

Pemodelan Ultrasonik dalam Dua Dimensi untuk Aplikasi Uji Tak Rusak

Imamul Muttakin *, Ceri Ahendyarti, Fadil Muhammad, Masjudin, Dina Estining Tyas Lufianawati, Nauval Franata, Muchtar Ali Setyo Yudono, Muhamad Otong, Alief Maulana, Agusutrisno

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon, Banten, Indonesia

Informasi Artikel

Naskah Diterima : 30 April 2025

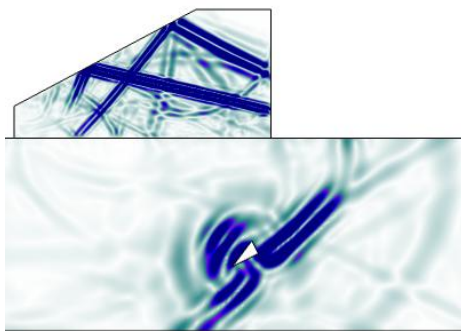
Direvisi : 4 Juni 2025

Disetujui : 29 Juni 2025

doi: 10.62870/setrum.v14i1.32319

*Korespondensi Penulis :
imamul@untirta.ac.id

Graphical abstract



Abstract

Ultrasonic nondestructive testing is widely used in determining the integrity and condition of a structure. Ultrasonic sensors are key technologies with their ability to detect internal defects without causing damage to the object. This article discusses ultrasonic modeling using the finite element method (FEM) method. Frequency domain studies have been carried out for electrostatic and mechanical (piezoelectric) problems, as well as acoustic (environmental space) with multiphysical coupling at the acoustic-structure boundary. In addition, time-dependent studies with elastic waves interfaces examine wave phenomena through transducers and objects over time. Stress, pressure, and velocity values can be obtained from integrative evaluations. Waves interact with the environment and objects, causing reflections and propagation. Reflections from waves imply defects in objects whose locations can be estimated from the time of reflection if the ultrasonic wave velocity in a particular object is known. Integration of sensor technology and data analysis through the FEM method can support increasing the effectiveness and reliability of ultrasonic inspection methods.

Keywords: Ultrasonic, FEM, 2D, NDT, COMSOL

Abstrak

Uji tak rusak berbasis ultrasonik digunakan secara luas dalam penentuan integritas dan kondisi dari suatu struktur. Sensor ultrasonik adalah teknologi kunci dengan kemampuannya untuk mendeteksi cacat internal tanpa menyebabkan kerusakan objek. Artikel ini membahas pemodelan ultrasonik dengan metode metode elemen hingga (*finite element method*, FEM). Telah dilakukan studi domain frekuensi untuk permasalahan elektrostatis dan mekanik (piezoelektrik), serta akustik (ruang lingkungan) dengan coupling multifisis pada batas akustik-struktur. Selain itu, studi *time dependent* dengan antarmuka *elastic waves* mengkaji fenomena gelombang melalui *transducer* dan objek terhadap waktu. Nilai tegangan, tekanan, dan kecepatan dapat diperoleh dari evaluasi integratif. Gelombang berinteraksi dengan lingkungan dan objek sehingga menimbulkan pemantulan serta penyebaran perambatan Pantulan dari gelombang menyiratkan adanya cacat di dalam objek yang lokasinya dapat diestimasi dari waktu kemunculan pantulan apabila kecepatan gelombang ultrasonik pada objek tertentu telah diketahui. Integrasi teknologi sensor dan analisis data melalui metode FEM dapat mendukung peningkatan efektivitas dan keandalan metode inspeksi ultrasonik.

Kata kunci: Ultrasonik, FEM, 2D, NDT, COMSOL

© 2025 Penerbit Jurusan Teknik Elektro UNTIRTA Press. All rights reserved.

1. PENDAHULUAN

Teknologi ultrasonik dimanfaatkan untuk berbagai macam peruntukan baik di bidang medis [1-3], maupun industri [4]. Ultrasonik memiliki keunggulan dalam hal sensitivitasnya yang tinggi dan penggunaannya yang bersifat non-invasif. Pengujian tak merusak (*non-destructive testing*, NDT) berbasis ultrasonik menjadi salah satu teknik yang digunakan secara luas untuk inspeksi material serta penentuan integritas dan kondisi dari suatu struktur [5]. Dalam perkembangannya, dibutuhkan peningkatan pada performa sensor, interpretasi data, dan integrasi operasi sistem.

