



## Pemanfaatan Metode *Phased Array Ultrasonic Testing* untuk Deteksi Cacat Material

**Fransiska Maura Meilan Kristanti Pasaribu<sup>a,1</sup>, Muhammad Rizky Nurzaman<sup>a</sup>, Alif Zaky Supriadi<sup>a</sup>, Muhamad Eko Prasetyo<sup>a</sup>, Muhammad Revanza Naufal Novianto<sup>a</sup>, Bening Nurul Hidayah Kambuna<sup>a</sup>, Adhitya Trenggono<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> Jurusan Teknik Metalurgi, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Jl. Jenderal Sudirman KM. 03, Kotabumi Kec. Purwakarta, Kota Cilegon, Banten, 42435, Indonesia

<sup>1</sup>E-mail: [3334230125@untirta.ac.id](mailto:3334230125@untirta.ac.id)

### INFO ARTIKEL

#### Riwayat artikel:

Diajukan pada 00 Desember 00

Direvisi pada 00 Januari 00

Disetujui pada 00 Februari 00

Tersedia daring pada 00 Maret 00

#### Kata kunci:

*Phased Array Ultrasonic Testing*,  
Pengujian Tidak Merusak, Material  
Anisotropik.

#### Keywords:

Phased Array Ultrasonic Testing,  
Nondestructive Testing, Anisotropic  
Materials.

### ABSTRAK

*Phased Array Ultrasonic Testing* (PAUT) merupakan metode pengujian tidak merusak yang efektif untuk menginspeksi material anisotropik, seperti komposit polimer yang diperkuat serat karbon (CFRP) dan lasan baja austenitik. Tinjauan pustaka ini mensintesis temuan dari empat studi untuk menunjukkan keunggulan dan penerapan lanjutan dari PAUT. Analisis menunjukkan bahwa PAUT lebih superior dibandingkan *Single Element Ultrasonic Testing* (SEUT) konvensional, dengan menghasilkan *signal-to-noise ratio* (SNR) 15% lebih tinggi serta kebutuhan *gain* 7-20% lebih rendah. Lebih lanjut, terdapat teknik PAUT yang secara signifikan dapat meningkatkan keandalan inspeksi, yaitu TFM. *Total Focusing Method* (TFM) menunjukkan kualitas pencitraan dan kedalaman deteksi yang jauh lebih baik, berhasil mengidentifikasi cacat hingga kedalaman 50 mm pada lasan austenitik, sementara metode S-Scan tradisional gagal mendeteksi cacat di atas 30 mm. Pentingnya optimasi parameter inspeksi juga diperlukan, simulasi membuktikan bahwa pemilihan mode gelombang dan frekuensi yang tepat dapat meningkatkan amplitudo sinyal dari ~30% menjadi lebih dari 80% untuk cacat tertentu. Integrasi PAUT dengan kecerdasan buatan, khususnya *Convolutional Neural Network* (CNN), terbukti efektif dalam mengklasifikasikan cacat secara otomatis pada CFRP dengan akurasi puncak mencapai 98.89% dan efisiensi komputasi yang lebih unggul.

### ABSTRACT

Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT) is an effective nondestructive testing method for inspecting anisotropic materials, such as carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites and austenitic steel welds. This literature review synthesizes findings from four studies to demonstrate the advantages and advanced applicability of PAUT. The analysis shows that PAUT is superior to conventional Single Element Ultrasonic Testing (SEUT), by delivering 15% higher signal-to-noise ratio (SNR) as well as 7-20% lower gain requirement. Furthermore, there is a PAUT technique that can significantly improve inspection reliability, namely TFM. The Total Focusing Method (TFM) showed significantly better imaging quality and detection depth, successfully identifying defects up to 50 mm deep in austenitic welds, while the traditional S-Scan method failed to detect defects above 30 mm. The importance of inspection parameter optimization is also necessary, simulations proved that proper selection of wave mode and frequency can increase the signal amplitude from ~30% to more than 80% for certain defects. The integration of PAUT with artificial intelligence, specifically Convolutional Neural Network (CNN), proved to be effective in automatically classifying defects in CFRP with peak accuracy reaching 98.89% and superior computational efficiency.

