

# Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT) sebagai Transduser Ultrasonik untuk *Nondestructive Testing* (NDT): Ulasan Artikel

Nurmalia

<sup>1</sup>School of Applied STEM, Universitas Prasetiya Mulya

*nurmalia.nurmalia@prasetiyamulya.ac.id*

## Abstrak

*Nondestructive testing* (NDT) digunakan untuk mendeteksi keberadaan cacat pada suatu objek tanpa merusak objek tersebut, sehingga ideal untuk digunakan pada komponen-komponen infrastruktur yang sudah terpasang dan beroperasi. Diantara berbagai teknik, NDT ultrasonik memiliki kemampuan untuk menginspeksi cacat di sepanjang ketebalan objek, tidak hanya cacat permukaan. Metode pembangkitan gelombang ultrasonik yang paling populer adalah menggunakan *piezoelectric transducer* (PZT). Transduser ini memiliki efisiensi yang tinggi tetapi merupakan transduser kontak dan memerlukan pelumas (*couplant*), yang sering menyebabkan keterbatasan fleksibilitas untuk aplikasinya. *Electromagnetic acoustic transducer* (EMAT) adalah transduser ultrasonik yang dapat membangkitkan gelombang ultrasonik pada objek konduktif secara non-kontak. Transduser ini membangkitkan gelombang ultrasonik langsung pada objek uji, sehingga tidak memerlukan *couplant*. Hal ini menyebabkan EMAT ideal untuk inspeksi pada temperatur tinggi dimana *couplant* akan meleleh, dan pengujian yang bergerak. Dua jenis EMAT dibahas pada ulasan artikel ini: untuk membangkitkan gelombang *shear horizontal* (SH) dan gelombang torsional. Kedua jenis gelombang ini memiliki kelebihan dibanding moda gelombang lainnya, tetapi sulit untuk dibangkitkan menggunakan PZT. Kedua moda gelombang ini kemudian digunakan untuk menginspeksi penipisan pada pelat dan dinding pipa, yang dapat disebabkan oleh korosi maupun kontak mekanik. Hasil penelitian menunjukkan potensi EMAT dengan metoda konversi moda untuk inspeksi kuantitatif penipisan pada pelat dan pipa.

**Kata Kunci:** EMAT, uji tak merusak, *nondestructive testing* (NDT), *shear horizontal*, torsional, penipisan

## 1 Pendahuluan

Uji tak merusak atau *nondestructive testing* (NDT) merupakan bidang ilmu rekayasa terapan lintas disiplin yang bertujuan untuk mengetahui keberadaan cacat pada suatu objek dan mengkuantifikasinya. Bidang ini diperlukan pada banyak jenis industri dan perannya semakin penting seiring dengan menuanya infrastruktur seperti bangunan, jembatan, jaringan pipa, dan sejenisnya. Sebagai contoh, jaringan pipa (*pipeline*) merupakan pilihan ekonomis untuk transportasi bahan cairan dan gas dalam kuantitas besar [1]. Pada jaringan ini harus dipastikan bahwa pipa-pipa yang terpasang memiliki integritas yang baik sehingga memperkecil resiko terjadinya masalah seperti pecahnya pipa. Hal ini menjadi sangat krusial ketika material yang dibawa oleh jaringan pipa tersebut merupakan bahan yang mudah terbakar serta dalam tekanan tinggi, seperti minyak dan gas. Sebelum digunakan, pipa tersebut sudah melalui proses inspeksi oleh pabrik pembuatnya. Setelah pipa terpasang dalam jaringan dan beroperasi, pengujian secara rutin dilakukan menggunakan teknik NDT.

Terdapat berbagai teknik NDT, mulai dari yang paling sederhana yaitu *visual testing* baik dengan menggunakan alat (kaca pembesar, mikroskop, kamera, dll) maupun hanya menggunakan mata telanjang. Perkembangan terbaru *visual testing* memanfaatkan

teknik-teknik pemrosesan gambar, bahkan neural network [2]. Tentunya teknik ini terbatas hanya untuk mengetahui kerusakan yang berada di permukaan objek uji. Teknik selanjutnya adalah *penetrant testing*, dimana sejenis cat tertentu diaplikasikan pada permukaan objek yang ingin diuji kemudian digunakan *developer* yang akan menghapus cat tersebut. Jika terdapat retakan pada permukaan objek, retakan tersebut akan terisi oleh cat sehingga menjadi dapat terlihat. Dengan demikian, teknik ini pun hanya dapat digunakan untuk mendeteksi keberadaan retakan pada permukaan objek. Otomatisasi teknik *penetrant testing* dilakukan pada banyak industri dengan memanfaatkan perkembangan metode *deep learning* untuk meningkatkan keandalannya [3]. Teknik NDT yang dinamakan *magnetic flux leakage* (MFL) dapat mendeteksi keberadaan cacat pada permukaan dan sekitar permukaan objek terbuat dari logam. Teknik ini memanfaatkan kebocoran medan magnet jika terdapat *material loss* yang dapat terjadi diantaranya karena korosi. Piao, et. al., melakukan studi mengenai rekonstruksi profil cacat secara cepat menggunakan sinyal-sinyal yang diperoleh dari pengukuran teknik MFL ini [4]. Teknik lain yang dapat mendeteksi cacat pada permukaan dan area sekitar permukaan objek logam adalah *eddy current testing*. Pada teknik ini, arus eddy dibangkitkan pada permukaan objek dengan mendekatkannya pada sebuah kumparan beraliran listrik. Arus eddy ini kemudian akan menghasilkan medan magnet dinamis yang kemudian dideteksi oleh kumparan yang lain. Jika terdapat cacat pada permukaan atau dekat permukaan objek, maka medan magnet tersebut akan terganggu. Studi terbaru memanfaatkan teknik pemrograman *multi-gene genetic algorithm* untuk menggabungkan komponen frekuensi hasil pengukuran arus eddy yang dengan tujuan meningkatkan efisiensi [5].

Teknik-teknik tersebut diatas terbatas penggunaannya untuk mendeteksi keberadaan cacat/retakan/korosi pada area sekitar permukaan objek. Akan tetapi, cacat seringkali berada dibagian dalam sepanjang ketebalan objek, sehingga diperlukan teknik lain yang dapat mendeteksi jenis cacat seperti itu. NDT menggunakan teknik radiografi adalah salah satu pilihannya. Prinsipnya sama dengan pemeriksaan x-ray pada tubuh manusia, dimana jika terdapat perbedaan densitas material karena adanya cacat, akan terlihat sebagai warna yang berbeda pada foto yang dihasilkan. Perkembangan terbaru teknik ini juga memanfaatkan *deep neural network* untuk mengekstraksi informasi dari foto radiografi [6]. Meskipun teknik ini ampuh untuk mengetahui keberadaan cacat sepanjang ketebalan dinding pipa, teknik ini tidak dapat dengan mudah dilakukan. Hal ini karena peralatan yang diperlukan terbilang mahal dan hanya personil yang sudah memiliki sertifikat yang boleh melakukannya, karena sifat dari gelombang elektromagnetik yang digunakan bisa membahayakan manusia.

