jarak gelombang, ditunjukkan pada gambar (b).

Gelombang transversal merupakan jenis gelombang yang juga sering digunakan, tetapi tidak seperti gelombang longitudinal, gelombang ini sulit merambat dalam zat cair dan gas, karena karakternya yang kurang elastis dan dibutuhkan gaya yang kuat pada partikel untuk berosilasi. Gelombang ini dapat terjadi apabila gelombang ultrasonik merambat pada arah yang tegak lurus, dengan vibrasi yang bergerak ke atas dan ke bawah, pada arah dan bidang gerakan atom yang digetarkan. Ilustrasi dari gelombang ini secara skematis ditunjukkan pada gambar 5, yang menunjukkan osilasi dari partikel, arah propagasi gelombang, dan panjang gelombang, λ .



Gambar 2.5 Skema gelombang transversal⁽⁸⁾.

Gelombang permukaan atau *Rayleigh waves* merupakan jenis lain dari gelombang ultrasonik yang diaplikasikan pada material padat atau pelat yang tipis. Gelombang ini merambat pada permukaan antarmuka (*interface*) yang datar, dengan arah pergerakan atom yang berbentuk elips (*surface Rayleigh*). Gelombang ini merambat di sepanjang permukaan material dengan penetrasi sekitar 1 panjang gelombang yang dipakai, skematik dari gelombang permukaan ditunjukkan pada gambar 6.



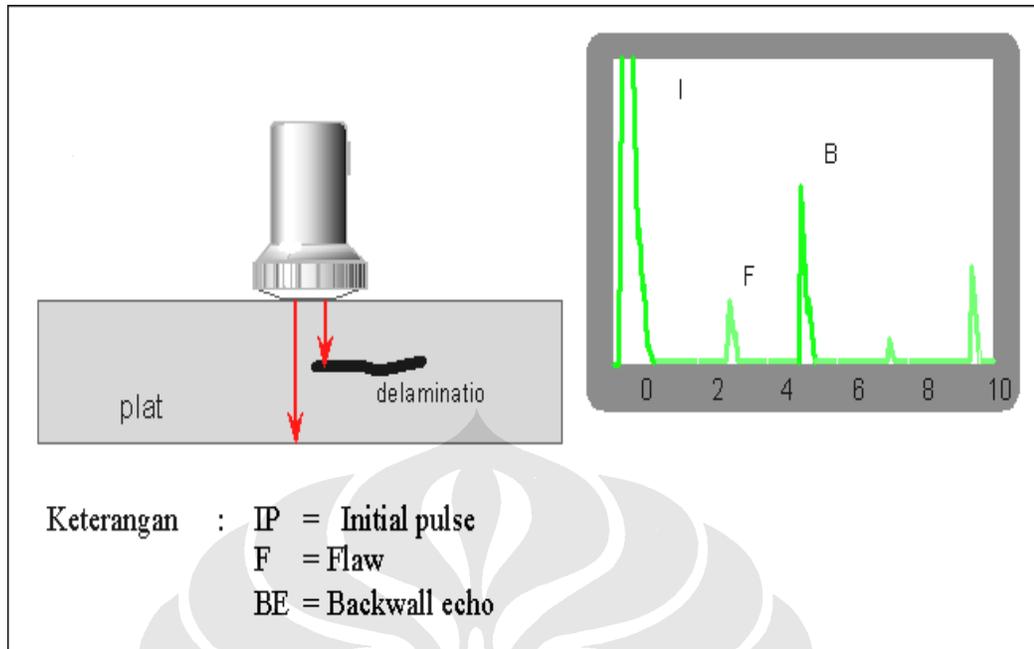
Gambar 2.6 Skema gelombang permukaan⁽⁸⁾

2.2 METODE PENGUJIAN ULTRASONIK

Terdapat dua metode utama pada inspeksi ultrasonik, yaitu metode gema-pulsa (*pulse-echo method*) dan metode transmisi (*transmission method*). Perbedaan utama dari kedua metode ini adalah pada batasan kemampuan pengukurannya. Metode gema pulsa dapat digunakan untuk mengukur waktu transit pulsa dan sinyal atenuasi, sedangkan metode transmisi hanya dapat mengukur sinyal atenuasi saja.