Tersedia pada: <http://dx.doi.org/10.36055/furnace>

## 1. Pendahuluan

Sebuah produk industri dirancang untuk menjalankan fungsi tertentu dan pengguna berharap produk tersebut dapat berfungsi dengan baik tanpa masalah untuk jangka waktu yang wajar. Tingkat kepastian ini disebut *reliability* (keandalan). Keandalan sebuah mesin yang kompleks, seperti kereta api, mobil, atau pesawat terbang, bergantung pada keandalan tiap komponen individu penyusunnya. Keandalan berasal dari peningkatan kualitas yang ditentukan oleh banyak faktor seperti desain, karakteristik material, serta teknik manufaktur dan fabrikasi. Kualitas dapat diartikan sebagai ada atau tidaknya cacat dan ketidaksempurnaan dalam material. Cacat ini bisa terbentuk selama proses produksi maupun saat produk sedang digunakan. Kegagalan akibat cacat dapat memiliki konsekuensi yang serius. Oleh karena itu, diperlukan metode untuk mendeteksi cacat tanpa merusak kegunaan produk. Metode ini dikenal sebagai Pengujian Tidak Merusak (*Non-Destructive Testing/NDT*). NDT adalah pengembangan dan penerapan metode teknis untuk memeriksa material atau komponen dengan cara tidak mengganggu kegunaan dan masa pakainya dengan tujuan untuk mendeteksi, menemukan, mengukur, dan mengevaluasi diskontinuitas dan ketidaksempurnaan lainnya. Metode NDT yang diterapkan dengan benar dalam mendeteksi cacat dapat memungkinkan terjadinya pencegahan terhadap kegagalan. Kegagalan yang tidak terduga pada komponen mesin, *vessels*, atau struktur dapat mengakibatkan biaya yang tidak terduga akibat hilangnya nyawa atau kerusakan lingkungan yang permanen [30].

Secara umum, teknik Pengujian Tidak Merusak (NDT) dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori, yaitu aktif dan pasif. Teknik aktif, seperti *magnetic particle testing*, *ultrasonic testing*, dan *radiography*, bekerja dengan cara menerapkan suatu medium ke benda uji untuk mendeteksi respons yang muncul jika terdapat cacat. Sebaliknya, teknik pasif, seperti *acoustic emission*, *noise analysis*, *leak testing*, *visual examination*, dan beberapa *residual magnetic techniques*, memantau benda uji selama kondisi beban normal untuk mendeteksi keberadaan cacat melalui reaksi dari benda uji itu sendiri [30]. *Ultrasonic Testing* (UT) adalah metode NDT yang bekerja dengan cara memasukkan gelombang suara berfrekuensi tinggi ke dalam material untuk mendeteksi cacat di permukaan dan di bawah permukaan. Prinsip kerjanya adalah gelombang suara merambat melalui material dan akan dipantulkan kembali ketika mengenai sebuah antarmuka, seperti batas material atau diskontinuitas (cacat). Pantulan ini kemudian dianalisis untuk menentukan keberadaan dan lokasi cacat. Instrumen ultrasonik mendeteksi cacat dengan memantau refleksi suara, waktu tempuh gelombang, atau pelemahan (atenuasi) gelombang suara di dalam benda uji. Dibandingkan dengan metode NDT lainnya, pengujian *ultrasonic* memiliki beberapa keunggulan utama seperti dapat mendeteksi cacat yang berada jauh di dalam komponen, lebih akurat dalam menentukan posisi dan ukuran, hanya memerlukan satu permukaan benda uji untuk memeriksa seluruh volume material, memberikan indikasi cacat secara instan, tidak berbahaya bagi operator atau lingkungan sekitar, dan instrumen mudah dibawa [31].