Teknik NDT menggunakan ultrasonik dapat mendeteksi keberadaan cacat internal pada objek tetapi relatif tidak berbahaya. Gelombang ultrasonik adalah gelombang suara (yaitu gelombang mekanik) yang memiliki frekuensi di atas ambang batas pendengaran manusia yaitu 20 kHz. Karena sifatnya tidak berbahaya, gelombang ini juga biasa digunakan juga untuk kepentingan medis, misalnya pada USG untuk mengecek kondisi janin. NDT dengan ultrasonik dapat digunakan untuk mendeteksi dan mengevaluasi cacat pada objek, mengukur dimensi objek, mengkarakterisasi material, dan sebagainya. Gelombang ultrasonik untuk kepentingan NDT biasanya berada pada rentang frekuensi 0.5 - 15 MHz. Semakin tinggi frekuensi yang digunakan, semakin kecil panjang gelombang sehingga semakin kecil ukuran cacat yang dapat dideteksi dan semakin presisi. Tetapi, semakin tinggi frekuensi maka semakin besar atenuasi yang terjadi, sehingga jarak tempuh gelombang semakin pendek dan sinyal semakin terdistorsi. Aturan dasar yang biasa digunakan adalah ukuran cacat yang dapat dideteksi lebih besar dari setengah panjang gelombang ultrasonik yang digunakan.

## 2 Transduser Ultrasonik

Langkah pertama dalam menggunakan gelombang ultrasonik untuk NDT adalah membangkitkan gelombang tersebut. Komponen yang biasa digunakan disebut transduser, yaitu *device* yang dapat mengkonversi satu bentuk energi menjadi bentuk energi lain. Ada beberapa metoda yang bisa digunakan untuk membangkitkan gelombang ultrasonik. Mayoritas dari aplikasi ultrasonik menggunakan transduser berbasis prinsip piezoelektrik dan kebalikannya (*piezoelectric transducer*, PZT) [7 – 10]. Pada bahan yang bersifat piezoelektrik, jika diberi tekanan atau tarikan (mekanik) maka akan timbul arus listrik; dan sebaliknya, jika arus listrik dialirkan pada bahan yang bersifat piezoelektrik maka bahan tersebut akan mengalami pemampatan dan peregangan (bergerak) pada frekuensi yang sama dengan frekuensi arus listrik yang diberikan. Selanjutnya bahan ini akan ditempelkan pada objek yang ingin diperiksa, sehingga getaran tadi akan merambat pada objek sebagai gelombang ultrasonik. Supaya getaran dapat ditransmisikan dari bahan piezoelektrik ke objek dengan optimal, maka diperlukan material sejenis pelumas/gemuk di antara bahan transduser dan objek yang disebut *couplant*. Keperluan akan pelumas ini menjadi limitasi aplikasi PZT untuk NDT; sifat pelumas sangat bergantung pada temperatur lingkungan dan untuk aplikasi pengujian yang bergerak, misalnya *scanning*, teknisnya menjadi tidak sederhana. Karena memerlukan kontak erat dengan objek, PZT ini termasuk dalam kategori transduser kontak. Bahan alami bersifat piezoelektrik yang populer untuk NDT adalah kristal kuarsa, tetapi saat ini banyak PZT yang berbasis keramik, bahkan polimer dan komposit. Riset-riset terus dilakukan untuk menemukan dan mengembangkan bahan-bahan bersifat piezoelektrik untuk keperluan NDT [11 – 13].

Gelombang ultrasonik dapat juga dibangkitkan menggunakan laser [14, 15]. Ketika pulsa laser berkekuatan tinggi ditembakkan pada permukaan sebuah objek, maka akan terjadi ekspansi panas lokal pada titik tembak tersebut. Ekspansi panas ini akan memicu timbulnya getaran berfrekuensi tinggi, yaitu ultrasonik. Laser ultrasonik memiliki frekuensi yang sangat tinggi dalam orde giga hertz, dan sifatnya non-kontak, tetapi harga peralatannya sangat mahal serta penggunaan laser berdaya tinggi cukup berbahaya. Transduser ultrasonik berbasis sifat *magnetostrictive* ditemukan baru-baru ini [16, 17]. Sifat *magnetostriction* adalah berubahnya dimensi bahan ketika terjadi proses magnetisasi. Nikel adalah bahan yang bersifat *magnetostrictive*. Dalam aplikasi *magnetostrictive* NDT pada pipa, misalnya, nikel ditempelkan menggunakan lem pada pipa yang ingin diuji, lalu diberi magnetisasi menggunakan magnet permanen. Kemudian kumparan dililitkan disekitar pipa dan dialiri arus listrik sehingga timbul medan magnet dinamis. Interaksi antara medan magnet statis dan dinamis akan menghasilkan gaya resultan yang kemudian memicu perubahan dimensi nikel sehingga nikel bergetar pada frekuensi yang sama dengan arus listrik. Karena nikel menempel erat pada pipa, getaran tersebut ditransmisikan dan mengalir pada pipa sebagai gelombang ultrasonik. Dengan demikian transduser ini masih memerlukan kontak erat dengan objek inspeksi, sehingga termasuk dalam kategori transduser kontak dengan segala keterbatasannya.

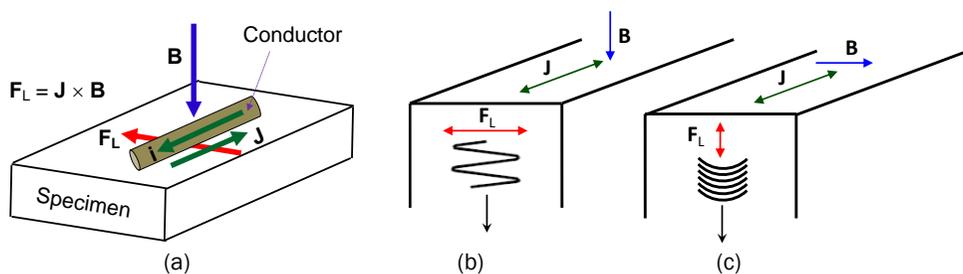
Berdasarkan uraian diatas, diperlukan sebuah transduser ultrasonik yang bersifat non-kontak tetapi tidak berbahaya dan bisa digunakan oleh siapa saja dengan biaya yang tidak semahal pembangkitan menggunakan laser. Electromagnetic acoustic transducer (EMAT) hadir sebagai pilihan transduser ultrasonik yang memiliki sifat-sifat tersebut dan dapat digunakan untuk membangkitkan gelombang ultrasonik pada material konduktif.