Pengembangan sensor mengarah pada rekayasa material dan pengkombinasian tipe-tipe sensor (PZT, PVDF, dan sebagainya) [6-7]. Di sisi lain, penginterpretasian hasil didukung dengan penerapan metode data analitik terkini yang melibatkan pembelajaran mesin. Pada bagian integrasi operasi sistem, kajian komprehensif dari perilaku sensor, sinyal, dan kondisi uji dapat diestimasi melalui pemodelan. Pemodelan matematis dan/atau fisis memfasilitasi pemahaman yang rinci mengenai bagaimana gelombang ultrasonik terbentuk dan berinteraksi dengan material. Hal ini dapat mengoptimalkan teknik dan metode tersebut pada berbagai aplikasi

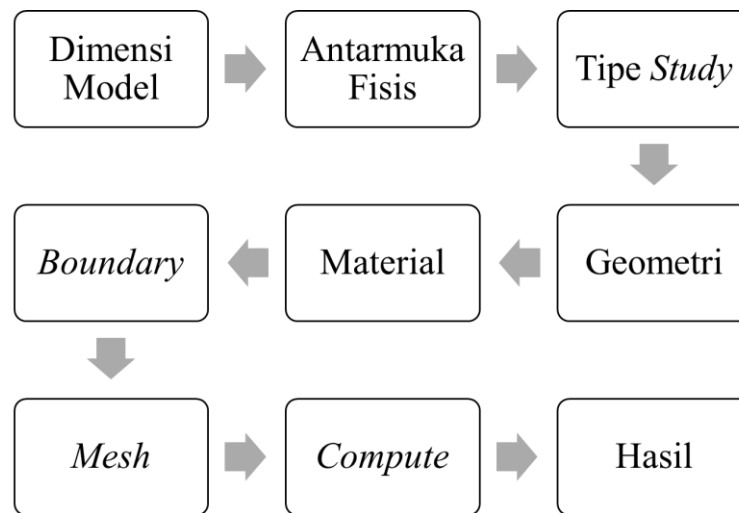
Sensor ultrasonik dapat dimodelkan menggunakan pendekatan elektro-akustik seperti dilaporkan pada [8-9] guna memprediksi karakter sinyal serta lebar pita (*bandwidth*) dari gelombang ultrasonik yang dibangkitkan dan/atau dideteksi. Metode elemen hingga (*finite element method*, FEM) muncul sebagai perangkat yang mumpuni untuk memodelkan fenomena ultrasonik yang kompleks [10]. FEM telah diterapkan pada berbagai aspek dalam pengujian ultrasonik seperti perambatan gelombang, teknologi *phased array*, serta deteksi *time of flight diffraction* (TOFD) [11]. Penelitian-penelitian sebelumnya telah mengembangkan model-model FEM untuk mensimulasikan perilaku gelombang ultrasonik pada material dan struktur yang berbeda. Hal ini memungkinkan analisis kemampuan deteksi cacat dan karakteristik sinyal.

Artikel ini membahas pemodelan ultrasonik dengan metode FEM. Domain permasalahan ditentukan dua-dimensi sederhana yang mencakup sensor dan objek kaji. Karakteristik gelombang akan ditampilkan dalam visualisasi grafik. Tahapan-tahapan simulasi dijabarkan secara rinci sebagai panduan dalam merancang sistem uji tak rusak berbasis ultrasonik.

2. METODE

Secara umum, tahapan penyelesaian menggunakan FEM diawali dengan mengdiskritkan *region* solusi menjadi *sub-region* atau elemen yang berjumlah tertentu. Kemudian, persamaan-persamaan pengaturannya diturunkan untuk suatu elemen yang spesifik. Selanjutnya, dilakukan penyusunan terhadap semua elemen pada *region* solusi. Sistem persamaan yang diperoleh lalu diselesaikan [12].

