

Simulasi Perambatan Gelombang Ultrasonik dengan Model Berkas Multi Gaussian dan Model Pengukuran Thompson Grey

Ni Made D. Ryaumariastini, Deddy Kurniadi & Amoranto Trisnobudi

Program Studi Teknik Fisika – Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganesha 10, Bandung 40132

kurniadi@tf.itb.ac.id

Abstrak

Transduser ultrasonik adalah komponen untuk pembangkitan gelombang ultrasonik. Dalam aplikasi tertentu, pemilihan transduser yang tepat ditentukan oleh parameter yaitu, frekuensi, diameter, voltage drive, dan jarak antar transduser. Salah satu cara yang efektif untuk menentukan parameter transduser yang sesuai adalah dengan melakukan simulasi perambatan gelombang ultrasonik yang dihasilkan transduser dengan berbagai variasi parameternya. Pada studi ini dilakukan kajian simulasi perambatan gelombang ultrasonik untuk transduser tercelup berbentuk piston dengan pendekatan model berkas gelombang multi-Gaussian dan model pengukuran Thompson-Gray.

Simulasi menggunakan perangkat lunak yang dibuat berupa graphical user interface. Parameter-parameter transduser divariasikan untuk pengamatan pada berbagai kondisi. Hasil kajian simulasi divalidasi dengan hasil pengukuran eksperimen perambatan gelombang ultrasonik dari transduser tercelup berbentuk piston. Dari kajian, diperoleh perbedaan antara hasil simulasi dan eksperimen adalah 3.55% untuk nilai selisih tegangan keluaran dan 0.17% untuk nilai selisih waktu tempuh.

Kata kunci : gelombang ultrasonik, transduser ultrasonik, model pengukuran Thompson-Gray, model berkas multi-Gaussian.

Abstract

Ultrasonic transducer is a component for ultrasonic wave generation. In some application, selection of transducer is also determined by some parameters such as frequency, diameter, voltage drive and transducer distance. One of effective parameter identification method to choose an appropriate transducer is by simulating ultrasonic wave propagation that obtained by transducer with variation of parameter. In this study, simulation and analysis of ultrasonic wave propagation for submerged piston transducer were implemented by employing multi gaussian wave beam model and Thompson-Gray measurement method. Simulation with variation of transducer parameter is performed using graphical in order to observe wave generation at various condition. . The result of simulation were compared with experiment result of ultrasonic wave propagation for submerged piston transducer. Deviation of simulation and experiment are 3.55% and 0.17% for voltage output and time flight, respectively.

Keyword : ultrasonic wave, ultrasonic transducer, Thompson-Gray measurement method, multi-Gaussian beam model.

1 Pendahuluan

Gelombang ultrasonik merupakan gelombang mekanik longitudinal dengan frekuensi di atas 20 kHz yang dapat merambat dalam medium padat, cair, dan gas. Saat ini, telah banyak perkembangan aplikasi gelombang ultrasonik diantaranya dalam bidang kedokteran, kelautan, industri, uji tak merusak dan lain-lain. Gelombang ultrasonik dibangkitkan melalui suatu perangkat yaitu transduser ultrasonik.

Untuk mendapatkan hasil yang optimum dari berbagai aplikasi gelombang ultrasonik, perlu pemilihan parameter transduser yang tepat. Beberapa parameter transduser yang harus ditentukan adalah frekuensi, jarak antar transduser, tegangan eksitasi dan diameter

transduser. Salah satu cara yang efektif untuk menentukan parameter-parameter transduser adalah dengan melakukan pemodelan dan simulasi numerik radiasi gelombang ultrasonik yang dipancarkan oleh suatu transduser. Karena simulasi ini berupa program komputasi, maka parameter-parameter yang mempengaruhi hasil simulasi dapat divariasikan sesuai keperluan. Alasan utama untuk melakukan simulasi numerik adalah biaya yang relatif murah dan waktu yang cepat dibandingkan melakukan eksperimen sebenarnya dengan mencoba-coba berbagai macam transduser.

