

BAB 3

SIMULASI PEMODELAN SISTEM TOMOGRAFI ULTRASONIK

Desain Sistem aplikasi ultrasonik ini akan sangat bergantung dari karakteristik transduser dan parameter keretakan di dalam suatu spesimen uji yang digunakan. Percobaan simulasi merupakan suatu hal yang sederhana dan ekonomis dibandingkan dengan percobaan sesungguhnya jika dihubungkan dengan konsep pendidikan dalam dunia NDE-*Nondestructive Evaluation*. Karena dengan simulasi maka akan sangat mudah dalam perubahan berbagai parameter yang diinginkan.

Pemodelan simulasi ultrasonik menggunakan persamaan fisika dan metode numerik untuk memprediksikan hasil dari suatu eksperimen. Penggunaan software pada simulasi, akan memungkinkan kemudahan dalam perubahan berbagai parameter yang mampu merubah hasil sesuai dengan yang diinginkan. Model yang dibuat akan digunakan untuk memprediksikan berbagai parameter fisika dalam percobaan yang akan dianalisa.

Sepatutnya pembahasan suatu medan perambatan akustik (*acoustic fields*) tidak terlepas dari pembahasan *spatial impulse response*. Dengan menganalisa *spatial impulse response* maka kita akan mengetahui bagaimana menerangkan terjadinya suatu pulsa yang diemisikan dan atau suatu gelombang yang dihamburkan. Kemudian juga dapat dijelaskan mengenai karakteristik atenuasi dengan syarat-syarat pada batasnya.

Analisis numerik yang mengkaitkan kita pada pembahasan *spatial impulse response* akan menuntun kita pada penggunaan Prinsip Huygens yang menerangkan bagaimana karakteristik tekanan di suatu medium perambatan suara pada posisi manapun dan waktu kapanpun. Kemudian berkaitan dengan tekanan yang dihasilkan dari suatu transduser akan dijelaskan dengan Integral Rayleigh. Integral ini merupakan suatu pernyataan dari Prinsip Huygens yang menerangkan bahwa suatu medan perambatan suara dapat ditentukan dengan mengintegrasikan semua elemen-elemen area yang kecil yang berkontribusi pada suatu batasan (*boundary*) yang menghasilkan suatu tekanan.

Namun demikian alih-alih pada penelitian ini menggunakan pembahasan tsb sehingga akan membuat menjadi lebih rumit, maka akan difokuskan pada penggunaannya secara praktis dari software COMSOL Multiphysics v3.4.

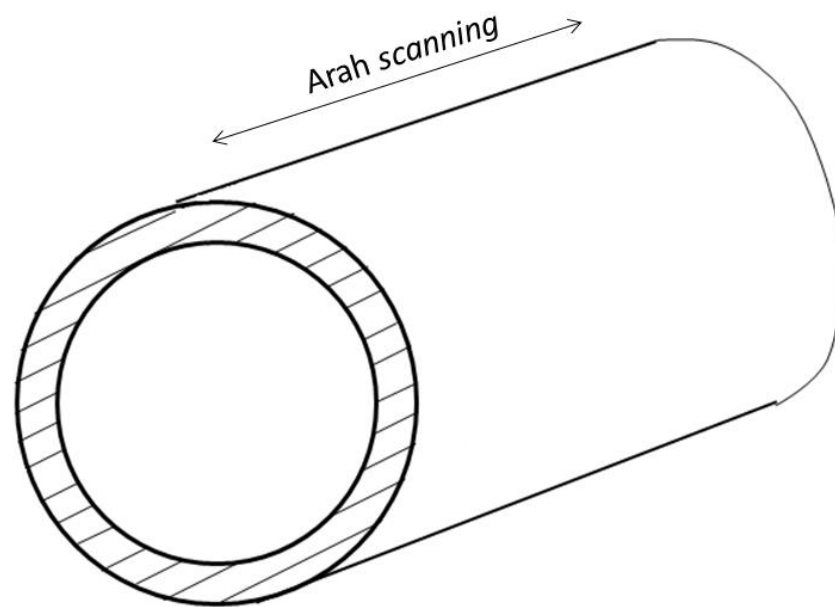
Pada bab ini akan diterangkan bagaimana penelitian dengan simulasi ini dilakukan. Untuk memulai suatu simulasi maka perlu diketahui pula landasan teori atau bentuk persamaan diferensial yang akan digunakan, untuk itu akan diterangkan berkenaan dengan penelusuran sistem persamaan yang akan digunakan dalam simulasi.