## 2. Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT)

Pada dasarnya, pengujian ultrasonik bekerja dengan mengirimkan getaran mekanis berfrekuensi tinggi (0,5-15 MHz untuk industri) ke dalam material menggunakan *probe*. Metode konvensional memakai *probe* dengan kristal tunggal yang menghasilkan berkas suara yang menyebar pada satu sudut tetap. Keterbatasan utamanya adalah berkas yang tidak fleksibel. Hal ini sering kali mengakibatkan kegagalan dalam mendeteksi cacat atau retakan yang posisinya miring atau berada di luar jalur utama berkas. Teknologi *phased array* mengatasi keterbatasan tersebut dengan menggunakan *probe* yang terdiri dari banyak elemen kristal kecil. Setiap elemen ini berperan sebagai sumber suara kecil (transduser) [32]. *Phased Array Ultrasonic Testing* (PAUT) adalah teknik pencitraan di mana berkas gelombang ultrasonik dapat dimanipulasi secara elektronik. Dengan menerapkan program jeda waktu (*focal law*) pada *array transducer*-nya [33]. *Phased array* ultrasonik telah terbukti efektif dalam mendeteksi cacat, mengukur ketebalan, dan menganalisis inspeksi pengelasan. Teknologi ini menawarkan beberapa keunggulan jika dibandingkan dengan sistem yang menggunakan transduser elemen tunggal (konvensional). Pertama, teknologi ini memberikan fleksibilitas inspeksi yang lebih tinggi dan lebih cepat. Kedua, PAUT memungkinkan adanya apertur pemindaian dan pemfokusan sintesis. Terakhir, teknologi ini memungkinkan pemindaian dari berbagai sudut dan posisi tanpa perlu menggerakkan transduser (*probe* tetap stasioner). Keunggulan terbesarnya adalah fleksibilitas yang dikendalikan oleh perangkat lunak. Pengguna dapat dengan mudah mengubah sudut berkas, jarak fokus, dan ukuran titik fokus secara langsung. Kemampuan untuk menyapu area pengujian dengan berbagai sudut dan fokus secara drastis meningkatkan kemungkinan untuk menemukan cacat yang miring atau yang lokasinya acak, yang sangat sulit dilakukan oleh *probe* konvensional. Dengan ini, teknologi PAUT memiliki kemampuan untuk melakukan pembelokan (defleksi), pemfokusan, dan pemindaian berkas, yang menghasilkan peningkatan deteksi cacat pada material. Secara praktis, untuk menciptakan berkas terfokus, sistem akan memicu setiap elemen *probe* pada waktu yang sedikit berbeda sesuai program (*focal law*). Saat gema dari cacat kembali, gema tersebut akan tiba di setiap elemen pada waktu yang juga berbeda. Sistem kemudian menerapkan jeda waktu kompensasi pada sinyal yang diterima dari setiap elemen sebelum menjumlahkannya. Proses ini secara efektif memperkuat sinyal yang berasal dari titik fokus yang dituju dan meredam *noise* atau gema dari lokasi lain, sehingga menghasilkan sinyal (A-scan) yang jauh lebih bersih dan akurat. PAUT memiliki karakteristik transduser yang ringkas dan presisi inspeksi yang tinggi dan terdiri dari banyak transduser piezoelektrik yang disusun dalam formasi linear (garis) atau matriks (bidang). [32], [34]. Keunggulan lainnya ialah kapabilitas teknologi ini untuk menghasilkan citra visual dari struktur internal material, yang memfasilitasi analisis cacat secara lebih cepat dan jelas. Selain itu, PAUT menunjukkan efektivitas tinggi untuk inspeksi pada komponen dengan geometri yang kompleks. Kapabilitas ini diperkuat oleh dukungan metode akuisisi data canggih seperti *Full Matrix Capture* (FMC) dan algoritma pemrosesan *Total Focusing Method* (TFM), yang secara signifikan meningkatkan detail serta akurasi deteksi [35], [36].

## 3. Analisis Metode Phased Array Ultrasonic Testing

Tabel 1. Penelitian dengan Metode *Phased Array Ultrasonic Testing*.