Pembuatan model pada COMSOL diawali dengan penentuan dimensi ruang. Selanjutnya, antarmuka fisis dipilih sesuai dengan problem yang dikaji. Geometri dapat dibangun baik dengan cara *import* dari desain CAD (*Computer Aided Design*) maupun dengan cara menyusun menggunakan bentuk-bentuk standar yang tersedia. Bagian-bagian dari geometri yang terbentuk kemudian diberikan alokasi material. Lalu syarat-syarat batas (*boundary*) diaplikasikan kepada setiap bagian geometri yang terlibat dalam kondisi permasalahan. *Mesh* dibangun dengan pengaturan jenis serta ukuran yang cocok untuk permasalahan yang akan dihitung. Setelah itu, proses komputasi dapat dieksekusi. Hasil dari komputasi akan muncul diantaranya berupa data, nilai turunan, dan plot-plot grafik. Gambar 1 menunjukkan tahapan umum dalam simulasi COMSOL.

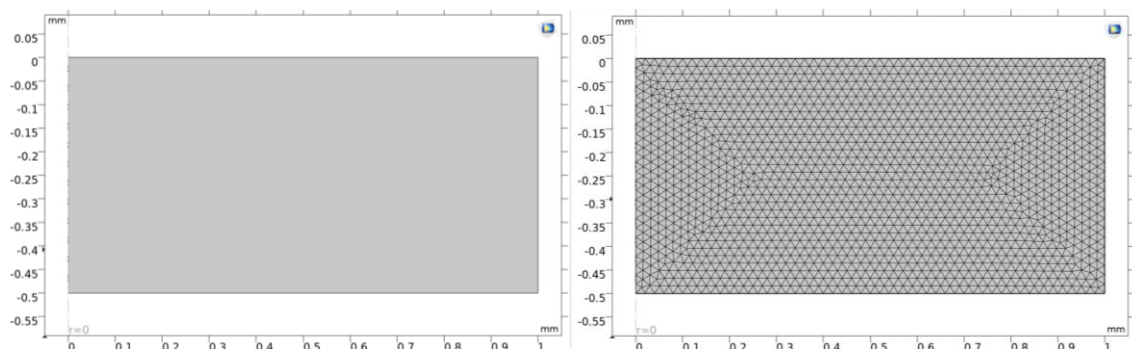


Gambar 1. Diagram Alir Proses Pemodelan pada COMSOL

Pemodelan sederhana dilakukan untuk suatu phased array microphone. Model terdiri dari domain piezoelektrik serta domain akustik. Domain piezoelektrik dikendalikan oleh sebuah *ground* di bagian bawah permukaan dan sinyal 100 V di permukaan atas. Domain dibatasi secara mekanik oleh sebuah *boundary roller* di sisi bawah serta *axial symmetry* pada sisi samping. Versi perangkat lunak yang digunakan adalah COMSOL Multiphysics 5.6.0.401.

Proses diawali dengan pemilihan model pada menu *Model Wizard*. Pada kasus tertentu, situasi *real* tiga-dimensi dapat disimulasikan menggunakan simetri apabila dalam permasalahan kebergantungan pada komponen *theta* telah diketahui sehingga 2D Axisymmetric bisa digunakan sebagai *space* domain. Sebagai contoh, permasalahan silinder dalam tiga dimensi dapat dimodelkan menjadi penampang persegi dalam simetri. Tipe antarmuka fisis adalah interaksi antara elektromagnetik dengan struktur dengan pengesetan *coupling* yang sesuai berupa fenomena piezoelektrik. Selanjutnya, study ditambahkan berupa *frequency domain* untuk mengkaji permasalahan dengan variabel frekuensi.