2.2.1 Metode Gema

Metode gema pulsa merupakan teknik refleksi untuk gelombang, yang diawali oleh pengiriman berkas gelombang dengan ukuran intensitas tertentu pada material, dan memotong suatu batas medium tertentu maka terjadi pemantulan pada sebagian intensitas berkas gelombang tersebut sebanding dengan ukuran batas fasanya. Perhitungan intensitas didasarkan pada berapa banyak intensitas yang diterima kembali dari material dibandingkan dengan intensitas awal dan ditampilkan dengan ketinggian pulsa yang berbeda. Sedangkan penghitungan waktu transit pulsa didasarkan pada berapa lama waktu yang diperlukan suatu berkas gelombang ultrasonik melakukan perjalanan, dimulai pada saat gelombang dipancarkan sampai pada saat gelombang diterima oleh transducer.

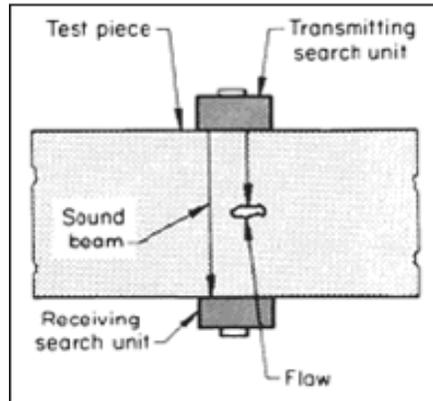


Gambar 2.7 Sistem gema-pulsa dengan metode waktu transit pulsa ⁽⁹⁾.

Gambar 2.7 menunjukkan gelombang dengan intensitas awal (IP), kemudian adanya cacat atau delaminasi diterjemahkan dengan pulsa pendek (F) atau *flaw*, yang sebanding dengan intensitas kembali yang kecil. Jarak pulsa yang ditampilkan sebanding dengan jarak cacat pada permukaan. Dengan skematis seperti gambar 2.7, maka metode ini dapat digunakan untuk menentukan lokasi cacat pada material dan juga untuk menentukan ketebalan material.

2.2.2 Metode Through Transmission

Metode transmisi merupakan metode yang melibatkan dua unit probe, yaitu sebagai pengirim (*transmitter*) gelombang ultrasonik dan penerima (*receiver*) gelombang yang dipantulkan. Bentuk-bentuk diskontinuitas seperti cacat dideteksi dengan membandingkan intensitas transmisi gelombang ultrasonik di dalam sampel yang diujikan, dengan intensitas transmisi dari standar menggunakan material yang sama. Metode ini biasanya digunakan dengan teknik *water immersion* atau *water column*. Gambar 2.8 menunjukkan metode transmission dengan dua unit pencari yang digunakan sebagai transmitter dan receiver.



Gambar 2.8. Metode *through transmission* dengan dua unit transducer ⁽¹⁾.

2.3 KARAKTERISTIK RAMBATAN GELOMBANG DALAM MATERIAL

2.3.1 Frekuensi dan Panjang Gelombang

Frekuensi merupakan jumlah lintasan atau putaran ulang gelombang dalam peristiwa yang terjadi satu kali per detik, atau kecepatan dibagi dengan panjang gelombangnya, sedangkan panjang gelombang merupakan jarak yang dihasilkan dua puncak gelombang, atau kebalikan dari frekuensi, yaitu kecepatan dibagi dengan frekuensi gelombang. Pada gelombang ultrasonik, frekuensi dan panjang gelombang memiliki hubungan yang digunakan sebagai penentu kapabilitas dari inspeksi, seperti dengan meningkatkan sensitivitas atau kemampuan inspeksi ultrasonik dalam mendeteksi diskontinuitas yang sangat kecil, maka dapat menggunakan frekuensi yang tinggi atau menurunkan panjang gelombang, kemudian untuk meningkatkan penetrasi arah ketebalan material, dapat menggunakan frekuensi yang rendah atau meningkatkan panjang gelombangnya.