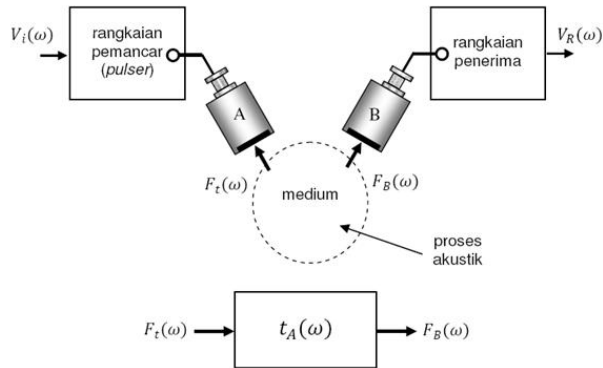
Setiap medium akan mempengaruhi pola perambatan berkas gelombang ultrasonik. Simulasi perambatan gelombang ultrasonik akan mempertimbangkan medium uji untuk memprediksi medan kecepatan ketika gelombang merambat. Medium uji dapat bersifat homogen maupun non-homogen. Dengan kajian simulasi, diharapkan dapat diperoleh gambaran pola perambatan gelombang dari transduser dan tegangan yang diterima transduser, sehingga dapat ditentukan parameter transduser yang tepat. Pada makalah ini dibahas suatu simulasi radiasi gelombang ultrasonik pada transduser tercelup berbentuk piston dengan menggunakan model berkas *multi-Gaussian* [4][5] dan model pengukuran *Thompson-Gray* [6]. Medium perambatan yang digunakan adalah air serta transduser yang digunakan dengan frekuensi 5 MHz dan berdiameter 12 mm. Hasil simulasi dibandingkan dengan hasil eksperimen

2 Konsep Dasar

2.1 Model Umum Pengukuran Ultrasonik [1][2][6]

Secara umum, sistem pengukuran ultrasonik dengan transduser berbentuk piston ditunjukkan pada Gambar 1. Dalam pengukuran tersebut, rangkaian pemancar dimodelkan dengan sebuah sumber tegangan dan sebuah impedansi elektrik. Pengkabelan dimodelkan dengan sistem elektrik dua cabang dengan suatu matriks transfer untuk pengkabelan sistem pemancar dan penerima. Rangkaian penerima dimodelkan dengan impedansi elektrik dan sebuah faktor penguatan. Transduser dimodelkan sebagai impedansi elektrik dengan suatu sensitivitas. Gaya yang dihasilkan transduser pemancar, dimodelkan dengan impedansi akustik transduser pemancar. Untuk sebuah transduser tercelup berbentuk piston, dapat diketahui bahwa impedansi adalah perkalian massa jenis dari medium dan kecepatan gelombang ultrasonik di medium dan luas daerah aktif dari transduser. Gelombang ultrasonik yang dihasilkan oleh transduser pemancar lalu berpropagasi menuju transduser penerima dengan pengaruh medium dan cacat jika ada. Propagasi gelombang yang kompleks dan proses penyebarannya dapat dikarakterisasi dengan fungsi transfer akustik yang dinyatakan dengan persamaan berikut,

$$F_B(\omega) = t_A(\omega) \cdot F_t(\omega) \quad (1)$$

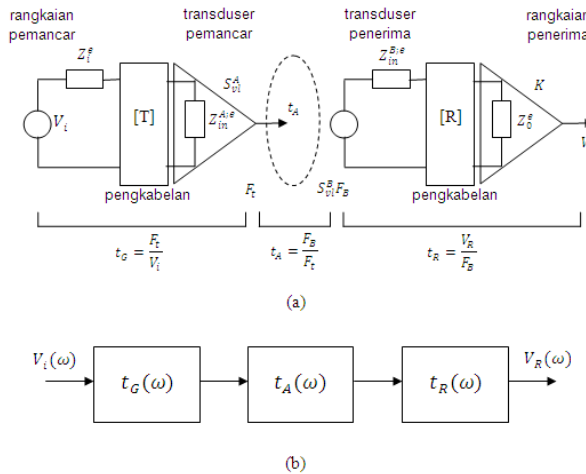


Gambar 1 Model pengukuran gelombang ultrasonik

2.2 Model Lengkap Pengukuran Ultrasonik [3][6]

Model lengkap dan diagram blok pengukuran ultrasonik ditunjukkan pada Gambar 2. Setelah transduser penerima mengubah gelombang ultrasonik menjadi sinyal listrik, sinyal listrik tersebut lalu melewati pengkabelan dan mengalami penguatan pada rangkaian penerima untuk menghasilkan tegangan yang diterima dalam domain frekuensi.