### 3. Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT)

#### 3.1 Prinsip Kerja EMAT

EMAT bekerja berdasarkan pembangkitan gelombang ultrasonik oleh gelombang elektromagnetik. Sangat sulit untuk menelusuri sejarah siapa yang pertama kali menemukan fenomena tersebut dan yang memanfaatkannya untuk pengukuran. Hirao dan Ogi dalam bukunya memaparkan perjalanan sejarah EMAT dengan cukup komprehensif [18]. Meskipun secara prinsip fenomena tersebut sudah diketahui sejak beberapa dekade yang lalu, tetapi pemanfaatannya mulai mengambil momentum seiring dengan perkembangan pesat dalam bidang elektronika dan pemrosesan sinyal. Prinsip kerja EMAT berbeda sama sekali dengan PZT. EMAT adalah transduser non-kontak dimana gelombang ultrasonik dibangkitkan langsung pada objek yang akan diuji, sehingga mengeliminasi keperluan akan *couplant*. Hal ini memberikan kebebasan lebih pada aplikasinya, misalkan untuk pengujian pada temperatur tinggi (dimana *couplant* akan meleleh dan berubah sifat) dan pengujian yang memerlukan pergerakan seperti pada *scanning inspection*.

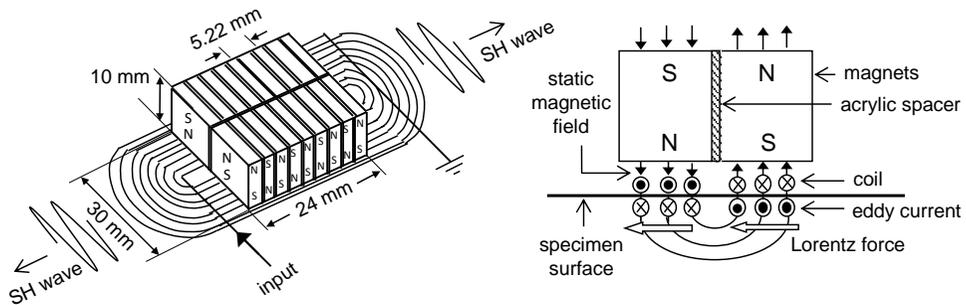
Gambar 1 menunjukkan prinsip dasar cara kerja EMAT. Sebuah kawat yang mengalirkan arus  $i$  diletakkan di atas permukaan objek konduktif yang akan diperiksa sehingga arus eddy,  $J$ , akan dibangkitkan pada permukaan objek tersebut. Jika kemudian medan magnet statis diberikan oleh magnet permanen yang berada di dekatnya, maka interaksi antara densitas arus eddy,  $J$ , dan medan magnet,  $B$ , akan menghasilkan gaya Lorentz,  $F_L$ , sesuai dengan persamaan yang tertera. Gaya Lorentz inilah yang bertanggung jawab atas timbulnya gelombang mekanis berfrekuensi tinggi, yaitu gelombang ultrasonik, pada frekuensi yang sama dengan arus listrik pada kawat. Selain gaya Lorentz, pada logam yang bersifat ferromagnetik, pembangkitan gelombang ultrasonik juga disebabkan oleh gaya magnetostriksi [19, 20]. Gelombang yang dihasilkan ditimbulkan langsung pada objek yang akan diinspeksi dan tidak memerlukan kontak erat antara EMAT dengan objek sehingga tidak memerlukan *couplant*. Disamping itu, EMAT juga dapat membangkitkan moda gelombang ultrasonik yang biasanya sulit untuk dibangkitkan dengan PZT, misalnya gelombang shear horizontal (SH) pada pelat dan gelombang torsional pada pipa. Pada EMAT, berbagai moda gelombang dapat dengan mudah dibangkitkan hanya dengan mengatur arah relatif dari medan-medan magnet yang terlibat, seperti diilustrasikan pada gambar 1(b) dan (c).



**Gambar 1. Prinsip dasar cara kerja EMAT (a) arah relatif medan-medan magnet yang terlibat menentukan jenis gelombang yang dibangkitkan (b) pembangkitan gelombang shear horizontal (c) pembangkitan gelombang longitudinal**

Salah satu konfigurasi EMAT yang populer menggunakan kumparan datar yang terhubung dengan sumber AC sebagai pembangkit arus eddy dan serangkaian magnet

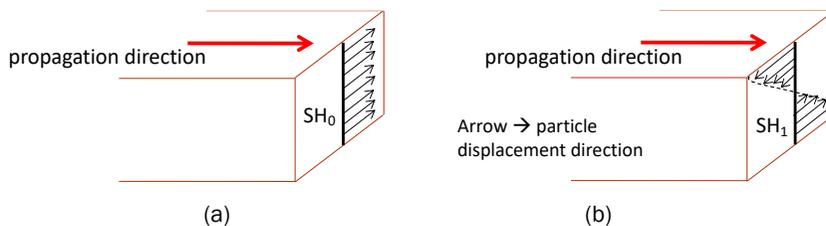
permanen yang disebut *periodic-permanent magnet* (PPM) [21, 22]. Magnet-magnet pada PPM tersusun sedemikian rupa sehingga interaksi antara medan magnet dengan arus eddy menyebabkan gaya Lorentz yang arahnya bergantian dengan perioda yang sama dengan perioda susunan magnet. Periode susunan magnet ini menentukan panjang gelombang yang dibangkitkan. Gambar 2 menunjukkan konfigurasi dari PPM-EMAT untuk membangkitkan gelombang SH yang dikembangkan oleh Nurmalia, et. at., dan gambar skematik mekanisme gaya Lorentz [23]. Pada EMAT ini, panjang gelombang SH yang dibangkitkan bernilai 5.22 mm, seperti ditunjukkan sebagai periode susunan magnet. Kumparan bersifat fleksible sehingga dapat dibentuk mengikuti permukaan objek yang ingin diperiksa.