No.	Artikel Ilmiah	Material Uji	Jenis Cacat	Tujuan	Metode yang Dibandingkan	Kesimpulan
1	<i>Nondestructive Ultrasonic Inspection of Composite Materials: A Comparative Advantage of Phased Array Ultrasonic</i>	Komposit (CFRP & GFRP)	Cacat buatan berupa lubang	Membandingkan keunggulan Ultrasonik <i>Phased Array</i> (PAUT) dengan ultrasonik konvensional (SEUT)	Metode Ultrasonik: Elemen Tunggal (SEUT) dan <i>Phased Array</i> (PAUT)	PAUT lebih unggul dari SEUT dengan menunjukkan keunggulan dalam sensitivitas dan kemampuan mendeteksi cacat yang lebih

No.	Artikel Ilmiah	Material Uji	Jenis Cacat	Tujuan	Metode yang Dibandingkan	Kesimpulan
						kecil dari yang mampu dideteksi oleh SEUT
2	<i>Ultrasonic Phased Array Testing and Identification of Multiple-Type Internal Defects in Carbon Fiber Reinforced Plastics Based on Convolutional Neural Network</i>	Komposit (CFRP)	Delaminasi, inklusi, dan <i>impact damage</i>	Mengklasifikasikan berbagai jenis cacat menggunakan pengujian PAUT dan CNN untuk meningkatkan akurasi deteksi	Algoritma AI: AEC Net, AlexNet dan ShuffleNet-V2	AEC mampu mencapai akurasi hingga 97,69% dan mampu membedakan berbagai kategori cacat dengan tingkat akurasi sekitar 98,13%
3	<i>Performance Evaluation of Austenitic Stainless Steel Weld by Ultrasonic Phased Array Inspection Based on Probability of Detection</i>	Las Baja Austenitik (304 ASS)	<i>Side-Drilled Holes</i> (SDH)	Mengevaluasi keandalan PAUT secara kuantitatif pada las baja austenitik	Algoritma Pencitraan: Fokus Dinamis dan <i>Total Focusing Method</i> (TFM)	TFM memberikan citra yang lebih baik. Keandalan deteksi 90% ( $a^{90}$ ) tercapai pada kedalaman 19.33 mm
4	<i>Analysis of Flaw Detection Sensitivity of Phased Array Ultrasonics in Austenitic Steel Welds According to Inspection Conditions</i>	Las Baja Austenitik (SUS304H)	Planar	Menganalisis sensitivitas deteksi PAUT berdasarkan perbedaan kondisi inspeksi	Kondisi Inspeksi: Mode Gelombang (Longitudinal/Transversal) & Frekuensi	Kombinasi beberapa kondisi inspeksi diperlukan untuk deteksi yang andal pada semua jenis cacat

Keempat artikel ilmiah pada tabel menggunakan material uji yang memiliki karakteristik yang sama, yaitu memiliki sifat anisotropik. Pada artikel pertama dan kedua digunakan material komposit CFRP (*carbon fiber-reinforced polymer*). Sifat anisotropik dari material komposit menjadi penghalang bagi perambatan gelombang ultrasonik. Perambatan gelombang ini sendiri dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti arah serat, keberadaan cacat, dan tingkat tegangan internal material [37]. Struktur komposit yang anisotropik membuat perambatan gelombang di dalamnya menjadi rumit, ditambah dengan adanya hamburan acak dan tingkat atenuasi yang tinggi, secara signifikan mengurangi keandalan deteksi cacat menggunakan metode ultrasonik [38], [39]. Pada artikel ketiga dan keempat digunakan material yang sama-sama memiliki lasan baja austenitik. Material ini juga dikenal sebagai komponen yang sulit diuji dengan metode ultrasonik, hal ini disebabkan oleh sifat anisotropik dari area pengelasan serta ukuran butiran kolom. Atenuasi dari ultrasonik frekuensi tinggi, *noise* akibat hamburan balik (*backscattering*), dan pembelokan arah berkas pada material menjadi penyebab utama kesulitan dalam pengujian ultrasonik terhadap las baja austenitik [40], [41].