Fungsi transfer akustik tidak dapat diukur langsung dari pengukuran karena mengandung kuantitas-kuantitas yang tidak dapat diketahui seperti penyebaran dan pergerakan berkas gelombang ultrasonik, serta pengaruh cacat yang berakibat pada berkas gelombang tersebut jika ada. Akan tetapi kuantitas-kuantitas tersebut dapat dimodelkan dengan menggunakan model berkas gelombang tertentu. Dalam studi ini digunakan model berkas multi-Gaussian. Dengan model berkas multi-Gaussian, dapat dihindari perhitungan yang sangat sulit seperti model integral Rayleigh-Sommerfield untuk mensimulasikan radiasi gelombang ultrasonik.



Gambar 2 Model rangkain listrik dan diagram blok pengukuran gelombang ultrasonik

Sistem pengukuran ultrasonik dimodelkan menjadi rangkaian beberapa sistem *Linear Time-shift Invariant* sehingga nilai tegangan keluaran $V_R(\omega)$ dapat ditulis sebagai hasil perkalian fungsi transfer setiap proses dengan sumber tegangan yaitu,

$$V_R(\omega) = t_G(\omega)t_R(\omega)t_A(\omega)V_i(\omega) \tag{2}$$

Fungsi transfer $t_G(\omega)$, $t_R(\omega)$ dan $V_i(\omega)$ merupakan komponen-komponen elektrikal dan elektromekanikal, dapat dikombinasikan dalam sebuah fungsi sistem $s(\omega)$ berikut:

$$s(\omega) = t_G(\omega)t_R(\omega)V_i(\omega) \tag{3}$$

Model pengukuran *Thompson-Gray* untuk mensimulasikan tegangan yang diterima dalam domain frekuensi adalah,

$$V_R(\omega) = s(\omega)[\hat{V}_0(\omega)]^p A(\omega) \left[\frac{4\pi\rho_2c_{\alpha 2}}{-ik_{\alpha 2}Z_r^{ia}} \right] \tag{4}$$

Dimana $\hat{V}_0(\omega)$ adalah amplituda medan kecepatan gelombang ternormalisasi, $s(\omega)$ adalah fungsi sistem, $A(\omega)$ adalah amplituda penyebaran gelombang dari cacat, dan sisanya adalah kombinasi dari medium dan parameter geometrinya. Pada studi ini, diasumsikan bahwa medium uji berada pada keadaan ideal dan tidak terdapat cacat sehingga persamaan (4) dapat dinyatakan dengan :

$$V_R(\omega) = s(\omega)[\hat{V}_0(\omega)]^p \left[\frac{4\pi}{-ik_{\alpha 2}r^2} \frac{\rho_2c_{\alpha 2}}{\rho_1c_{\alpha 1}} \right] \tag{5}$$

Amplituda medan kecepatan gelombang dapat dinyatakan dengan :

$$\hat{V}_0(\omega) = \exp[-\alpha_{\gamma_1}(\omega)z_1 - \alpha_{\gamma_2}(\omega)z_2] \begin{bmatrix} v_i^\gamma \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

v_i^γ / v_0 adalah medan kecepatan ideal untuk material yang tidak ada rugi-rugi dengan kecepatan normal v_0 di muka transduser yang akan dihitung dengan model *multi-Gaussian*.

2.3 Model Perambatan Berkas Gelombang [3][5]

Model perambatan berkas *multi-Gaussian* menggambarkan medan gelombang dari transduser tercelup berbentuk piston dengan melakukan superposisi dari beberapa berkas *Gaussian* tunggal. Untuk 15 jumlah berkas, model *multi-Gaussian* pada dua medium adalah :

$$\frac{v_i^\gamma}{v_0} = T_{12}^{\gamma:p} \sum_{r=1}^{15} \frac{A_r}{1 + iz_1 B_r / D_R} \frac{\sqrt{z_1^r}}{\sqrt{z_1^r + z_2(c_{\gamma_2} / c_{p1})}} \frac{\sqrt{z_2^r}}{\sqrt{z_2^r + z_2(c_{\gamma_2} / c_{p1})}} \cdot \exp \left[ik_{p1}z_1 + ik_{\gamma_2}z_2 + i \frac{k_{p1}}{2} \mathbf{y}^T [c_{p1} M_2^v(z_2)]_r \mathbf{y} \right] \quad (7)$$