Bagian sensor dibangun dengan geometri dasar berupa persegi. Ukuran sisi-sisi dapat diset menyesuaikan kondisi aktual dari objek. Kemudian, tiap bagian geometri yang dikonstruksi harus diberikan jenis materialnya. Pada COMSOL, terdapat tipe-tipe material yang sudah built-in dengan nilai-nilai karakteristik sesuai dengan jenis fisis yang telah dideklarasikan sebelumnya. Untuk piezoelektrik, digunakan material PZT-5H. Selain itu, syarat-syarat batas (*boundary*) juga perlu ditetapkan untuk bagian-bagian dari geometri yang terlibat dalam komputasi. Syarat batas ini tergantung pada tipe fisis yang dikaji. Pada piezoelektrik yang akan dikendalikan oleh sinyal listrik, *boundary ground* serta *electric potential* diberikan masing-masing pada permukaan bawah dan permukaan atas. Untuk *study frequency domain*, nilai *ground* dan *electric potential* ini akan bergantian diterapkan antara kedua permukaan dengan siklus sesuai nilai frekuensi yang ditentukan. Interaksi mekanik juga perlu ditentukan syarat batasnya. Dalam hal ini, *boundary roller* ditetapkan di sisi bawah.



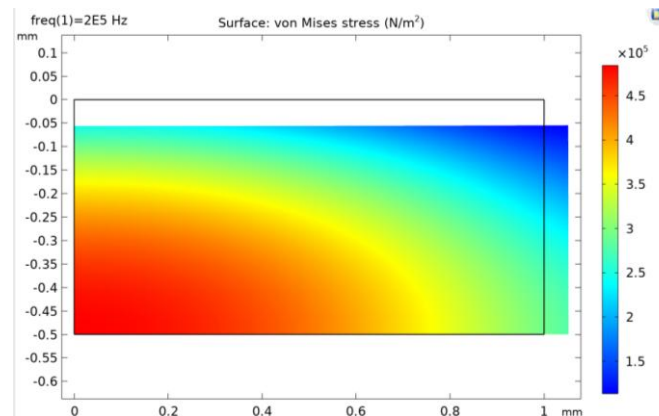
Gambar 2. Geometri Piezoelektrik (kiri) dan Hasil Mesh (kanan)

Gambar 2 bagian kiri menunjukkan geometri piezoelektrik yang dikonstruksikan. Selanjutnya elemen-elemen hingga disusun dengan membangun *mesh*. Simulasi ini menerapkan mesh dasar berupa *free triangular*. Ukuran *mesh* perlu ditentukan dengan mempertimbangkan fenomena fisis yang terjadi pada domain. Dalam perambatan gelombang, tiap satuan panjang gelombang membutuhkan sepuluh titik komputasi yang dikaji. Dengan demikian, ukuran maksimal elemen dapat diset berdasarkan (1),

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

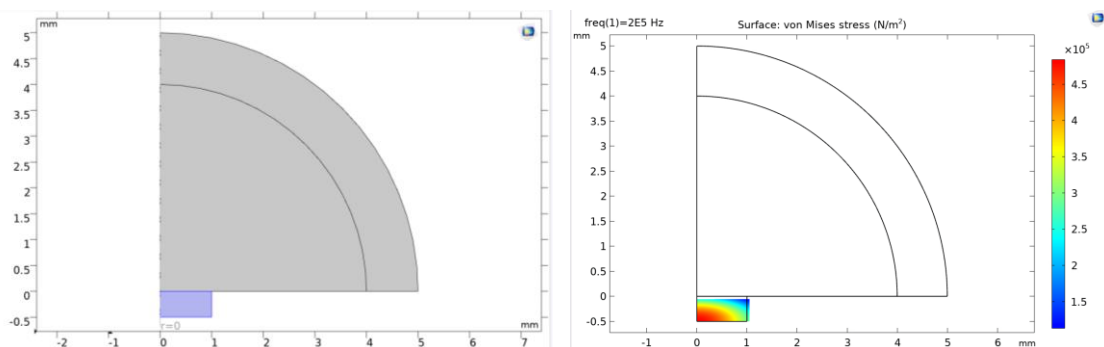
dimana f adalah frekuensi, λ adalah panjang gelombang, c adalah kecepatan rambat suara pada medium. Gambar 2 bagian kanan mengilustrasikan hasil *mesh* yang dibangun.