3.1 Deskripsi Sistem

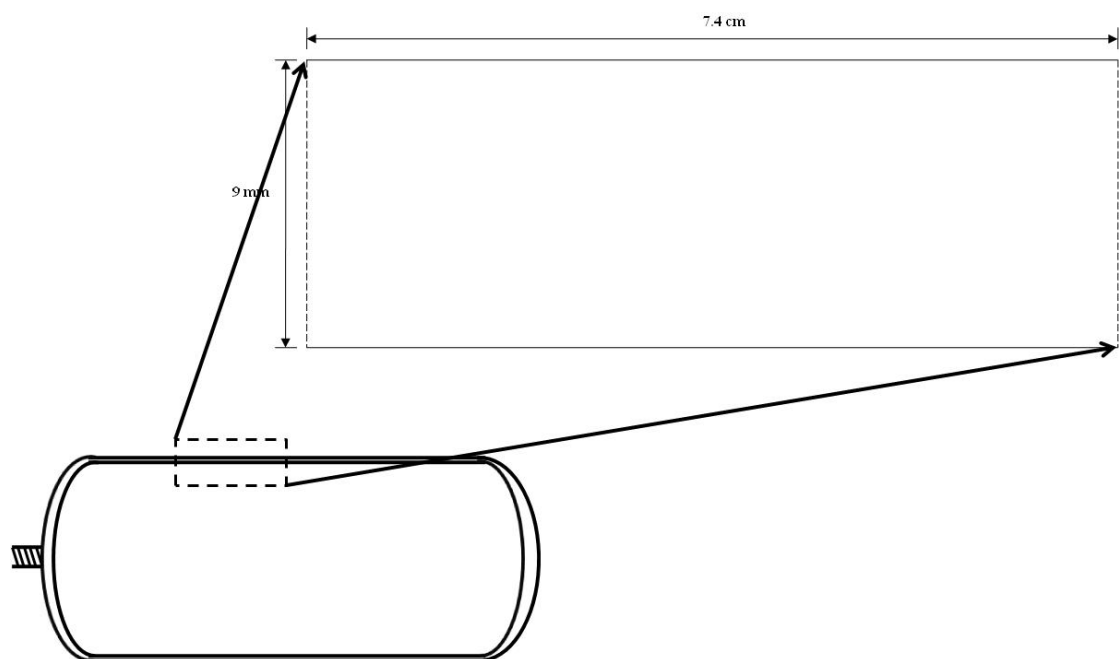
Sistem yang dirancang untuk tujuan mendeteksi keretakan ini, akan menggunakan dua buah transduser ultrasonik. Satu transduser akan berfungsi sebagai Transmitter, yang akan aktif mengemisikan pulsa gelombang ultrasonik ke dalam medium logam tabung CNG. Sinyal yang telah bertransmisi kemudian dideteksi oleh transduser berikutnya yang kemudian akan disebut sebagai Receiver. Sinyal yang dideteksi merupakan fungsi terhadap kondisi dari media perambatan gelombang ultrasonik. Sinyal ini kemudian dianalisa untuk dikarakterisasikan terhadap hubungannya dengan kondisi keretakan yang terjadi.

Pada sistem ini dimodelkan sebuah penjalaran gelombang ultrasonik yang ditransmisikan oleh sebuah transmitter transduser bertipe angle-beam 70° . Gelombang yang ditransmisikan akan berfrekuensi sebesar 5 MHz. Setelah memasuki medium logam tabung CNG, dan telah mengalami berbagai efek atenuasi dari adanya suatu keretakan kemudian gelombang tsb diakuisisi oleh sebuah receiver transduser bertipe angle-beam 70° . Model dari medium yang disimulasikan adalah 2 dimensi. Karena penempatan transduser pada saat *scanning* adalah searah sumbu tabung (Gambar 3.1) maka medium yang dimodelkan adalah bagian dari posisi medium seperti pada Gambar (Gambar 3.2).

Penggunaan metode elemen-hingga mengharuskan pemahaman dari berbagai parameter fisika suatu kasus, untuk itu akan diturunkan persamaan gelombang ultrasonik di dalam suatu medium. Persamaan ini menjadi dasar dari pemodelan dengan menggunakan COMSOL Multiphysics v3.4.



Gambar 3.1 Posisi arah *scanning*



Gambar 3.2 Model geometri medium

3.1.1 Persamaan Gelombang PDE Hiperbolik

Untuk merepresentasikan pergeseran partikel medium padatan elastik akibat perambatan gelombang ultrasonik (*displacement*) maka digunakan fungsi potensial: (Schmerr dan Song, 2007)

$$\vec{u} = \nabla\phi + \nabla \times \vec{\Psi} \quad (3.1)$$

ϕ merupakan potensial skalar yang merepresentasikan Gelombang Longitudinal (*P-Waves*). Sedangkan Ψ merupakan potensial vektor yang merepresentasikan Gelombang Transversal (*S-Waves*). Sesuai dengan persamaan *Navier*, maka fungsi potensial tsb harus sesuai dengan persamaan gelombang :

$$c_p^2 \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0 \quad (3.2)$$

$$c_s^2 \nabla^2 \vec{\Psi} - \frac{\partial^2 \vec{\Psi}}{\partial t^2} = 0 \quad (3.3)$$

Persamaan yang menggambarkan perambatan gelombang dalam padatan elastik di atas merupakan persamaan diferensial partial orde dua.