Gambar 2 Diagram skema dari SH EMAT dan mekanisme gaya Lorentz [23]

### 3.2 Aplikasi Shear Horizontal EMAT untuk Inspeksi Penipisan

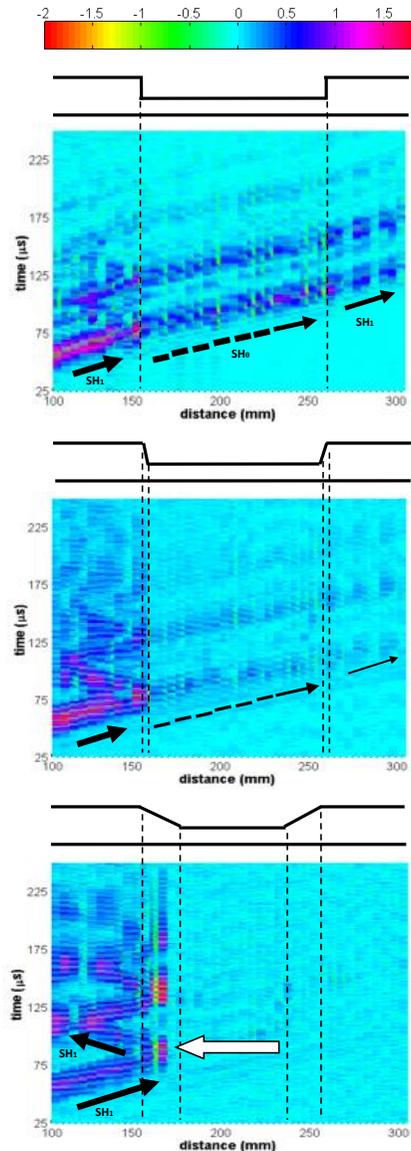
PPM-EMAT telah digunakan untuk membangkitkan gelombang *shear horizontal* (SH) untuk menginspeksi penipisan pada pelat aluminum [23, 24] dan pipa baja [25]. Gelombang SH adalah salah satu moda gelombang transversal dimana getaran partikel paralel dengan permukaan dan tegak lurus terhadap arah perambatan. Gelombang ini memiliki kelebihan diantaranya (i) dapat merambat lebih jauh karena energi gelombang hampir seluruhnya tersimpan dua dimensi, bukan tiga dimensi seperti pada jenis gelombang yang lain; (ii) tidak begitu terpengaruh oleh pelapis (*coating*) yang biasanya melapisi pipa; dan (iii) memiliki karakteristik dispersi yang sederhana sehingga memudahkan saat interpretasi sinyal hasil pengukuran [26]. Meskipun memiliki banyak kelebihan, gelombang SH ini tidak begitu populer digunakan karena gelombang ini relatif sulit untuk dibangkitkan menggunakan PZT. Seperti telah disinggung diatas, hal ini bukan masalah bagi EMAT. Seperti gelombang terpadu (*guided wave*) yang lainnya, gelombang SH memiliki banyak sekali moda vibrasi di sepanjang ketebalan objek pemandunya. Gambar 3 menunjukkan moda vibrasi dasar (*fundamental*) yang diberi nama  $SH_0$  dan moda vibrasi atas yang pertama,  $SH_1$ .



Gambar 3. (a) Arah vibrasi partikel dan perambatan gelombang pada moda dasar  $SH_0$ ; dan (b) moda tinggi pertama  $SH_1$

Pada umumnya, parameter gelombang yang digunakan dalam pengujian adalah amplitudo atau intensitas gelombang yang berubah ketika gelombang merambat melalui area pada objek uji yang mengandung cacat. Parameter ini dapat bermanfaat untuk pendeteksian cacat secara kualitatif, tetapi bermasalah ketika ingin melakukan kuantifikasi dari cacat tersebut karena amplitudo mudah dipengaruhi oleh banyak faktor. Nurmalia et. all. mengusulkan untuk menggunakan parameter gelombang terpadu yang lain, yaitu kecepatan grup (*group velocity*) gelombang SH untuk mengkuantifikasi cacat berupa penipisan. Mereka menyimpulkan bahwa kecepatan grup moda gelombang SH<sub>1</sub> lebih potensial digunakan sebagai parameter untuk mengevaluasi cacat penipisan. Studi tersebut membuktikan secara eksperimental bahwa moda SH<sub>1</sub> berubah menjadi moda SH<sub>0</sub> ketika gelombang tersebut merambat pada objek dengan ketebalan lebih tipis dari sebuah nilai yang disebut *cut-off thickness* atau nilai batas ketebalan pemandu gelombang [24]. Nilai batas ketebalan ini dimiliki oleh semua moda, terkecuali moda dasar, dan besarnya ditentukan oleh frekuensi.

Kelanjutan studi tersebut menemukan bahwa fenomena konversi moda tersebut dipengaruhi oleh seberapa drastis bidang batas antara dua ketebalan. Jika ketebalalan objek mendadak berkurang sehingga bidang batas pergantian ketebalan berupa anak tangga, maka gelombang seluruhnya diteruskan menuju area penipisan dan moda SH<sub>1</sub> berubah menjadi moda SH<sub>0</sub>. Tetapi ketika bidang batas melandai, sebagian gelombang terpantulkan dan ketika bidang batas sangat landai, seluruh gelombang mengalami pemantulan tepat pada ketebalan bidang batas, dimana pantulannya tetap berupa moda SH<sub>1</sub> [23]. Gambar 4 menunjukkan hasil eksperimen yang dimaksud di gambar atas, tengah, dan bawah masing-masing diperoleh dari objek uji dengan bidang batas berupa anak tangga, berupa bidang miring, dan bidang miring yang sangat landai. Gambar-gambar ini diperoleh dari sinyal yang diterima di sepanjang jalur perambatan ketika gelombang SH<sub>1</sub> dibangkitkan. Kemiringan tanda panah berbanding terbalik dengan kecepatan grup dan dari sana dapat ditentukan moda gelombang. Dapat dilihat pada gambar atas dan tengah, kemiringan tanda panah berubah pada bagian objek yang tipis dan hasil analisa menunjukkan konversi moda menjadi SH<sub>0</sub>. Sedangkan pada gambar paling bawah, gelombang mengalami pemantulan total, hal ini merupakan sebuah fenomena menarik yang untuk pertama kalinya ditemukan.