Tahap terakhir dari pemodelan adalah komputasi. Eksekusi dilakukan dari *study* yang sudah diset, yaitu *frequency domain*, dengan menentukan bilangan frekuensi yang dioperasikan. Proses *compute* akan menghasilkan nilai perhitungan FEM yang datanya dapat dievaluasi dan/atau ditampilkan dalam bentuk grafik. Gambar 3 menunjukkan plot permukaan dari nilai tegangan (von Mises stress) pada elemen piezoelektrik. Plot tersebut merupakan representasi dari nilai perhitungan FEM dimana potensial listrik sebesar 100 V diterapkan pada salah satu permukaan (atas atau bawah) piezoelektrik secara bergantian dengan siklus (frekuensi) 200000 Hz.



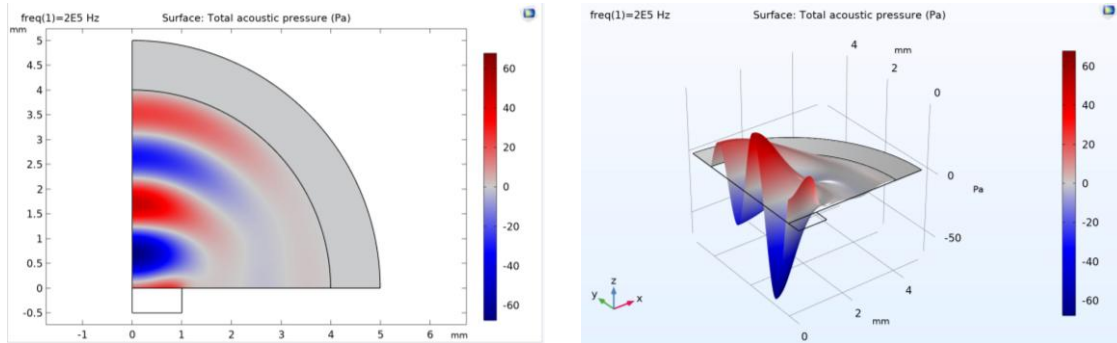
Gambar 3. Plot Permukaan Nilai Tegangan Elemen Piezoelektrik

Simulasi di atas adalah hanya untuk domain piezoelektrik. Untuk melengkapi kondisi dengan pelibatan lingkungan uji, perlu dilakukan penambahan domain akustik dimana gelombang ultrasonik akan dikaji. Asumsikan bahwa ruang lingkungan berupa bola sehingga dalam simetri aksial dapat direpresentasikan sebagai seperempat lingkaran. Pada aktualnya, gelombang suara akan merambat hingga ruang tak hingga selama terdapat medium perambatan. Pemodelan kondisi perambatan tersebut adalah dengan cara menambahkan lapisan *perfectly matched layer* (PML) pada sisi luar lingkaran. Material udara juga ditentukan untuk ruang lingkungan. Gambar 4 (kiri) menunjukkan geometri total yang terdiri dari domain piezoelektrik dan domain akustik.



Gambar 4. Domain Piezoelektrik (kiri, biru), Domain Akustik (kiri, abu-abu), dan Plot Nilai pada Domain Piezoelektrik (kanan)

Domain akustik tersebut perlu diberikan antarmuka fisis yang sesuai. Pada COMSOL, antarmuka *pressure acoustics* dapat ditambahkan khusus untuk bagian akustik (ruang lingkungan) dengan mengeliminasi bagian piezoelektrik pada pemilihan domain. Sebaliknya, antarmuka fisis elektrostatik dan solid mechanics dialokasikan pada bagian piezoelektrik dengan mengeliminasi bagian ruang lingkungan. Dengan demikian, komputasi akan dikaji hanya pada elemen yang bersesuaian dengan fisis yang terjadi. Pengesetan terakhir adalah untuk coupling multifisis dimana terjadi kombinasi antara akustik dan struktur pada persambungan antara sisi atas elemen piezoelektrik dengan sisi bawah ruang lingkungan. Hal ini dilakukan oleh *acoustic-structure boundary*.