2.3.2 Impedansi akustik

Ketika gelombang ultrasonik merambat melalui suatu medium, dan kemudian mengenai batas medium berikutnya, maka sebagian dari energi gelombang akan dipantulkan kembali dari batas medium tersebut dan sebagian energi lainnya akan diteruskan ke medium berikutnya. Karakteristik yang menentukan fenomena pemantulan dan penerusan pada batas medium yang berbeda disebut dengan impedansi akustik. Impedansi akustik material (Z) dapat

dirumuskan sebagai hasil perkalian dari berat jenis (ρ) dengan cepat rambat akustiknya (V).

$$Z = \rho V \quad (2.5)$$

Dimana :
 Z = impedansi akustik ($\text{g/cm}^2 \cdot \text{s}$)
 ρ = densitas (g/cm^3)
 V = kecepatan (cm/s)

Perbedaan dalam nilai Z sering mengacu pada ketidaksetimbangan (*mismatch*) impedansi. Semakin besar ketidakseimbangan (*mismatch*) impedansi, maka semakin besar persentase energi yang akan dipantulkan pada lapisan antar muka atau batas di antara medium satu dan yang lainnya. Sebagai contoh, apabila nilai impedansi adalah sama antara dua material tertentu, maka pemantulan atau *reflection* gelombang ultrasonik dapat terjadi pada batas butir antar kedua material. Fraksi dari intensitas gelombang yang datang dan dibiaskan dapat diturunkan. Apabila gelombang ultrasonik merambat dari bahan I ke bahan II dan tegak lurus pada permukaan batas, maka sebagian gelombang akan diteruskan sedangkan sebagian lagi dipantulkan, hal ini disebabkan kecepatan partikel dan tekanan local partikel (*local particle pressures*) harus berlanjut sepanjang batas. Intensitas yang diteruskan/dipantulkan bergantung pada koefisien transmisi atau refleksinya

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (2.6)$$

$$T = 1 - R \quad (2.7)$$

Dimana :

R = koefisien refleksi
 T = koefisien transmisi
 Z = impedansi akustik ($\text{g/cm}^2 \cdot \text{s}$)

Jumlah energi yang direfleksikan ditambah dengan energi yang diteruskan harus sama dengan jumlah energi yang datang, maka koefisien transmisi (D) dapat dihitung dengan mengurangi koefisien refleksi dari 1 (satu).

Tabel 2.1 Nilai Impedansi dari medium-medium yang berbeda.

Material	Impedansi (Gram/cm ² .sec)	Velocity (m/sec)	Berat Jenis (Gram/cm ³)
Udara	0.000033 x 10 ⁶	0.33 x 10 ⁵	0.001
Air	0.149 x 10 ⁶	1.49 x 10 ⁵	1.00
Steel	4.56 x 10 ⁶	5.85 x 10 ⁵	7.8

Sumber : ASM Handbook Volume 17 Non Destructive Evaluation and Quality Control , 1992

2.3.3 Atenuasi

Ketika gelombang ultrasonik berjalan merambat melalui suatu medium, maka energi dan intensitasnya akan berkurang dengan bertambahnya jarak. Pengurangan intensitas suara ini disebabkan oleh efek penghamburan (*scattering*) dan penyerapan (*absorption*). *Scattering* merupakan bentuk pemantulan (*reflection*) suara dengan arah dan sudut pantul yang acak karena berkas gelombang datang mengenai permukaan yang tidak beraturan, sedangkan *absorption* merupakan konversi dari energi mekanis suara melewati medium tertentu menjadi bentuk energi yang lain.