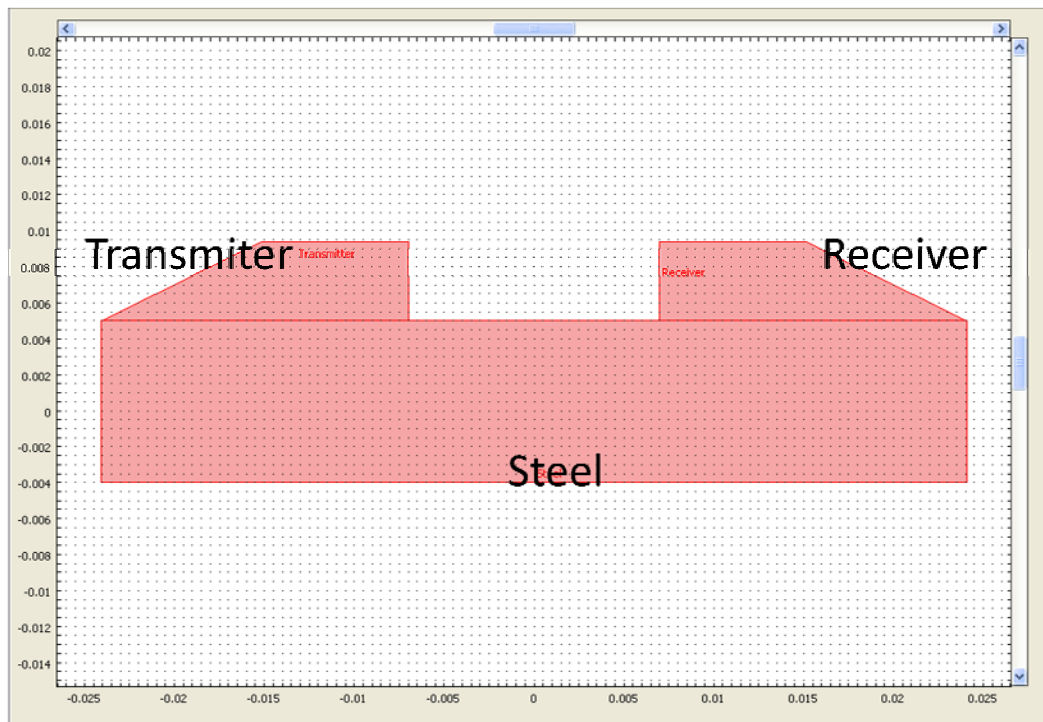
3.2 Model Sistem 2D

Ada beberapa teknik yang digunakan untuk memodelkan sistem perambatan ultrasonik, metode-metode tersebut menggunakan **PENDEKATAN ANALITIK**, dan **METODE-METODE NUMERIK** : Metode Elemen Hingga (Finite Element Methods - FEM), Metode Spektrum Angular (Angular Spectrum Method - ASM), dan Metode Impulse-Response Spasial (Spatial Impulse-Response Method - SIRM). Masing-masing metode tentunya memiliki keuntungan dan kerugian sendiri.

Pemodelan yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*). Metode numerik ini akan menghitung medan rambat gelombang yang dihasilkan oleh sistem. Metode FEM merupakan sebuah teknik yang cukup mapan dalam dunia komputasi untuk areal media yang kompleks dan heterogen. Dengan metode ini medan dari gelombang akan direpresentasikan berupa serangkaian persamaan diferensial dasar. Pemodelan akan berdasarkan pada solusi persamaan – persamaan diferensial tersebut. Namun demikian, berkaitan dengan kekompleksan dari model maka waktu komputasi

yang diperlukan sangat menyita waktu. Juga jarak yang cukup jauh antara transduser dengan reflektor akan menyebabkan jumlah *propagation steps* yang dibutuhkan akan sangat banyak. Pada kasus tertentu, *error* yang dimiliki pada setiap *propagation* dalam proses komputasi akan mengakibatkan *unacceptably large error* yang terakumulasi.

Bentuk geometri pada COMSOL Multiphysics tampak pada Gambar (3.3).



Gambar 3.3 Posisi transduser pada metode eksperimen (atas). Bentuk Geometri Kasus 2 Dimensi, *free defect* yang disesuaikan dengan metode eksperimen (bawah)

3.2.1 Pemodelan Kasus Sistem

Dengan melihat persamaan (3.2) maka persamaan gelombang metode elemen-hingga pada COMSOL yang menggambarkan perambatan gelombang dalam padatan elastik yaitu persamaan diferensial partial orde dua **Mode Wave Equation** pada *PDE Modes*

$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla u - au + \gamma) + \beta \cdot \nabla u + au = f$$

u merupakan variabel single yang bebas dan merupakan suatu fungsi yang belum diketahui oleh COMSOL. Simulasi ini menganggap u merupakan suatu fungsi *displacement*/besarnya pergeseran suatu partikel pada medium perambatan. e_a : matrix massa, d_a : koefisien redam, c : koefisien difusi, a : koefisien absorpsi, β : koefisien konveksi, f : *source term*.

3.2.2 Parameter Subdomain

Parameter subdomain menjelaskan mengenai karakteristik fisika pada domain utama model. Domain utama model ini dibagi kedalam beberapa subdomain. Pada subdomain dapat diatur dengan nilai yang berbeda-beda dengan beberapa tipe sebagai berikut :

- a. Koefisien : mendefinisikan persamaan diferensial parsial pada subdomain.
- b. Karakteristik material : mendefinisikan kasus fisika pada subdomain.