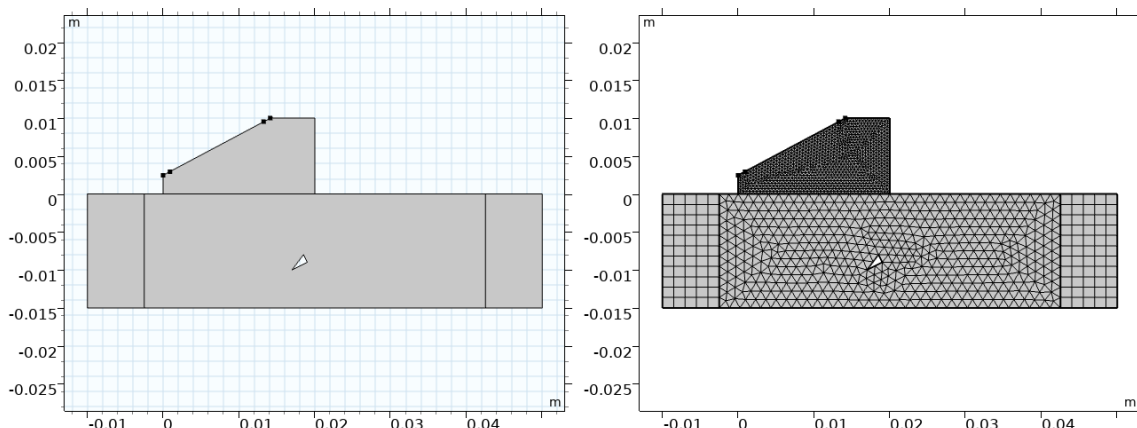


Gambar 5. Plot Permukaan Total Tekanan Akustik pada Ruang Lingkungan (kiri) dan Visualisasi Vertikalnya (kanan)

Studi yang dilakukan adalah sama yaitu pada *frequency domain*. Setelah *compute* dieksekusi, nilai tekanan akustik pada ruang lingkungan diperoleh yang digambarkan pada plot kiri Gambar 5. Guna menunjukkan secara lebih intuitif, data yang dihasilkan pada menu Results dapat diolah menjadi plot permukaan dengan ekspresi ketinggian (Gambar 5 kanan).

3. HASIL

Proses pemodelan pada Bagian Metode dapat diterapkan ke permasalahan yang lebih kompleks dimana elemen piezoelektrik dikonstruksi menyerupai struktur *probe* ultrasonik industri dan ruang lingkungan berupa material yang memiliki cacat internal. Model dibangun seperti pada Gambar 6 kiri serta hasil *mesh*-nya ditunjukkan pada Gambar 6 sebelah kanan.



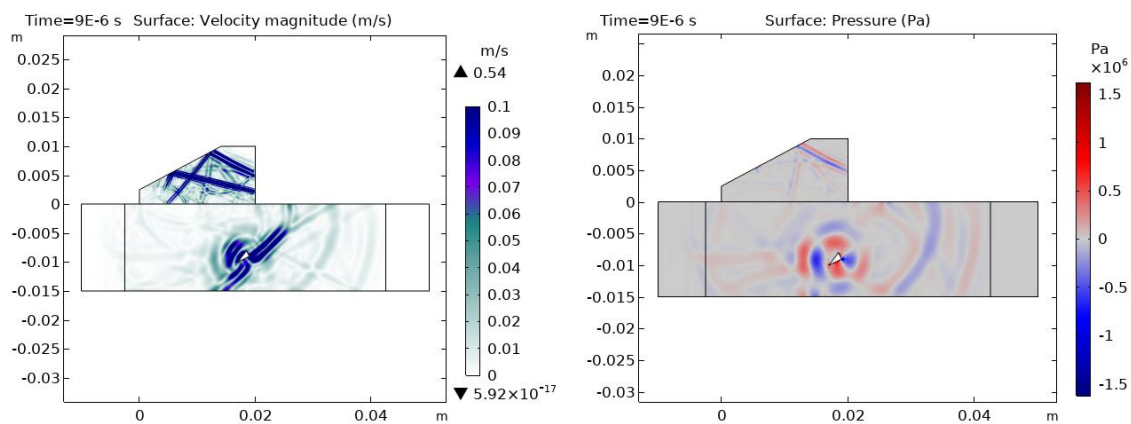
Gambar 6. Model Probe Ultrasonik dan Material dengan Cacat (kiri) dengan Hasil Mesh (kanan)

Tabel 1 menjabarkan detail geometri dari model. Sudut posisi *transducer* disimbolkan sebagai α , W adalah lebar *wedge*, H merupakan tinggi *wedge*, L ialah panjang sisi lateral *wedge*, D yaitu diameter *transducer*, W_{ts} lebar sampel uji, dan H_{ts} merepresentasikan tinggi sampel uji.