Dalam artikel ilmiah yang ditulis oleh Taheri dan Hassen, dilakukan perbandingan langsung antara teknik ultrasonik modern dan konvensional, yaitu *Phased Array Ultrasonic Testing* (PAUT) dengan *Single Element Ultrasonic Testing* (SEUT). Penelitian ini difokuskan pada evaluasi sensitivitas deteksi dan analisis karakteristik sinyal, termasuk *signal-to-noise ratio* (SNR), nilai *gain*, serta kedalaman penetrasi gelombang. Untuk keperluan pengujian, digunakan cacat buatan berupa lubang bor berdiameter kecil (hingga 0,8 mm) yang ditempatkan pada berbagai kedalaman. Tujuannya adalah untuk menguji batas sensitivitas dan kapabilitas deteksi dari kedua metode ultrasonik terhadap cacat. Parameter seperti SNR, nilai *gain* yang diperlukan untuk mendapatkan sinyal yang dapat dideteksi, dan waktu tempuh gelombang (untuk menghitung kecepatan rambat dan kedalaman cacat) menjadi dasar perbandingan kualitatif dan kuantitatif antara PAUT dan SEUT. Penelitian ini menunjukkan bahwa metode PAUT dan SEUT dapat mendeteksi lubang cacat sekecil 0,8 mm pada kedalaman sampai 25 mm. Namun, untuk karakteristik sinyal dari cacat yang dapat dideteksi, PAUT menghasilkan SNR 15% lebih tinggi dengan kebutuhan *gain* yang 7-20% lebih rendah dibandingkan SEUT pada frekuensi yang sama (1,5 Mhz). Gambar sinyal dari PAUT menunjukkan pantulan cacat yang lebih jernih dan mudah dideteksi. Sebaliknya, metode SEUT menghasilkan gambaran sinyal yang tidak jernih (*less smoothness*) sehingga sulit untuk mengidentifikasi lokasi pantulan cacat dengan baik [42].

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Kim dan rekan-rekannya, digunakan segmen tabung boiler dari material SUS304H yang memiliki sambungan las dengan cacat planar buatan. Cacat tersebut dirancang menyerupai cacat yang umum dijumpai pada struktur las, yaitu retak (*crack*) yang ditempatkan di tengah lasan dan *lack of fusion* (LF) yang ditempatkan pada permukaan alur las. Material baja austenitik yang digunakan menunjukkan sifat anisotropik dan tidak homogen, akibat proses pemadatan logam serta orientasi acak dari butiran kristal selama pembekuan. Kompleksitas struktur mikro ini menyebabkan perambatan gelombang ultrasonik terganggu oleh fenomena seperti refraksi, hamburan, dan pelemahan (atenuasi) pada batas butiran sehingga *signal-to-noise ratio* (SNR) menurun dan kinerja pemfokusan berkas pada metode PAUT turut terdegradasi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memahami karakteristik propagasi gelombang ultrasonik pada sambungan las dan mengembangkan prosedur inspeksi yang lebih andal. Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu menggabungkan simulasi komputasi dengan verifikasi eksperimental. Simulasi propagasi gelombang PAUT dilakukan pada sambungan las anisotropik dengan mempertimbangkan berbagai parameter inspeksi, seperti mode gelombang, frekuensi, dan posisi cacat. Untuk merepresentasikan sifat anisotropik pada las baja, penelitian ini mengadopsi model yang membagi area las menjadi enam *domain* dengan orientasi butir kristal yang beragam namun asimetris. Model ini dipilih sebagai kompromi antara akurasi representasi struktur las yang sebenarnya dan waktu analisis komputasi yang efisien (50 menit) dibandingkan dengan model ogilvy yang ideal dan simetris sehingga tidak dapat merepresentasikan sifat inhomogenitas asimetris yang ditemukan pada las anisotropik di dunia nyata. Kondisi inspeksi utama dianalisis dengan menggunakan mode gelombang dan frekuensi yang berbeda, yaitu gelombang transversal dengan frekuensi 4 Mhz dan 7,5 Mhz serta gelombang longitudinal dengan frekuensi 5 Mhz. Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak CIVIA. Simulasi dilakukan untuk mendeteksi cacat buatan berupa retak (*crack*) dan *lack of fusion* (LF) pada tiga posisi berbeda (atas, tengah, bawah) di dalam las. Sensitivitas deteksi dianalisis dengan membandingkan amplitudo sinyal A-scan. Setelah simulasi dilakukan, maka juga dilakukan eksperimen pada pipa dan las yang identik dengan yang dimodelkan. Hasil eksperimen (gambar A-scan, B-scan, dan S-scan) dibandingkan dengan hasil simulasi untuk membuktikan bahwa hasil simulasi akurat dan pemilihan metode efektif untuk dilakukan. Setelah dibandingkan, hasil eksperimen memvalidasi dan menunjukkan kesamaan dengan hasil yang diprediksi oleh simulasi. Pada deteksi *top crack* dihasilkan bahwa cacat ini dapat dideteksi secara valid menggunakan gelombang transversal 4 MHz. Inspeksi dengan *probe* 7.5 MHz menghasilkan sinyal yang sulit dibedakan dari