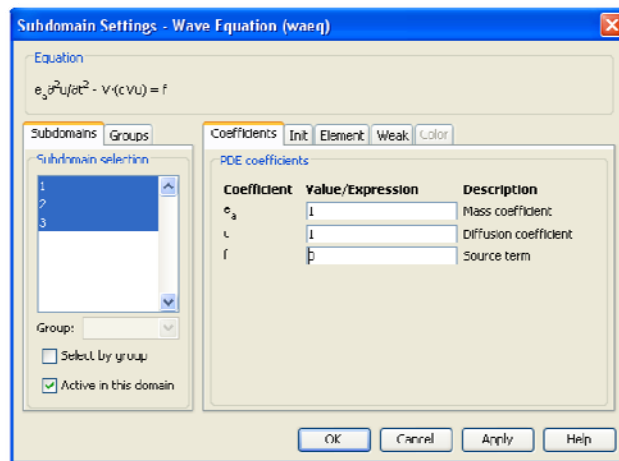
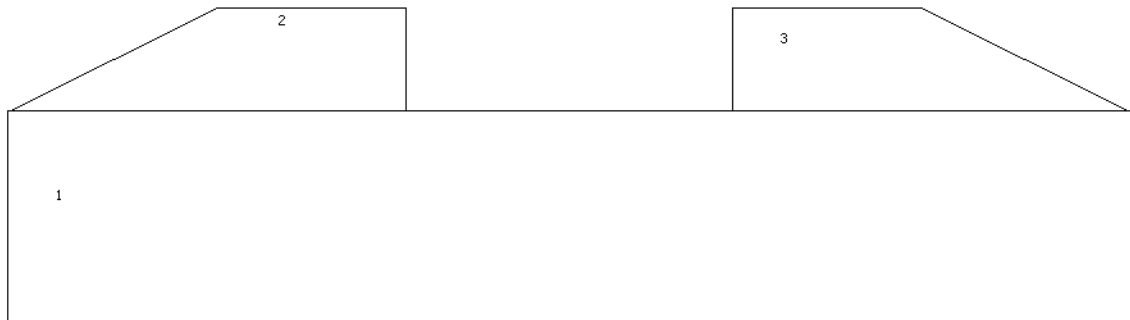
Persamaan gelombang ultrasonik di dalam medium ini merupakan PDE linier orde kedua bertipe Hiperbolik. Pada pengujian ultrasonik, gelombang yang diciptakan dari transduser akan bebas bergerak sehingga akan memenuhi persamaan gelombang homogen. Oleh karena itu suku *body force* $f = 0$ (Schmerr dan Song, 2007).

Persamaan *subdomain* pada medium adalah sbb

$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \nabla \cdot (c \nabla u) = f$$

Nilai c pada persamaan di atas jika dibandingkan dengan persamaan perambatan gelombang merupakan kuadrat dari kecepatan gelombang di

medium tabung tersebut. Model yang disimulasikan merupakan perambatan gelombang longitudinal (*P-Waves*) sehingga nilai kecepatan suara yang digunakan adalah kecepatan suara gelombang longitudinal pada material *Carbon Manganese*.



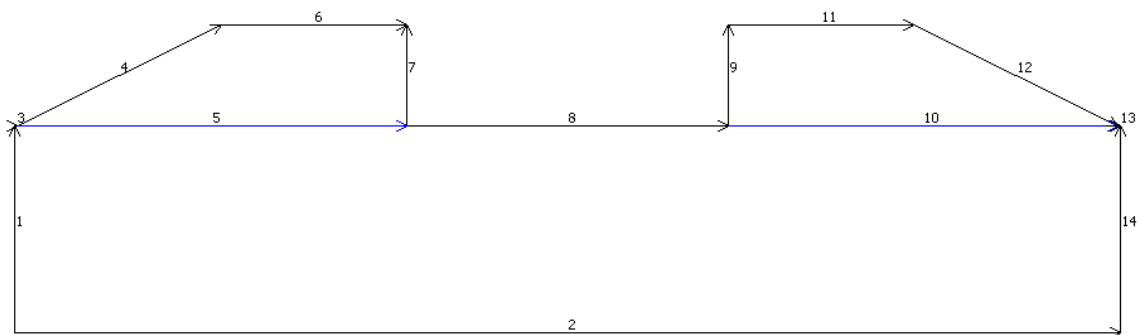
Gambar 3.4 Label nomor subdomain (atas), tampilan jendela pengaturan *Subdomain* (bawah)

Subdomain Receiver berada pada Subdomain selection 3, Subdomain Transmitter berada pada Subdomain selection 2, dan Subdomain Medium steel berada pada Subdomain selection 1.

Subdomain transduser merupakan berjenis bahan Plexiglas dengan kecepatan rambat gelombang longitudinal ultrasonik sebesar 2760 m/s. Sedangkan jenis bahan untuk logam yang digunakan adalah baja / *steel* dengan kecepatan rambat gelombang longitudinal ultrasonik adalah 5850 m/s.

3.2.3 Parameter Boundary Condition

Syarat batas yang ditentukan pada saat pemodelan menentukan kondisi yang menghubungkan geometri model dengan sekelilingnya. Transduser yang dimodelkan tidaklah sesuai dengan bentuk aslinya namun yang diutamakan adalah *angle-beamnya* sehingga sesuai dengan prediksi perambatan gelombang ultrasonik di dalam medium. Itu sebabnya pemodelan sebuah transduser hanya dimodelkan sebuah boundary tambahan, yaitu Transmitter (boundary 4, 5, 6, 7) dan Receiver (boundary 9, 10, 11, 12). Sebagai sisi Elemen Aktif Transduser Transmitter adalah boundary 4 sedangkan Receiver pada boundary 12.



Gambar 3.5 Boundaries pada geometri model

Perbedaan antara *boundary* geometri transduser dengan *boundary* medium yang lain adalah pada koefisien tipe *boundary*. Secara umum suatu *boundary* ditepekan menjadi menyerap (*absorbing*) atau memantulk (*reflecting*). Dua tipe *boundary condition* yang digunakan, yaitu *Generalized Neumann Condition* dan *Dirichlet Condition*.