Tabel 1. Detail Geometri Model

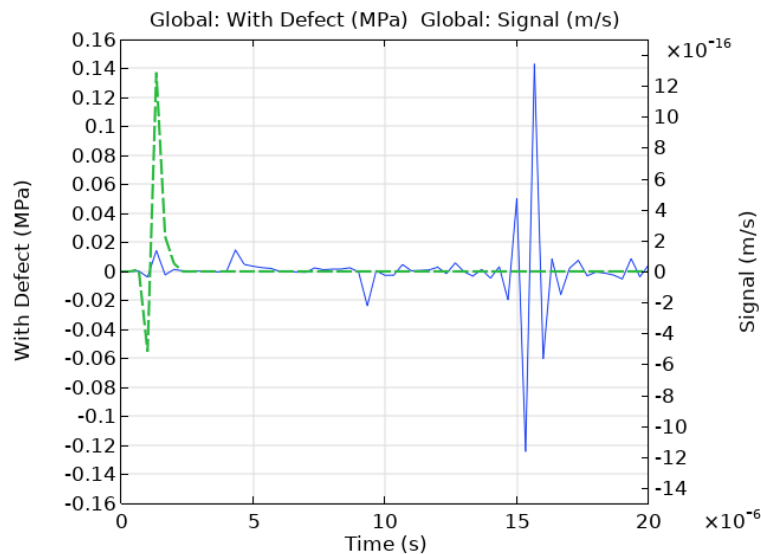
Geometri	Nilai
α	28 °
W	20 mm
H	10 mm
L	16 mm
D	14 mm
W_{ts}	60 mm
H_{ts}	15 mm

Dalam rangka mengkaji interaksi sinyal dengan kondisi material, dilakukan studi *time dependent*. Antarmuka *elastic waves* digunakan untuk komputasi yang menghasilkan nilai kecepatan gelombang dan tekanan pada setiap waktu. Frekuensi sinyal adalah 1,5 MHz, *pressure wave speed* pada plastik (material *backing transducer*) 2080 m/s, *shear wave speed* plastik 1000 m/s, *pressure wave speed* pada aluminum (material objek) 6200 m/s, dan *shear wave speed* aluminum adalah 3120 m/s.



Gambar 7. Plot Permukaan Nilai Kecepatan (kiri) dan Tekanan (kanan)

Pada waktu 9 μ s, gelombang berinteraksi dengan cacat di dalam objek sehingga menimbulkan pemantulan serta penyebaran perambatan. Demikian pula halnya dengan tekanan yang terdistribusi di sekitar cacat.



Gambar 8. Plot Sinyal Kecepatan Gelombang (hijau garis putus-putus) dan Tekanan Akibat Cacat (biru garis solid)

Evaluasi integratif pada permukaan *transducer* dapat menghasilkan nilai kecepatan gelombang serta tekanan pada *transducer*-objek. Gambar 8 (hijau) adalah sinyal kendali yang dibangkitkan berupa pulsa; sedangkan plot dengan warna biru adalah tekanan yang terjadi pada saat tertentu. Terlihat bahwa terdapat pantulan dini dari gelombang yang menyiratkan adanya cacat di dalam objek. Lokasi cacat dapat diestimasi dari waktu kemunculan pantulan apabila kecepatan gelombang ultrasonik pada objek tertentu telah diketahui.