sinyal geometri lainnya. Namun, dengan *probe* 4 MHz, muncul sinyal yang lebih tinggi di sekitar lokasi cacat yang dapat diidentifikasi sebagai sinyal cacat. Cacat *top LF* dapat dideteksi dengan gelombang transversal, tetapi tidak dengan gelombang longitudinal. *Probe* gelombang longitudinal 5 MHz mendeteksi sinyal, tetapi amplitudonya di bawah 20% sehingga sulit untuk dideteksi. Sebaliknya, *probe* gelombang transversal 7.5 MHz berhasil mendeteksi cacat dengan sinyal A-scan yang relatif tinggi. Sedangkan, untuk *middle crack* dapat dideteksi dengan semua metode, tetapi penggunaan gelombang transversal akan menyulitkan evaluasi karena adanya sinyal hamburan (*scattering*) dan difraksi. Inspeksi dengan gelombang longitudinal lebih cocok untuk dilakukan. *Probe* transversal 7.5 MHz memang mendeteksi sinyal (~30%), tetapi terganggu oleh hamburan dan refraksi. Sebaliknya, *probe* longitudinal 5 MHz menunjukkan sinyal cacat yang sangat jelas (di atas 80%) dan posisi cacat dapat ditentukan secara akurat. Secara garis besar, penelitian ini berhasil menggunakan simulasi komputer untuk mengembangkan metode inspeksi PAUT yang andal dalam menemukan cacat pada lasan baja austenitik. Namun, mereka juga menemukan keterbatasan yang signifikan, yaitu metode yang dikembangkan ini tidak dapat secara akurat menentukan posisi dan ukuran dari cacat yang ditemukan tersebut [43].