- a. *Generalized Neumann condition (Robin condition)*, syarat batasnya ditentukan oleh koefisien q dan g :

$$\mathbf{n} \cdot (c \nabla u) + q \cdot u = g$$

q merupakan matrix $n \times n$, sedangkan g merupakan vektor $n \times 1$. Kondisi ini akan menspesifikasikan nilai dari turunan solusi pada suatu batas (*boundary*).

b. *Dirichlet condition*, syarat batasnya ditentukan oleh nilai r :

$$h \cdot u = r$$

h adalah faktor pemberat dengan nilai 1, sedangkan r adalah vektor $n \times 1$ yang merupakan nilai dari u . kondisi ini menspesifikasikan nilai suatu solusi pada suatu batas (*boundary*).

Pulsa ultrasonik yang diemisikan dari transduser dapat dimodelkan dengan fungsi pergeseran partikel terhadap waktu (Lester W dan Sung-Jin, 2007) yang merupakan bentukan dari fungsi Gaussian:

$$u(t) = \cos(2\pi f_c t) \exp[-t^2/4A^2] \quad (3.4)$$

Dengan f_c : *center frequency*, $A = \sqrt{\ln 2}/(\pi bw)$, bw : *bandwidth*. Amplitudo fungsi Gaussian disubstitusi oleh fungsi sinusoidal karena ingin membentuk sebuah sinyal yang sinusoidal. Sementara nilai A pada persamaan di atas merepresentasikan fungsi yang akan mengatur lebar dari pulsa yang dihasilkan.

Dengan demikian, kondisi pada *boundary* 4 bertipe Dirichlet dan memiliki nilai $r = u(t)$. Sedangkan boundary lainnya bertipe Dirichlet namun bernilai $r = 0$, artinya permukaan ini akan memantulkan gelombang ultrasonik. Sedangkan pada boundary 1 dan 14 bertipe Neumann, karena dianggap geometri logam ini memanjang – pada pemodelan hanya potongan saja untuk meminimalisir waktu komputasi.

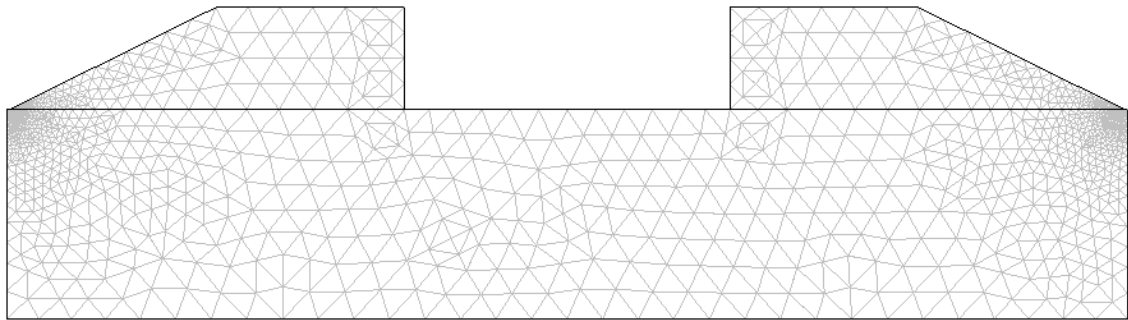
Tujuan utama dari pemodelan pancaran gelombang ultrasonik ini adalah mampu mensimulasikan secara praktis dari aplikasi di lapangan.

3.2.4 Parameter Mesh

Mesh merupakan bagian dari model geometri yang terdiri dari unit-unit kecil dengan bentuk yang sederhana (*triangular* atau *quadilateral*). Ukurannya dapat diatur sekecil apapun sesuai dengan kemampuan tingkat komputasi dari Komputer yang digunakan. Mesh merupakan suatu metode bagian dari Metode Elemen-hingga untuk menyelesaikan suatu kasus dimana domain kasus akan dibagi kedalam beberapa bagian kecil (*mesh*) (Comsol Documentation v3.2).

Agar kondisi simulasi cukup stabil, maka ukuran mesh h diatur hingga lebih kecil dari ukuran panjang gelombang yang merambat pada medium (Barauskas, 2000).

Ukuran h yang digunakan bervariasi antara $(1/6)\lambda$ dan $(1/10)\lambda$. Penentuan ini dibatasi pada kemampuan komputer saat penelitian.

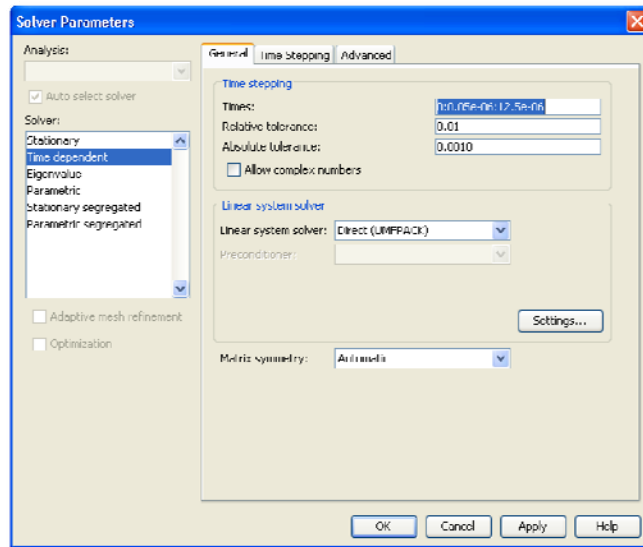


Gambar 3.6 Geometri yang telah di-*mesh*

Jumlah elemen dari mesh ini akan berhubungan langsung dengan keakurasian dari solusi. Semakin banyak jumlah elemen yang digunakan maka semakin kecil error yang dihasilkan. Namun demikian, banyaknya jumlah elemen mesh akan berkenaan dengan besarnya memori yang digunakan.