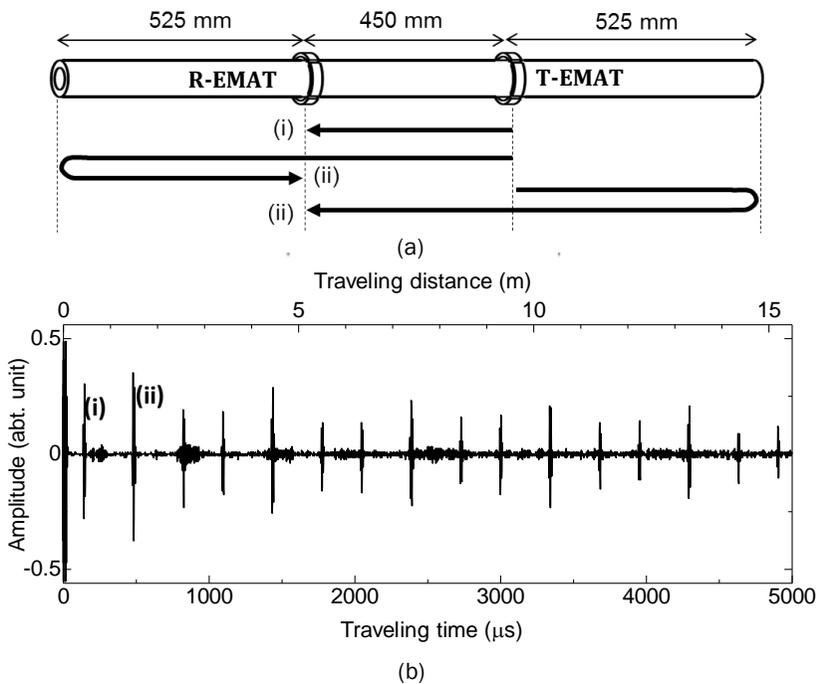
Gambar 4. Perambatan moda gelombang SH<sub>1</sub> pada spesimen dengan transisi antar ketebalan yang berbeda. Penampang melintang diperlihatkan jauh lebih besar dari yang sebenarnya.

### 3.3 Aplikasi Torsional EMAT untuk Inspeksi Pipa

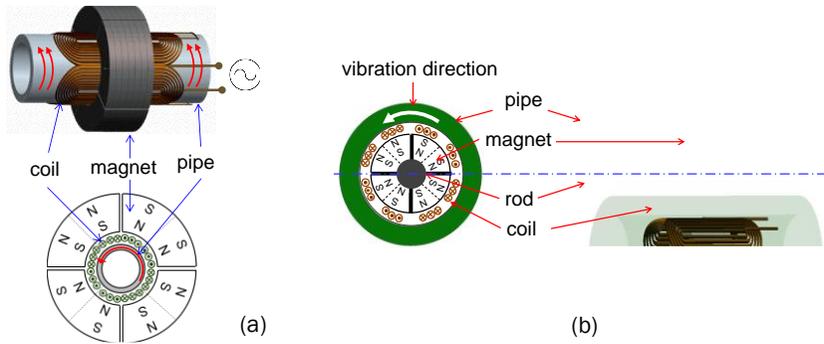
Kelompok riset yang sama telah mengembangkan EMAT yang dapat membangkitkan gelombang torsional pada pipa [27, 28]. Gelombang torsional adalah moda gelombang yang bisa merambat pada objek berbentuk silinder seperti pipa [29, 30]. Gelombang ini ditandai dengan vibrasi partikel pada arah keliling pipa, sementara gelombang merambat pada arah aksial. Karakter ini menyebabkan gelombang torsional dapat merambat lebih jauh dengan atenuasi yang minimal, karena energi gelombang tersimpan hampir dalam dua dimensi. Gambar 5 (b) menunjukkan sinyal yang diterima dari setup yang ditunjukkan pada gambar (a), dimana T-EMAT dan R-EMAT adalah masing-masing EMAT yang

berfungsi sebagai pembangkit dan penerima gelombang. Sinyal (i) merupakan gelombang yang langsung diterima dari pembangkit, sedangkan sinyal (ii) adalah gabungan dari gelombang yang sudah mengalami pantulan dari ujung pipa, sehingga amplitudonya lebih besar. Dapat dilihat bahwa gelombang yang sudah memantul berkali-kali dan menempuh jarak sampai 15 meter masih memiliki amplitudo yang cukup tinggi, menunjukkan atenuasi gelombang yang tidak signifikan. Selain itu, gelombang torsional juga relatif lebih tidak sensitif terhadap insulasi (*coating*) dan beban dari cairan/gas yang diangkut oleh pipa. Seperti juga gelombang SH, gelombang torsional memiliki karakter dispersi yang sederhana, sehingga sinyal yang diterima lebih mudah untuk diinterpretasikan. Disisi lain, moda gelombang ini sangat sulit untuk dibangkitkan menggunakan transduser PZT, dapat dibangkitkan dengan transduser magnetostriksi tetapi transduser ini bersifat kontak seperti telah dijelaskan pada bagian 2. Dengan demikian, EMAT merupakan transduser yang ideal untuk membangkitkan gelombang torsional.

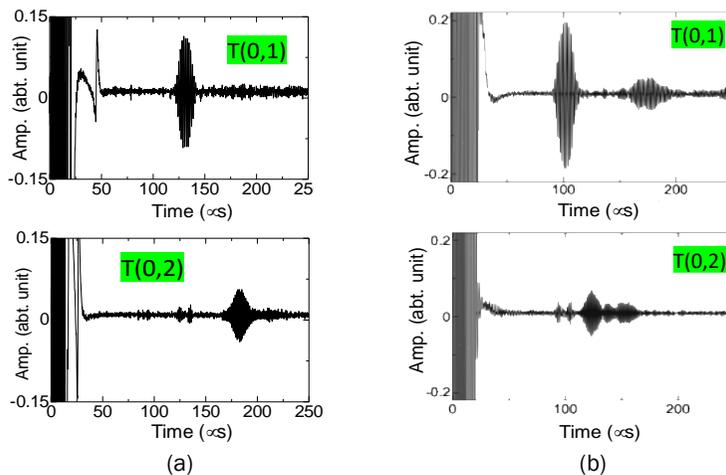
Dua jenis torsional EMAT telah dirancang: untuk dipasang di luar pipa dan di dalam pipa. Gambar 6 menunjukkan skema torsional EMAT yang dipasang di luar dan di dalam pipa serta mekanisme pembangkitan gaya Lorentz, menunjukkan arah arus listrik pada kumparan, posisi kutub utara dan selatan magnet permanen, dan gaya Lorentz yang ditandai dengan panah berwarna merah. Kumparan yang dirancang berupa *flat-coil* yang fleksibel, sehingga bisa mengikuti bentuk dan dapat melingkari pipa dengan sempurna. Medan magnet statis disediakan oleh susunan magnet permanen yang bentuknya mengikuti kelengkungan pipa. Sebuah batang digunakan untuk meletakkan bagian-bagian transduser pada *inside* EMAT. Batang ini dapat ditarik menggunakan motor pada *scanning inspection*.