4. KESIMPULAN

Ultrasonik NDT adalah suatu pendekatan yang mumpuni untuk menganalisis perilaku material dan mendeteksi cacat. FEM dapat digunakan untuk menginterpretasikan sensor data, mensimulasikan respon struktur, dan meningkatkan akurasi inspeksi. Artikel ini telah merinci tahapan pemodelan multifisis piezoelektrik, material uji, serta ruang lingkungan untuk mendapatkan nilai interaksi antara gelombang dengan bahan. Studi domain frekuensi menghasilkan distribusi tegangan pada elemen piezoelektrik (dengan fisis elektrostatis dan mekanik) serta nilai tekanan akustik pada ruang lingkungan (dengan fisis akustik). Studi *time dependent* dilakukan untuk menganalisis tekanan serta kecepatan gelombang pada satuan waktu. Dengan mengkaji sinyal kecepatan dan tekanan, keberadaan pantulan pada waktu tertentu menunjukkan keberadaan cacat pada bagian internal dari objek.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengakui penggunaan Consensus [<https://consensus.app/>] untuk membantu pengkajian latar belakang dalam penyusunan artikel ini.

REFERENSI

- [1] I. Muttakin et al., "Low cost design of precision medical ultrasound power measurement system." *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, vol. 5, no. 6, pp. 672-682, 2011.
- [2] J. Kasim, I. Muttakin, M. Harun, C. Omar, E. Supriyanto and R. Ismail, "The Feasibility of Using High Amplitude Pulsed Ultrasound for Combined Hard Tissue and Soft Tissues Imaging," In *Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Biomedical Electronics and Biomedical Informatics*, 2012, pp. 42-47.
- [3] I. Muttakin and E. Supriyanto, "Medical ultrasound power measurement system using PVDF sensor and FPGA technology," *2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Minneapolis, MN, USA, 2013, pp. 1761-1766, doi: 10.1109/I2MTC.2013.6555717.
- [4] I. Muttakin and E. Prianto, "Sistem Kendali dan Antarmuka pada Pembangkit Pulsa Terprogram untuk Transduser Ultrasonik," *Setrum: Sistem Kendali-Tenaga-elektronika-telekomunikasi-komputer*, vol. 4, no. 1, pp. 1-5, Mar. 2016, doi: 10.36055/setrum.v4i1.458.
- [5] Sahar Hassani and Ulrike Dackermann. "A Systematic Review of Advanced Sensor Technologies for Non-Destructive Testing and Structural Health Monitoring." *Sensors* (Basel, Switzerland), 23 (2023). <https://doi.org/10.3390/s23042204>.
- [6] E. Supriyanto, I. Muttakin, M. H. M. Fathil and C. Omar, "Low cost PVDF sensor casing for ultrasound power measurement," In *Proceedings of the 5th WSEAS international conference on Circuits, systems and signals*, 2011, pp. 144-147.
- [7] N. S. Risman et al., "PVDF sensor design and FPGA implementation of ultrasound power measurement," *2014 IEEE Conference on Biomedical Engineering and Sciences (IECBES)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2014, pp. 657-661, doi: 10.1109/IECBES.2014.7047586.
- [8] I. Muttakin, S. M. Nooh and E. Supriyanto, "Spice modeling of hybrid multi-frequency ultrasound transducer." In *Proceedings of the 10th WSEAS international conference on System science and simulation in engineering*, 2011, pp. 106-111.
- [9] I. Muttakin, N. M. Arif, S. M. Nooh and E. Supriyanto, "Analog SPICE implementation of multi-frequency ultrasound system," *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, vol. 6, no. 1, pp. 113-121, 2012.

- [10] M. Semenova, H. Wirdelius, and G. Persson, "Comparison between three mathematical models of three well defined ultrasonic NDT cases," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 747, no. 1, p. 012061, Jan. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/747/1/012061.
- [11] H. Chen, D. Fan, J. Huang, W. Huang, G. Zhang, and L. Huang, "Finite Element Analysis Model on Ultrasonic Phased Array Technique for Material Defect Time of Flight Diffraction Detection," *sci adv mater*, vol. 12, no. 5, pp. 665–675, May 2020, doi: 10.1166/sam.2020.3689.
- [12] I. Muttakin et al., "Pemodelan Arus Eddy pada Domain Dua Dimensi untuk Evaluasi Objek Logam Non-Magnetik," *Setrum : Sistem Kendali-Tenaga-elektronika-telekomunikasi-komputer*, vol. 13, no. 2, pp. 157–166, Dec. 2024, doi: 10.62870/setrum.v13i2.29845.