3.2.5 Parameter Solver

Pada COMSOL Multiphysics memiliki beberapa *Solver* yang disesuaikan dengan kasus yang akan diselesaikan. Kasus yang digunakan pada pemodelan adalah bergantung terhadap waktu (*time-dependent*). Oleh karena itu digunakan *Time-dependent Solver*. Dan *time steps* yang digunakan adalah waktu yang dibutuhkan gelombang merambat sejauh h . h adalah ukuran dari *mesh*. Dikarenakan Δt yang begitu kecilnya mengakibatkan ketidakmampuan dari komputer yang digunakan untuk melakukan *solving solution problem*. Untuk itu Δt yang digunakan adalah $0.05 \mu\text{s}$.



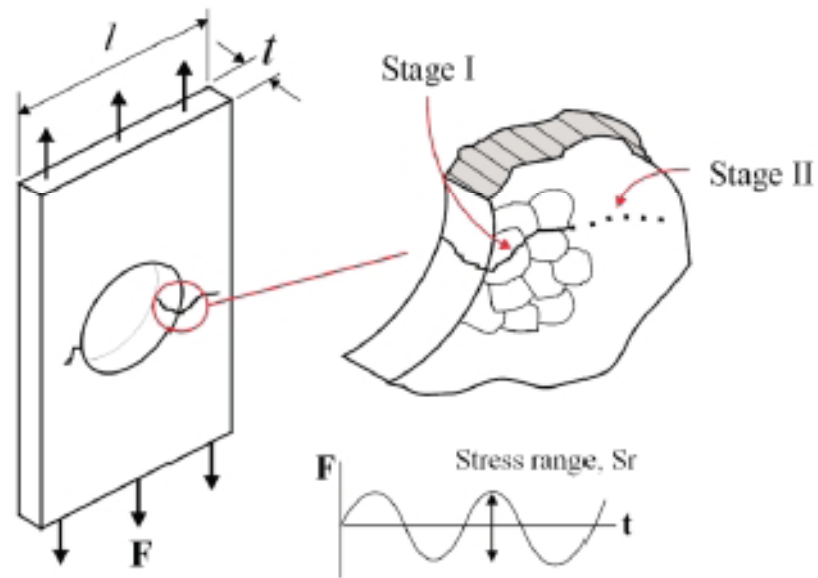
Gambar 3.7 Tampilan jendela pengaturan *Solver*

3.3 Deskripsi Kasus

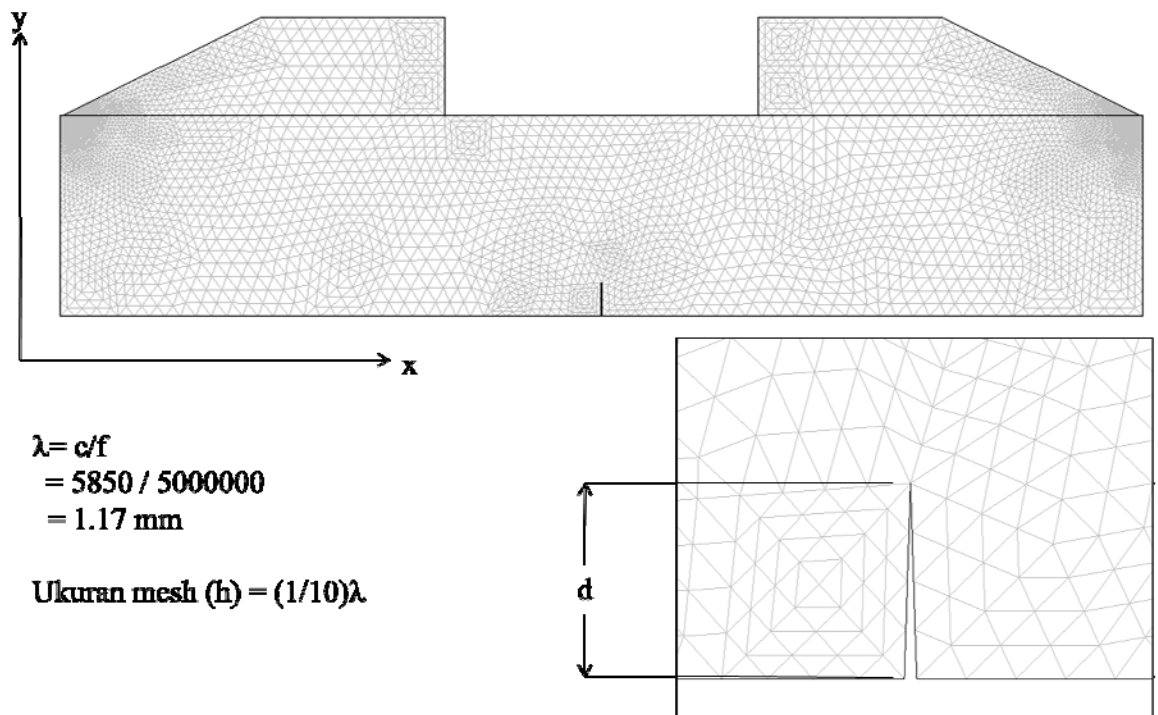
Permasalahan yang diangkat pada penelitian metode simulasi ini adalah mengetahui efek dari adanya keretakan dengan nilai intensitas yang diterima pada receiver. Menurut Halfpenny, pertumbuhan suatu keretakan terdiri dari dua tahapan (Halfpenny). Pada tahapan awal, suatu keretakan akan menjalar/tumbuh dengan orientasi sekitar 45° terhadap arah pemberian gaya. Kemudian setelah itu akan memasuki tahapan berikutnya dengan orientasi menjadi 90° .