dimana,

$$c_{p1} [M_2^v(z_2)]_r = \begin{bmatrix} \frac{1}{z_1^r + z_2(c_{\gamma_2} / c_{p1})} & 0 \\ 0 & \frac{1}{z_2^r + z_2(c_{\gamma_2} / c_{p1})} \end{bmatrix} \quad (8)$$

v_i^γ = Amplituda kecepatan

γ = Jenis gelombang, longitudinal atau transversal

v_0 = Kecepatan normal pada permukaan transduser

$T_{12}^{\gamma:p}$ = Koefisien transmisi

c = Kecepatan gelombang di medium

$k = \omega / c$ = Bilangan gelombang

z_n = Jarak pada arah z

M = Matriks kompleks [2x2]

$D_R = ka^2 / 2$ = Jarak Rayleigh, dimana a adalah jari-jari transduser

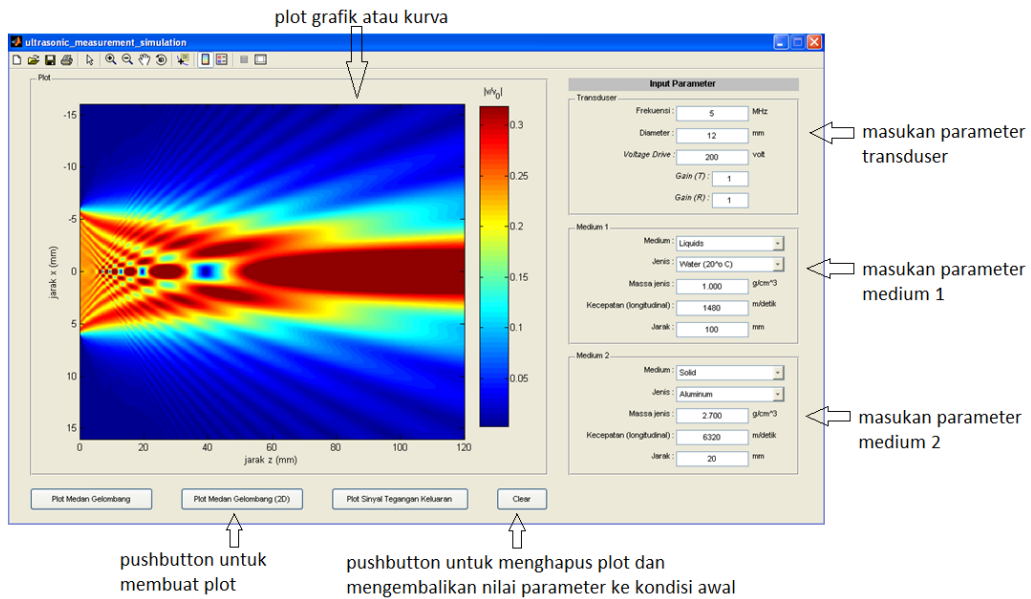
A_r, B_r = Koefisien *Wen* dan *Breazeale*, yaitu koefisien bilangan kompleks yang harus dicari untuk menemukan medan kecepatan yang tepat di muka transduser

$$z_n^r = \frac{(z_n - iD_R / B_r)}{M_n}$$

Jarak yang ditempuh gelombang Subscript 1 dan 2 menunjukkan medium 1 dan medium 2

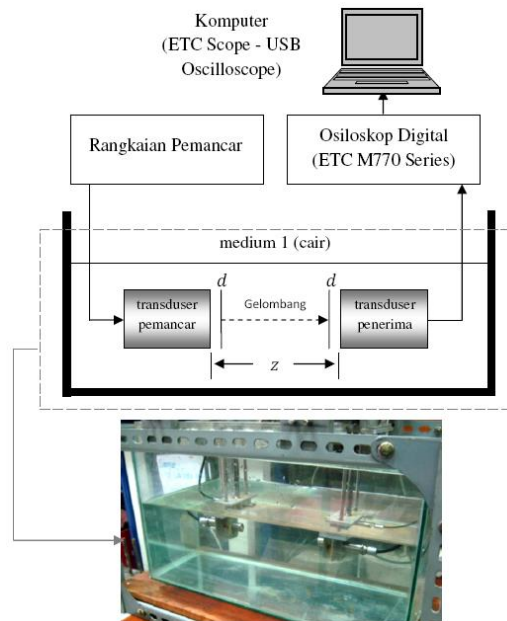
3 Simulasi dan Eksperimen

Model pengukuran ultrasonik diimplementasikan dalam serangkaian program numerik. Perangkat lunak yang dikembangkan menggunakan suatu *graphical user interface* (GUI) menggunakan fitur GUIDE (*Graphical User Interface Development Environment*) MATLAB, yang kemudian dikompilasi menjadi perangkat lunak (*stand-alone application*). Tampilan dari antarmuka perangkat lunak yang dibuat ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Tampilan perangkat lunak yang dikembangkan untuk simulasi