Gambar 5. (a) Setup yang digunakan untuk mendapatkan sinyal gelombang (b), menunjukkan kemampuan gelombang torsional untuk merambat dengan sedikit atenuasi

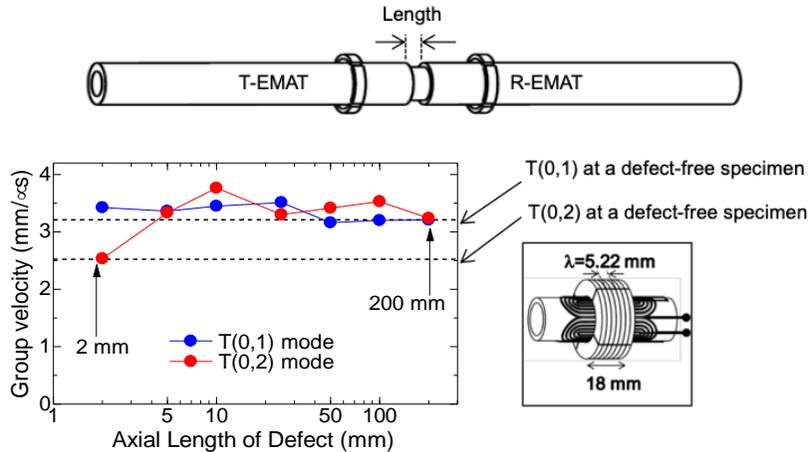


**Gambar 6.** Diagram skema dari torsional EMAT untuk pengujian dari luar (a) dan dari dalam (b) [24]. Arah gaya Lorentz yang dihasilkan ditunjukkan masing-masing dengan panah berwarna merah dan putih.



**Gambar 7.** Sinyal tipikal gelombang torsional moda  $T(0,1)$  dan  $T(0,2)$  yang berhasil dibangkitkan dan dideteksi oleh sepasang (a) *outside* EMAT dan (b) *inside* EMAT

Gambar 7 menunjukkan sinyal tipikal yang berhasil dibangkitkan oleh EMAT dan dideteksi oleh EMAT sejenis setelah gelombang merambat sejauh 400 cm pada pipa aluminium dengan lingkaran luar 25 mm dan ketebalan 3 mm (a) dan 300 cm pada pipa baja dengan lingkaran luar 25.4 mm dan ketebalan 3.5 mm (b). Gambar (a) diperoleh menggunakan sepasang *outside* EMAT dan gambar (b) menggunakan *inside* EMAT. Masing-masing pasangan EMAT dapat membangkitkan gelombang torsional moda dasar (*fundamental mode*) yang dinamakan  $T(0,1)$  dan moda tinggi yang pertama  $T(0,2)$  pada frekuensi di atasnya. Sinyal masing-masing mode pada gambar adalah yang memiliki amplitudo paling besar; dapat dilihat bahwa sinyal yang dihasilkan sangat jelas dan bersih dari noise.

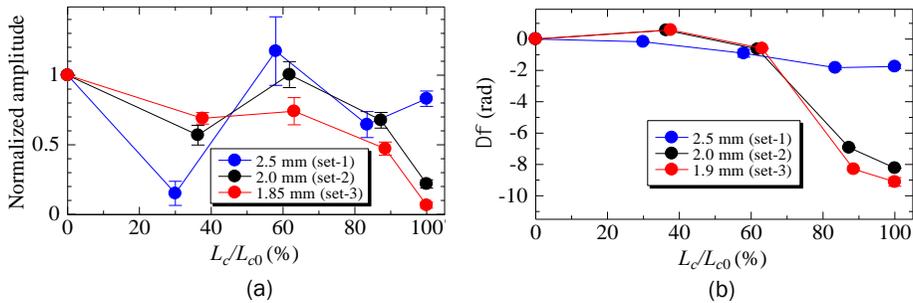


**Gambar 8. Pengukuran cepat rambat grup pada penipisan dengan berbagai lebar aksial, menunjukkan bahwa moda T (0,2) dapat digunakan untuk mendeteksi area penipisan**

Gelombang torsional kemudian digunakan untuk menginspeksi penipisan pada pipa dengan memfokuskan pada parameter kecepatan group. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa gelombang torsional T(0,2) lebih menunjukkan potensi untuk digunakan jika dibandingkan dengan moda T (0,1). Studi ini juga berhasil menunjukkan, untuk pertama kalinya, konversi moda gelombang T(0,2) menjadi T(0,1) ketika gelombang merambat menuju ke area yang lebih tipis dari ketebalan batas. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa perilaku perambatan dipengaruhi oleh bentuk bidang batas area penipisan dan fenomena refleksi total juga terjadi ketika bidang batas sangat landai [25].

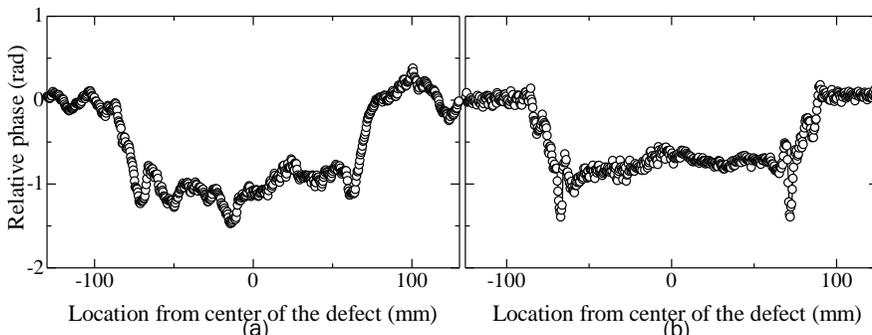
Fenomena konversi moda ini dapat menjadi dasar untuk mendeteksi keberadaan area yang mengalami penipisan. Untuk mengetahui ukuran aksial minimal dari area penipisan yang dapat dideteksi, dilakukan eksperimen dimana moda T(0,2) dirambatkan pada pipa dengan lebar area penipisan berbeda-beda tetapi ketebalan pada area penipisan sama, yaitu lebih kecil dari *cut-off thickness*. Hasil eksperimen ditunjukkan pada Gambar 8, dimana dapat dilihat bahwa kecepatan grup moda gelombang dasar T(0,1) tidak berubah, sementara moda T(0,2) berubah menjadi T(0,1) ketika lebar area penipisan 5 mm dan lebih. Ini bersesuaian dengan panjang gelombang yang dibangkitkan, yaitu 5.22 mm. Hasil ini menunjukkan bahwa konversi moda bisa digunakan untuk mendeteksi keberadaan area penipisan dibawah *cut-off thickness* dengan lebar melebihi panjang gelombang yang digunakan.