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Wang dkk., digunakan spesimen las tumpul dari material Austenitic Stainless Steel (ASS) 304, yang dikenal sebagai salah satu material yang sulit diuji menggunakan metode *ultrasonic testing* karena memiliki sifat anisotropik akibat orientasi butiran kristalnya [44]. Pemeriksaan dengan menggunakan *Phased Array Ultrasonic Testing* (PAUT) pada material ini menunjukkan probabilitas deteksi retakan yang relatif rendah, disebabkan oleh distorsi dan pemisahan berkas gelombang ultrasonik saat merambat melalui media anisotropik [41]. Namun, pemfokusan gelombang PAUT dapat meningkatkan *signal-to-noise ratio* (SNR), terutama pada material dengan struktur butiran kasar. Untuk mengatasi keterbatasan deteksi, kombinasi antara pemindaian mekanis dan pengarah berkas secara elektronik (*beam steering*) dapat digunakan untuk memperluas cakupan inspeksi dan meningkatkan kemampuan dalam mendeteksi cacat. Pendekatan ini dapat dilakukan untuk mendeteksi cacat secara aktual pada material las polikristalin, yang secara struktural memiliki tantangan serupa dengan ASS 304 [45]. Penelitian ini dilakukan dengan metode PAUT yang menggunakan *probe* berfrekuensi 5 MHz dan membandingkan dua teknik canggih dalam *Phased Array Ultrasonics*, yaitu *traditional sectional scan imaging* (S-Scan) dan *Total Focusing Method* (TFM) *imaging* untuk menemukan cacat yang sangat kecil pada material lasan yang terkenal sulit untuk diinspeksi. Setelah itu dilakukan evaluasi berdasarkan perbandingan kualitas gambar yang dihasilkan dan kejelasan metode pemfokusan dalam menunjukkan posisi cacat. Kurva *probability of detection* (POD) kemudian digunakan untuk memperkirakan kemampuan deteksi dan keandalan masing-masing teknik PAUT. Penelitian ini menggunakan cacat buatan berupa *side-drilled holes* (SDH) dengan diameter 1 mm yang ditempatkan pada berbagai kedalaman (mulai dari 10 mm hingga 50 mm) baik di zona las maupun di zona fusi (perbatasan antara logam las dan logam induk). Temuan dari penelitian ini menunjukkan bahwa TFM memberikan peningkatan yang signifikan dalam kualitas gambar dan SNR dibandingkan dengan metode PAUT tradisional (S-scan) ketika digunakan untuk inspeksi lasan material ASS. Pada PAUT S-Scan, didapat bahwa kualitas sinyal (SNR) menurun drastis seiring bertambahnya kedalaman cacat. Pada kedalaman 10 mm, nilai SNR yang dihasilkan cukup baik (20.3 dB), tetapi pada kedalaman 30 mm, nilai SNR menurun drastis menjadi 12.5 dB, mengakibatkan sinyal cacat sulit dibedakan dari *noise*. Gambar S-Scan yang dihasilkan pada cacat yang terdeteksi di bawah 30 mm tidak cukup jelas untuk menentukan posisi lubang cacat secara akurat. Metode S-Scan gagal mendeteksi cacat pada kedalaman 40 mm dan 50 mm di dalam zona lasan. Sinyal dari cacat yang dalam ini tertutup sepenuhnya dari *noise* yang kuat hasil struktur butiran kasar material lasan. Maka dari itu, dapat disimpulkan bahwa metode PAUT dengan teknik S-Scan tidak dapat diandalkan untuk mendeteksi cacat lebih dalam dari 30 mm pada material ini. Sedangkan, teknik TFM terbukti mampu mencitrakan SDH dengan baik. TFM dapat memvisualisasikan hampir sempurna semua lubang cacat di zona las hingga kedalaman 50 mm. Analisis POD yang dilakukan juga mengkonfirmasi bahwa keberadaan zona las memang mengurangi kemampuan deteksi cacat (ditunjukkan dengan nilai a90 sebesar 19.33 mm di zona las), yang disebabkan oleh tingginya *noise* struktural [44].

Disisi lain, penelitian yang dilakukan M dkk berfokus pada pemrosesan data *ultrasonic testing* komposit dengan memanfaatkan PAUT untuk menghasilkan data *C-scan* dari spesimen CFRP yang mengandung berbagai jenis cacat. Data *C-scan* ini kemudian menjadi dasar untuk analisis lebih lanjut menggunakan pembelajaran mesin dengan CNN (*convolutional neural network*) berbasis AEC (*autoencoder classifier*) untuk klasifikasi otomatis *multiple-type defects*. Tujuan utama dari CNN ini adalah untuk melakukan klasifikasi otomatis terhadap jenis dan ukuran cacat yang ada. Kinerja model AEC dievaluasi menggunakan metrik akurasi dan dibandingkan dengan model CNN standar lainnya seperti AlexNet dan ShuffleNet-V2. Penelitian ini melaporkan bahwa Dari segi akurasi, ketiga model ini sangat kompetitif dan semuanya berkinerja sangat baik (di atas 96-97%). Namun, metode CNN berbasis AEC Net yang mereka kembangkan menunjukkan kemampuan ekstraksi fitur cacat yang unggul dan mencapai akurasi yang sedikit lebih tinggi secara konsisten, dengan akurasi puncak mencapai 98.89% dan rata-rata 97.74%. Hal ini membuktikan bahwa performa AEC Net tidak kalah, bahkan sedikit lebih unggul untuk berbagai jenis cacat pada CFRP. Model AEC ini bahkan mengungguli model CNN standar lainnya dalam hal efisiensi, yang diukur dari jumlah parameter yang dapat dilatih dan konsumsi memori. AEC Net hanya memiliki 226,152 parameter. Jumlah ini jauh lebih kecil dibandingkan AlexNet (23 juta) dan ShuffleNet-V2 (1.2 juta). Dengan jumlah parameter yang lebih sedikit, maka model ini lebih mudah disimpan dan dijalankan. Selain itu AEC Net juga memiliki konsumsi memori yang lebih sedikit, yaitu hanya menggunakan 1,65 MB memori komputasi. Angka ini lebih efisien dibandingkan AlexNet (90.05 MB) dan juga lebih baik dari ShuffleNet-V2 (8.60 MB) [46].