Kombinasi dari efek *scattering* dan *absorption* disebut sebagai atenuasi. Nilai dari atenuasi dapat diketahui dengan perumusan sebagai berikut :

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \quad (2.8)$$

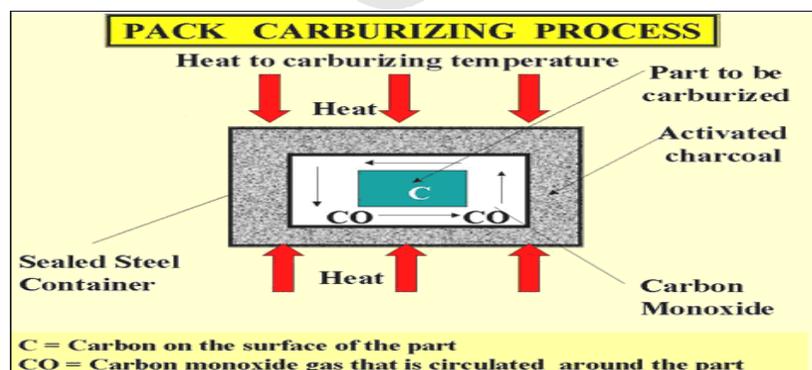
A adalah nilai amplitude yang berkurang setelah gelombang berjalan melewati jarak X. Nilai α adalah koefisien atenuasi dari gelombang yang berjalan pada arah x, dimana satuannya adalah nepers/mm.

2.4 SURFACE TREATMENT

Surface hardening merupakan proses yang digunakan untuk mengeraskan bagian permukaan, terutama pada material baja karbon dan baja alloy. Metode proses ini sangat beragam jenisnya, dan salah satu yang paling banyak diaplikasikan adalah metode karburisasi (*carburizing*). Karburisasi adalah proses penambahan carbon pada permukaan baja karbon rendah, dengan melakukan pemanasan pada temperature austenit, yang umumnya pada kisaran 850°C dan 950°C. Kemudian agar membentuk kekerasan yang diinginkan, seperti pengerasan untuk membentuk fasa martensit, maka dapat dilakukan quenching.

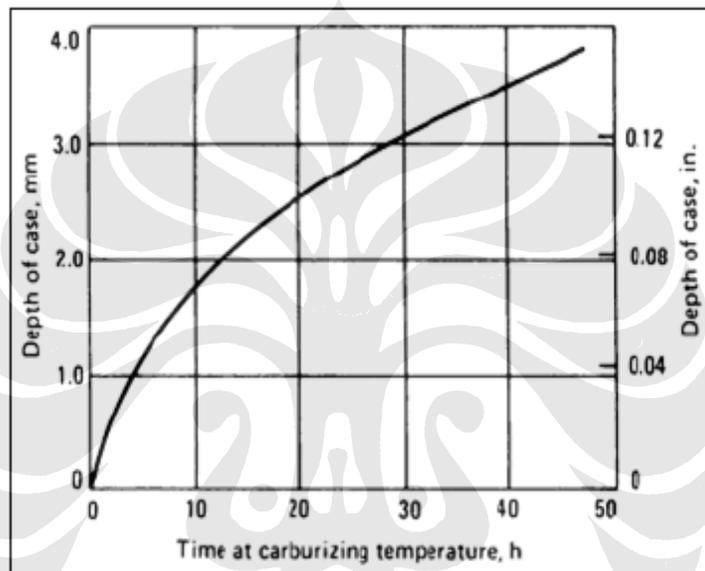
2.4.1 Pack Carburizing

Pada penelitian ini metode yang dipakai untuk karburisasi (*surface treatment*) adalah dengan *Pack carburizing*. Pack carburizing merupakan proses karburisasi dengan memanfaatkan carbonmonoksida (CO). Karbonmonoksida ini berasal dari suatu padatan terurai, yang akan membentuk karbon dan karbondioksida sebagai bahan difusi pada permukaan logam. Karbon yang terbentuk tersebut terdifusi ke dalam metal, dan CO₂ bereaksi cepat dengan material karbon yang ada pada campuran padatan karburisasi untuk menghasilkan CO murni. Karbonmonoksida yang terbentuk dapat lebih ditingkatkan daya difusinya dengan penambahan *energizer* atau katalis, seperti barium karbonat (BaCO₃), kalsium karbonat (CaCO₃), potassium karbonat (K₂CO₃) dan sodium karbonat (Na₂CO₃).