Cacat penipisan sebenarnya biasanya tidak meliputi keseluruhan keliling pipa. Metode ini dapat digunakan bahkan ketika penipisan hanya meliputi sebagian dari pipa [24]. Gambar 9 menunjukkan amplitudo dan fasa relatif yang diperoleh untuk berbagai rasio keliling cacat ( $L_c$ ) terhadap keliling semula ( $L_{co}$ ), ketika gelombang torsional moda T(0,2) dirambatkan. Ketebalan sisa pada area penipisan ditunjukkan dengan warna garis yang berbeda. Seperti dapat dilihat, variasi amplitudo tidak mudah untuk diinterpretasikan, sedangkan variasi fasa relatif cukup jelas polanya. Terjadi penurunan fasa yang signifikan, menunjukkan terjadinya konversi moda menjadi T(0,1) pada cacat dengan ketebalan sisa 2.0 mm dan 1.9 mm, ketika rasio keliling lebih besar dari 60%. Dengan demikian, metoda konversi moda masih dapat digunakan untuk mendeteksi dan mengevaluasi cacat penipisan bahkan ketika cacat hanya meliputi sebagian keliling pipa.



Gambar 9. (a) Amplitudo dan (b) fasa gelombang ketika moda T(0,2) dirambatkan pada pipa dengan cacat berbagai ukuran [27]

Untuk mengilustrasikan aplikasi di lapangan, tim yang sama telah melakukan inspeksi *scanning* pada pipa aluminium dan baja yang mengandung cacat dengan menggunakan moda gelombang T(0,2) [27]. Inspeksi dilakukan menggunakan sepasang *inside* EMAT yang ditarik oleh motor dari luar pipa. Cacat berupa penipisan berbentuk lonjong di bagian luar pipa yang dapat disebabkan oleh korosi maupun tumbukan dengan benda lain. Dengan demikian, pengukuran juga mendemonstrasikan kemampuan gelombang ultrasonik untuk mendeteksi cacat di sepanjang ketebalan, tidak hanya pada sisi permukaan dimana transduser berada. Gambar 10 menunjukkan hasil inspeksi *scanning*, masing-masing untuk pipa aluminium dan baja. Dapat dilihat bahwa keberadaan cacat dapat diketahui dengan menurunnya fasa, sebagai akibat dari konversi moda pada daerah yang mengalami penipisan.



Gambar 10. Profil fasa hasil inspeksi *scanning* moda T(0,2) pada pipa (a) baja dan (b) aluminium yang mengandung cacat penipisan, menunjukkan kemampuan untuk mendeteksi cacat [27]

#### 4. Kesimpulan

Uji tak merusak (*nondestructive testing*, NDT) sangat penting untuk memastikan integritas infrastruktur, misalnya pada jaringan pipa yang mengangkut bahan bakar minyak dan gas alam pada tekanan tinggi. Hal ini dikarenakan adanya cacat sedikit saja dapat berpotensi mengakibatkan kecelakaan yang fatal disamping kerugian ekonomi yang besar. NDT menjadi pilihan utama karena dapat digunakan bahkan ketika pipa sudah terpasang pada jaringan dan sudah beroperasi, karena sifatnya yang tidak merusak.

Berbagai teknik NDT dapat mendeteksi keberadaan cacat permukaan, yaitu *visual testing* baik tanpa alat maupun menggunakan alat bantu, *penetrant testing*, *magnetic flux leakage* (MFL), dan *eddy current testing*. Cacat tidak hanya terdapat di permukaan, oleh karena itu dikembangkan juga teknik-teknik NDT yang dapat mendeteksi keberadaan cacat pada sepanjang ketebalan, yaitu diantaranya teknik radiografi dan ultrasonik. Teknik radiografi memerlukan peralatan yang mahal dan pengoperasiannya memerlukan sertifikasi khusus karena berbahaya. NDT dengan ultrasonik relatif tidak semahal radiografi dan dapat digunakan oleh siapa saja karena tidak berbahaya.

Pembangkitan gelombang ultrasonik yang paling umum adalah menggunakan *piezoelectric transducer* (PZT). Ini merupakan transduser kontak yang memerlukan pelumas (*couplant*) di antara transduser dengan objek inspeksi. Keperluan akan pelumas ini membatasi aplikasi, misalnya untuk pengujian pada temperatur tinggi dan pengujian yang bergerak. Transduser magnetostriktif merupakan transduser jenis baru, tetapi merupakan transduser kontak dan tidak memungkinkan untuk pengujian yang bergerak. Gelombang ultrasonik berfrekuensi tinggi dapat dibangkitkan secara non-kontak menggunakan laser berkekuatan tinggi, tetapi peralatan yang digunakan sangat mahal dan besar, serta berpotensi membahayakan. *Electromagnetic acoustic transducer* (EMAT) merupakan transduser baru yang bekerja dengan prinsip berbeda dengan PZT. EMAT membangkitkan gelombang ultrasonik secara non-kontak, langsung pada objek inspeksi sehingga tidak memerlukan pelumas. Hal ini membuat EMAT ideal untuk pengujian pada temperatur tinggi dan pengujian yang bergerak, seperti *scanning*.

Sebuah riset grup telah membangun berbagai jenis EMAT, diantaranya EMAT untuk membangkitkan gelombang *shear horizontal* (SH) pada pelat dan gelombang torsional pada pipa. Kedua jenis gelombang ini sulit untuk dibangkitkan menggunakan PZT, tetapi dapat dibangkitkan dengan mudah menggunakan EMAT. Gelombang ultrasonik ini kemudian digunakan untuk menginspeksi penipisan pada pelat dan pipa. Studi ini juga berhasil untuk pertama kalinya membuktikan secara eksperimen fenomena yang disebut konversi moda (*mode conversion*) dari moda tinggi pertama  $SH_1$  dan  $T(0,2)$  menjadi moda dasar  $SH_0$  dan  $T(0,1)$ , ketika gelombang-gelombang ini merambat pada area yang mengalami penipisan, dengan sisa ketebalan lebih kecil dari *cut-off thickness*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fenomena konversi moda ini memiliki potensi untuk digunakan sebagai metoda inspeksi kuantitatif penipisan pada pelat dan pipa.