Untuk itu ada beberapa hal yang akan dimodelkan dengan ketentuan sebagai berikut:

- 1). Dimensi dari keretakan yang dimodelkan disederhanakan berupa segitiga yang mengurangi luasan domain logam. Dengan lebar yang konstan tetapi dengan tinggi (kedalaman) yang bervariasi.
- 2). Efek penggunaan *Couplant* ditiadakan untuk mengurangi kekompleksan analisis



Gambar 3.8 Ilustrasi pertumbuhan keretakan pada dua tahapan awal.



Gambar 3.9 Model bentuk crack dengan kedalaman variasi d

PARAMETER-PARAMETER SIMULASI MODEL

→ Subdomain settings

- e_a : matrix massa, [1]
 c : koefisien difusi, [5850²] untuk medium rambat dan [2760²] untuk transduser
 f : *body force*, [0]

→ Boundary conditions settings

- f_c : *center frequency*, frekuensi gelombang ultrasonik dalam medium [5MHz]
 bw : bandwidth frekuensi transduser ultrasonik, [2MHz]

→ Mesh parameter

- h : ukuran mesh, [(1/6) λ] [(1/10) λ]

→ Solver parameter

- t : lama waktu simulasi, [12.5 μ s]
 Δt : *time step propagation*, selang waktu rambat gelombang dalam proses simulasi, [0.1 μ s] [0.05 μ s]

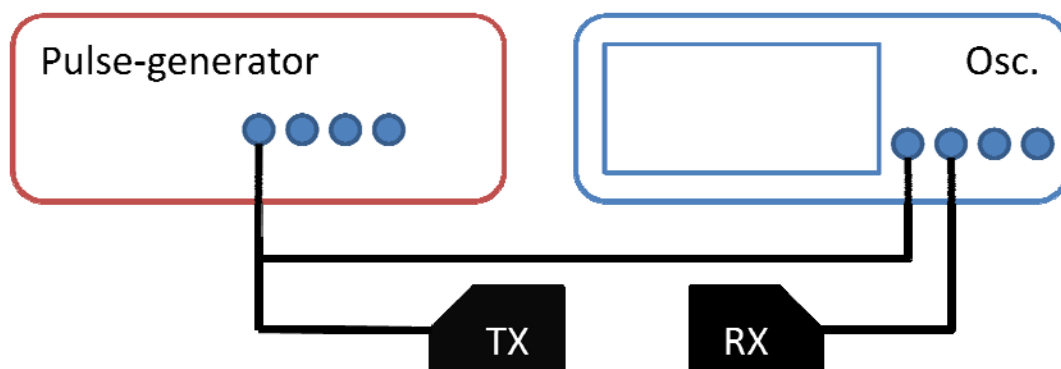
BAB 4

INSTRUMEN SISTEM APLIKASI ULTRASONIK

Setelah sistem aplikasi ultrasonik disimulasikan sebagaimana penjelasan pada bab sebelumnya dan sudah diketahui karakteristiknya, kemudian akan dilakukan eksperimen dengan perangkat hardware. Pada bab ini akan dijelaskan segala hal yang berkenaan dengan eksperimen yang telah dimodelkan pada bab sebelumnya.

4.1 Deskripsi Sistem

Sistem ini terdiri dari Pulse-generator, Oscilloscope : **Tektronix TDS2014B**, Transduser Ultrasonik : **TO19967**, dan Transduser Ultrasonik : **TO19966**.

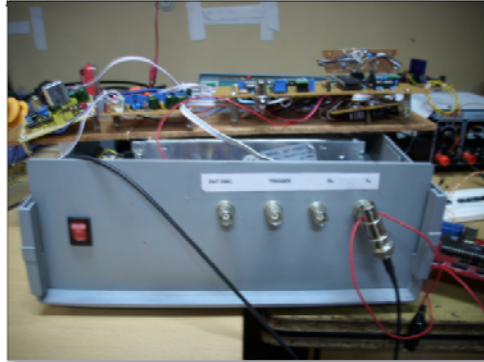


Gambar 4.1 Diagram skematik *Ultrasonic Tester Probe Angle 70°*

Dengan desain sistem seperti ini, perubahan intensitas dapat dilihat pada osiloskop. Posisi antara transduser Receiver dan Transmitter adalah tetap, dan keduanya akan aktif bergerak untuk mendeteksi adanya keretakan di seluruh permukaan tabung.