Gambar 2.9 Proses pack carburizing ⁽²⁾.

Proses karburisasi didalam material dipengaruhi dua variable yang sangat penting, yaitu temperature dan waktu. Kemampuan maksimum bagi karbon untuk dapat terdifusi ke dalam baja dibatasi pada temperatur austenisasi, Penggunaan temperatur yang paling banyak digunakan untuk proses karburisasi adalah pada kisaran 815 sampai 955°C, transfer difusi karbon akan meningkat seiring kenaikan temperature sehingga kemudian temperatur operasi sering dinaikkan sampai 1095°C untuk memperhalus butir sehingga kedalaman difusi dapat lebih optimal.



Gambar 2.10 Grafik pengaruh waktu terhadap kedalaman difusi ⁽²⁾.

Gambar 2.10 menunjukkan pengaruh penambahan waktu tahan terhadap kelajuan difusi, dimana peningkatan kedalaman difusi pada temperatur tertentu proporsional dengan peningkatan waktu. *Carbon potential* pada atmosfer dapur (*furnace*) sangat dipengaruhi oleh campuran bahan untuk karburisasi. Proses karburisasi dapat terjadi dan penambahan kandungan karbon dapat optimal, apabila rasio dari CO dan CO² juga meningkat

Kombinasi pengaruh waktu, temperature dan konsentrasi karbon sebagai parameter terjadinya proses difusi dapat ditunjukkan dengan dalam hukum Fick's atau *Fick's laws of diffusion*. Dalam hukum *Ficks* dijelaskan bahwa koefisien difusi pada karbon di dalam fasa austenit merupakan fungsi dari kandungan karbon dan temperatur, sehingga dapat diprediksi gradient karbon dan kedalaman

difusi berdasarkan variable waktu, temperature dan konsentrasi karbon di permukaan.

$$D = 0.47 \exp [- 1.6 C - (37000 - 6600 C) / RT] \quad (2.9)$$

Dimana :

- D = Koefisien difusi (cm²/s)
C = Persentase berat karbon
T = Temperatur (°K)
R = Konstanta gas

2.4.2 Quenching

Quenching merupakan suatu proses pendinginan yang sangat cepat, yang dilakukan setelah proses austenisasi pada temperature diatas batas austenisasi. Pada umumnya baja dengan jenis baja karbon dilakukan quench dengan tujuan untuk menghasilkan mikrostruktur martensit secara keseluruhan. Proses pengerasan yang baik hasil dari quenching akan dapat menghasilkan mikrostruktur yang sesuai, kekerasan, kekuatan dan ketangguhan dengan meminimalkan tegangan sisa, distorsi dan kemungkinan cacat⁽¹⁾.

Metode dalam quenching ada berbagai macam jenis, salah satunya adalah *direct quenching*, dimana material yang telah mencapai temperature austenisasi, secara langsung dicelupkan ke dalam media quenching. Media yang digunakan untuk quenching cukup beragam jenisnya, seperti oli, air, udara dan *brine water*.

Tabel 2.2. Pengaruh media quenching terhadap laju pendinginan.

Circulation or agitation	Grossmann quench severity factor, H			
	Brine ^(a)	Water ^(a)	Oil ^(a) and salt	Air ^(a)
None	2	0.9-1.0	0.25-0.30	0.02
Mild	2-2.2	1.0-1.1	0.30-0.35	...
Moderate	...	1.2-1.3	0.35-0.40	...
Good	...	1.4-1.5	0.4-0.5	...
Strong	...	1.6-2.0	0.5-0.8	...
Violent	5	4	0.8-1.1	...

Sumber :ASM Handbook Volume 4 Heat Treating, 1991

Tabel 2.2 menunjukkan tentang pengaruh berbagai media quenching terhadap laju pendinginan dari material, dimana apabila laju pendinginan semakin tinggi, yang ditunjukkan dengan semakin tingginya *Grossman Quench Severity Factor*, maka semakin tinggi kemampuan material membentuk fasa martensit atau nilai kekerasan dapat bertambah secara signifikan.