## 5. Referensi

- [1] Verma, A., et. al., "A techno-economic assessment of bitumen and synthetic crude oil transport (SCO) in the Canadian oil sands industry: Oil via rail or pipeline?" *Energy*, vol. 124, pp. 665–683, April 2017, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.057>
- [2] Bastian, B.T., et. al., "Visual inspection and characterization of external corrosion in pipelines using deep neural network" *NDT&E International* vol. 107, pp. 102134, October 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.102134>
- [3] Shipway, N.J., et. al., "Using ResNets to perform automated defect detection for Fluorescent Penetrant Inspection", *NDT&E International* vol. 119, pp. 102400, April 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102400>
- [4] Piao, G., et. al., "Fast reconstruction of 3-D defect profile from MFL signals using key physics-based parameters and SVM", *NDT & E International* vol 103, pp. 26–38, April 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.01.004>
- [5] Jiu hao, G., Noritaka, Y., Mengbao, F., "Frequency component mixing of pulsed or multi-frequency eddy current testing for nonferromagnetic plate thickness

- measurement using a multi-gene genetic programming algorithm," *NDT&E International*, vol. 120, pp. 102423, June 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102423>.
- [6] Suyama, F.M., et. el., "Deep neural networks based approach for welded joint detection of oil pipelines in radiographic images with Double Wall Double Image exposure ", *NDT & E International*, vol. 105, pp. 46-55, July 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.05.002>.
- [7] Yan, J., et. al., "Interface monitoring of steel-concrete-steel sandwich structures using piezoelectric transducers", *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 51, Issue 4, pp. 1132-1141, July 2019, <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.01.013>.
- [8] Qiang Huan, Mingtong Chen, Faxin Li, "A practical omni-directional SH wave transducer for structural health monitoring based on two thickness-poled piezoelectric half-rings", *Ultrasonics*, vol. 94, pp. 342-349, April 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.07.010>.
- [9] S. Yan, et al., "Pipeline Damage Detection Using Piezoceramic Transducers: Numerical Analyses with Experimental Validation", *Sensors*, vol. 18(7), pp. 1-22, June 2018, <https://doi.org/10.3390/s18072106>
- [10] Emeterio, J.L.S., et.al., "Modeling NDT piezoelectric ultrasonic transmitters", *Ultrasonics*, vol. 42, Issues 1-9, pp. 277-281, April 2004, <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.01.021>.
- [11] Yuan, L., et. al., "Piezoelectric PAN/BaTiO3 nanofiber membranes sensor for structural health monitoring of real-time damage detection in composite", *Composites Communications*, vol. 25, pp. 100680, June 2021 (in progress), <https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100680>.
- [12] Wang, J., et. al., "Fabrication and high acoustic performance of high frequency needle ultrasound transducer with PMN-PT/Epoxy 1-3 piezoelectric composite prepared by dice and fill method", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 318, pp. 112528, February 2021, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112528>.
- [13] Guo, S., et. al., "Direct-write piezoelectric ultrasonic transducers for pipe structural health monitoring", *NDT&E International*, vol. 107, pp. 102131, October 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.102131>.
- [14] Gulino, M.S., et. al., "Gas-Coupled Laser Acoustic Detection technique for NDT of mechanical components", *Ultrasonics*, vol. 114, pp. 106415, July 2021 (on progress), <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2021.106415>.
- [15] Dubois, M., Drake Jr.T.E., Evolution of Industrial Laser-Ultrasonic System for the Inspection of Composites, *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 26, issue 3-4, pp. 213-228, Juli 2011, <https://doi.org/10.1080/10589759.2011.573552>
- [16] Narayanan, M.M., et. al., "Development of in-bore magnetostrictive transducer for ultrasonic guided wave based-inspection of steam generator tubes of PFBR", *Ultrasonics*, vol. 106, pp. 106148, August 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106148>.
- [17] Kim, Y.Y., Kwon, Y.E., "Review of magnetostrictive patch transducers and applications in ultrasonic nondestructive testing of waveguides", *Ultrasonics*, vol. 62, pp. 3 - 19, September 2015, <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.05.015>
- [18] Hirao, M., Ogi, H., *Electromagnetic Acoustic Transducers: Noncontacting Ultrasonic Measurements using EMAT*, 2<sup>nd</sup> ed., Springer: Japan, 2007.
- [19] Zhang, X., et. al., "An improved analytical model of the magnetostriction-based EMAT of SHO mode guided wave in a ferromagnetic plate", *Ultrasonics*, vol. 108, pp. 106213, December 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106213>.

- [20] Ren, W., et. al., "A study of magnetostriction mechanism of EMAT on low-carbon steel at high temperature", *NDT&E International*, vol. 101, pp. 34-43, January 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.10.001>.
- [21] Sun, H., et. al., "Improvement of unidirectional focusing periodic permanent magnet shear-horizontal wave electromagnetic acoustic transducer by oblique bias magnetic field", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 290, pp. 36-47, May 2019, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.03.003>.
- [22] Vasile, C.F., Thompson, R.B., "Excitation of Horizontally Polarized Shear Waves by Electromagnetic Transducer with Periodic Permanent Magnets", *Journal of Applied Physics*,. 50, No. 4, pp. 2583-2588, 1978. <https://doi.org/10.1063/1.326265>
- [23] Nurmalia, et al., "Mode Conversion Behavior of SH Guided Wave in a Tapered Plate", *NDT&E International*, vol. 45, pp. 156-161, January 2012, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.10.004>
- [24] Nurmalia, et al., "Detection of Shear Horizontal Guided Waves Propagating in Aluminum Plate with Thinning Region", *Japanese Journal of Applied Physics* 50, 07HC17, July 2011, <https://doi.org/10.1143/JJAP.50.07HC17>
- [25] Hirao, M., Ogi, H., "An SH-wave EMAT Technique for Gas Pipeline Inspection", *NDT&E International*, vol. 32, pp. 127-132, April 1999, [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(98\)00062-0](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(98)00062-0)
- [26] Rose, J.L., *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge University Press: Cambridge/Melbourne/Cape Town, 1999.
- [27] Nurmalia, et al., "EMAT Pipe Inspection Technique Using Higher Mode Torsional Guided Wave T(0,2)", *NDT&E Internasional*, vol. 87, pp. 78-84, April 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.01.009>
- [28] Nurmalia, et al., "Mode Conversion and Total Reflection of Torsional Waves for Pipe Inspection", *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 52, pp. 07HC14, July 2013, <https://doi.org/10.7567/JJAP.52.07HC14>
- [29] Meeker, T.R., et al., "Guided Wave Propagation in Elongated Cylinders and Plates", in *Physical Acoustic I*, Academic Press: New York/London, 1964.
- [30] Kolsky, H., *Stress Waves in Solids*, Dover Publication: New York, 1963.