Untuk memvalidasi hasil simulasi berdasarkan model pengukuran ultrasonik tersebut, maka dilakukan eksperimen dengan pengaturan sistem ultrasonik *pitch-catch* seperti pada Gambar 4. Dua transduser tercelup berbentuk piston diletakkan pada sebuah tangki berisi air. Air diasumsikan homogen dan bermassa jenis 1 g/cm³. Kecepatan gelombang ultrasonik di dalam medium cair tersebut diasumsikan 1480 m/detik. Variasi dilakukan dengan mengubah jarak antar transduser. Titik pusat permukaan transduser diletakkan sejajar.



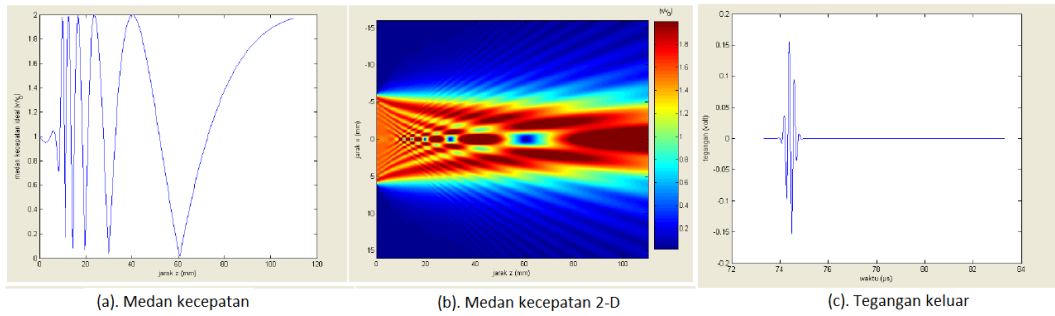
Gambar 4 Konfigurasi ultrasonik dalam simulasi dan eksperimen

Parameter-parameter transduser yang akan divariasikan dalam simulasi ini adalah diameter transduser, jarak antar transduser, dan frekuensi transduser ada pada Tabel 1 berikut,

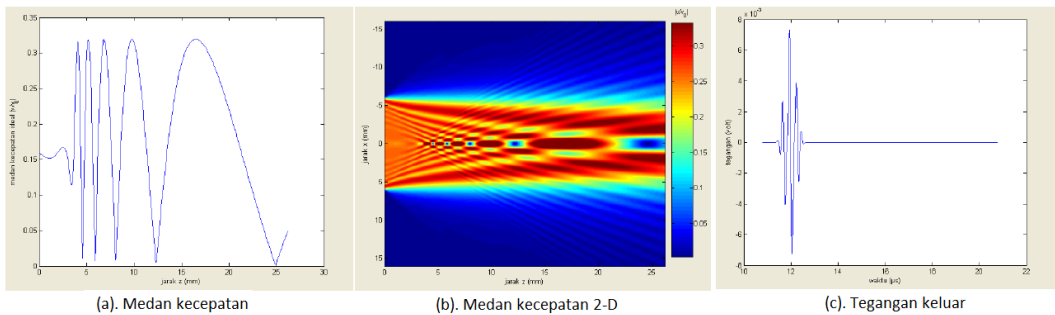
Tabel 1 Variasi parameter transduser dan medium uji yang disimulasikan

Percobaan No.	Parameter Transduser	Parameter Medium Uji 1	Parameter Medium Uji 2
1	Frekuensi 5 MHz Diameter 12 mm Tegangan 200 volt	Medium Air Densitas 1 g/cm ³ Kecepatan 1480 m/s Jarak 110 mm	
2	Frekuensi 5 MHz Diameter 12 mm Tegangan 200 volt	Medium Air Densitas 1 g/cm ³ Kecepatan 1480 m/s Jarak 14.7 mm	Medium Aluminium Densitas 2.7 g/cm ³ Kecepatan 6183 m/s Jarak 11.5 mm

Pada gambar-gambar berikut, ditunjukkan hasil simulasi yang dilakukan yaitu plot medan kecepatan 1-D dan 2-D serta sinyal tegangan keluar pada transduser penerima.