Akan dilakukan percobaan dengan sebuah potongan tabung dengan kondisi permukaan yang berbeda. Hal ini bertujuan untuk melihat perbandingan intensitasnya. Untuk lebih jelasnya mengenai cara kerja alat dapat dilihat pada

subbab 4.2 Setelah itu, hasil dari eksperimen ini akan dibandingkan dengan hasil dari simulasi.



Gambar 4.2 Pulse generator



Gambar 4.3 Oscilloscope : **Tektronix TDS2014**



Gambar 4.4 Transduser Ultrasonik : **TO19967**, Transduser Ultrasonik : **TO19966**



Gambar 4.5 Potongan logam tabung CNG sebagai percobaan

4.2 Prinsip Kerja

Sebuah pulse-generator akan aktif menghasilkan gelombang listrik pulsa dengan amplitudo sebesar 1.72 volt dengan frekuensi $4,90 \pm 0,10$ MHz. Sinyal ultrasonik yang diemisikan ke dalam dinding tabung akan bertransmisi dari Transmitter hingga mencapai Receiver. Pada osiloskop akan ditampilkan data sinyal dari Transmitter dan Receiver.

Untuk menurunkan besar impedansi interface (rongga udara) antara permukaan transduser dengan permukaan tabung, maka dibutuhkan *couplant*. *Couplant* yang digunakan adalah oli atau minyak goreng.

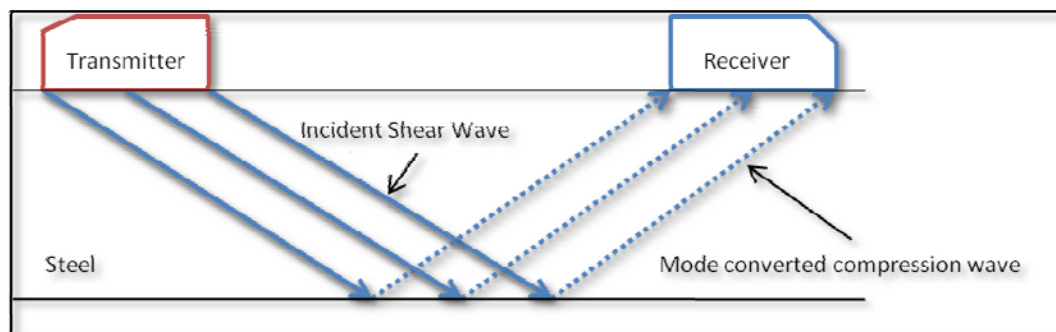
Pada sistem ini besarnya atenuasi akan memberikan gambaran umum dari kondisi cacat dari tabung. Persamaan atenuasi yang digunakan adalah sebagai berikut :

— (4.1)

Ket : A_1 : Intensity Echo
 A_0 : Intensity Incident
 $\alpha(f)$: Koefisien atenuasi
 d : Jarak tempuh di dalam medium

Perbedaan kondisi keretakan akan menghasilkan perbedaan nilai $\alpha(f)$ secara umum.

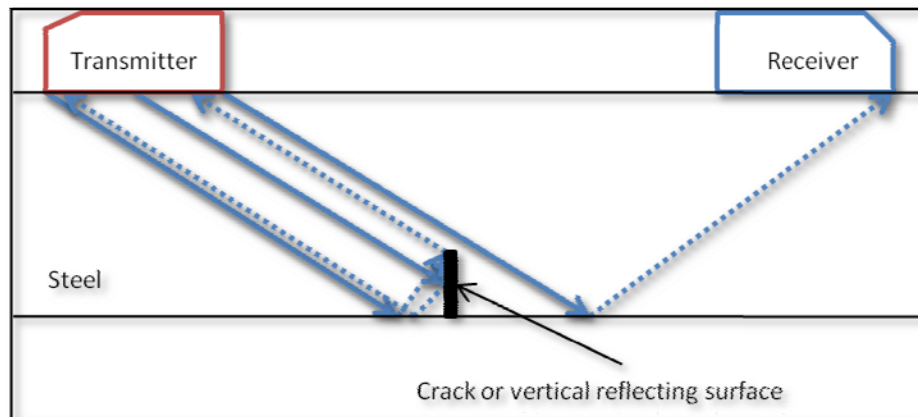
Gambaran umum mengenai hubungan kualitatif antara keretakan yang terjadi di dalam tabung dengan intensitas yang diterima *receiver* dapat dijelaskan melalui Gambar berikut:



Gambar 4.6 Kondisi logam tidak ada crack

Dalam keadaan normal dimana sebuah permukaan dalam tabung tidak memiliki keretakan, maka hampir semua sinyal yang ditransmisikan oleh transmitter akan diterima oleh receiver (dengan mengalami efek atenuasi tentunya).

Sedangkan pada keadaan abnormal dimana terdapat sebuah keretakan di dalam tabung maka keretakan tersebut akan menghambat jalannya gelombang ultrasonik yang dipancarkan. Intensitas sinyal yang diterima tentunya akan berkurang jika dibandingkan dengan keadaan normal, karena sinyal yang merambat akan terdifraksi ke berbagai arah.



Gambar 4.7 Kondisi logam ada crack

Semakin dalam sebuah keretakan maka akan semakin besar hambatan bagi sinyal dan akan semakin kecil pula intensitas sinyal yang diperoleh.