Gambar 5. Hasil simulasi pada percobaan no. 1



Gambar 6. Hasil simulasi pada percobaan no. 2

Pada Tabel 2 berikut menunjukkan perbedaan dalam nilai numerik antara hasil simulasi dan pengukuran pada eksperimen. Selisih V_{p-p} (tegangan *peak-to-peak*) antara hasil eksperimen dan simulasi relatif kecil, yaitu 3.28% dan 3.55%. Selisih waktu tempuh antara hasil eksperimen dan simulasi juga cukup kecil, yaitu 0.15% dan 0.17%.

Pada eksperimen, daerah pengukuran berada pada wilayah medan jauh dari transduser sehingga energi gelombang tidak lagi fluktuatif. Selisih tegangan V_{p-p} juga disebabkan oleh ketidak-akuratan parameter masukan t_G dan t_R yang digunakan untuk pemodelan fungsi sistem pada simulasi. Nilai t_G dan t_R yang dimasukkan dalam simulasi adalah coba-coba (*trial and error*) karena nilai tersebut hanya dapat diperoleh dengan pengukuran langsung komponen elektrikal pada sistem ultrasonik yang ditinjau. Selisih nilai waktu tempuh kemungkinan disebabkan oleh ketidak-cocokan nilai parameter kecepatan gelombang longitudinal dalam medium antara simulasi dan eksperimen.

Tabel 2. Perbandingan antara hasil simulasi dan eksperimen

No.	Selisih V_{p-p} Eksperimen & Simulasi		Selisih Waktu Tempuh Eksperimen & Simulasi	
	V (volt)	Persentase	t (μ s)	Persentase
1	0.0105	3.28%	0.11	0.15 %
2	0.0005	3.55%	0.02	0.17%

4 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi hasil uji coba yang telah dilakukan, perangkat lunak yang dibuat dapat digunakan untuk mensimulasikan medan gelombang ultrasonik dengan model multi-Gaussian dan model pengukuran Thompson-Gray untuk transduser tercelup berbentuk piston. Dari hasil analisis perbandingan antara eksperimen dan simulasi maka dapat dikatakan bahwa perangkat lunak ini dapat memprediksi tegangan keluaran dan waktu tempuh gelombang, dengan perbedaan tegangan keluaran sebesar 3.55% dan selisih waktu tempuh 0.17%. Simulasi sistem pengukuran ultrasonik yang telah dibuat dapat digunakan untuk mensimulasikan perambatan gelombang ultrasonik baik pada medium uji yang homogen maupun non-homogen dengan parameter transduser yang bervariasi.

5 Terima Kasih

Penelitian ini dilaksanakan dalam Program Insentif Riset Terapan (RT-2011 1381) yang didanai oleh Kementerian Riset dan Teknologi Republik Indonesia 2011.

6 Daftar Pustaka

- [1] C.J. Dang, L.W. Schmerr & A. Sedov. 2002. *Modeling and Measuring All the Elements of An Ultrasonic Nondestructive Evaluation System I. Modeling Foundation*. Resaearch in Nondestructive Evaluation 14, 141-176.
- [2] C.J. Dang, L.W. Schmerr & A. Sedov. 2002. *Modeling and Measuring All the Elements of An Ultrasonic Nondestructive Evaluation System II: Model based Measurements*. Resaearch in Nondestructive Evaluation 14, 177-201.
- [3] L.W. Schmerr and Sung-Jin Song. 2007. *Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems Models and Measurement*. Springer Science+Business Media.
- [4] Martin Spies. 2007. *Ultrasonic Field Modeling for Immersed Components using Gaussian Beam Superposition*. Ultrasonics 46(2), 138-147
- [5] R. Huang, L.W. Schmerr Jr & A. Sedov. 2008. *Modeling the Radiation of Ultrasonic Phased-Array Transducers with Gaussian Beams*. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control 55(12), 2692-2702.
- [6] R.B. Thompson & T.A. Gray. 1983. *A Model Relating Ultrasonic Scattering Measurements Through Liquid - Solid Interfaces to Unbounded Medium Scattering Amplitudes*. Journal of Acoustics Society Am. 74, 140-146.