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan tinjauan dari keempat penelitian, dapat disimpulkan bahwa metode *Phased Array Ultrasonic Testing* (PAUT) menawarkan kemajuan dalam inspeksi material yang bersifat anisotropik seperti komposit CFRP dan lasan baja austenitik. Penelitian oleh Taheri dan Hassen menunjukkan bahwa PAUT lebih unggul dari teknik konvensional (SEUT) dengan menghasilkan SNR 15% lebih tinggi dan kebutuhan *gain* 7-20% lebih rendah. Selanjutnya, penelitian oleh Kim dkk. membuktikan bahwa simulasi komputasi dapat mengembangkan prosedur PAUT yang lebih efektif, dengan pemilihan parameter yang sangat krusial. Gelombang longitudinal 5 MHz berhasil mendeteksi retak di tengah lasan dengan sinyal di atas 80%, sementara metode lain seperti gelombang transversal 7,5 MHz hanya menghasilkan sinyal ~30% yang terganggu *noise* untuk cacat yang sama. Lebih lanjut, studi oleh Wang dkk. menunjukkan bahwa teknik PAUT canggih seperti *Total Focusing Method* (TFM) dapat meningkatkan kualitas gambar dan kedalaman deteksi hingga 50 mm pada lasan baja, jauh melampaui S-Scan tradisional yang gagal mendeteksi cacat di atas 30 mm. Terakhir, penelitian oleh Me dkk. meningkatkan inovasi dengan memanfaatkan data PAUT untuk melatih model *Convolutional Neural Network* (CNN) yang berhasil mengklasifikasikan cacat dengan akurasi puncak 98.89% serta efisiensi komputasi yang jauh lebih unggul.

## DAFTAR PUSTAKA

- [30] Industrial Application and Chemistry Section, “Non-destructive Testing: A Guidebook for Industrial Management and Quality Control Personnel,” Vienna, Jan 1999.
- [31] ASM International, *ASM Handbook Nondestructive Evaluation and Quality Control*, 9 ed., vol. 17. ASM International, 1998.
- [32] Olympus, “Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications,” Waltham, 2017.
- [33] H. Yang *dkk.*, “Ultrasonic Detection Methods for Mechanical Characterization and Damage Diagnosis of Advanced Composite Materials: A review,” 2023, doi: 10.1016/j.compstruc.
- [34] H. Uzun dan D. Gustiani, “Review of Phased Array Ultrasonic Testing of Weld Joints,” *Journal of Marine and Engineering Technology*, vol. 4, no. 2, hlm. 77–92, Des 2024, doi: 10.58771/joinmet.1525521.
- [35] R. Hampson, D. Zhang, A. Gachagan, dan G. Dobie, “Modelling and characterisation ultrasonic phased array transducers for pipe inspections,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 200, Des 2022, doi: 10.1016/j.ijpvp.2022.104808.
- [36] Q. Xu dan H. Wang, “Sound Field Modeling Method and Key Imaging Technology of an Ultrasonic Phased Array: A Review,” 1 Agustus 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/app12167962.
- [37] V. V. Gonçalves, D. M. G. de Oliveira, dan A. A. dos Santos Junior, “Comparison of Ultrasonic Methods for Detecting Defects in Unidirectional Composite Material,” *Materials Research*, vol. 24, 2021, doi: 10.1590/1980-5373-MR-2021-0323.
- [38] J. C. Aldrin *dkk.*, “Fundamentals of angled-beam ultrasonic NDE for potential characterization of hidden regions of impact damage in composites,” dalam *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Apr 2018. doi: 10.1063/1.5031592.
- [39] N. Toyama, J. Ye, W. Kokuyama, dan S. Yashiro, “Non-contact ultrasonic inspection of impact damage in composite laminates by visualization of Lamb wave propagation,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 1, Jan 2019, doi: 10.3390/app9010046.
- [40] B. Chassignole, V. Duwig, M. A. Ploix, P. Guy, dan R. El Guerjouma, “Modelling the attenuation in the ATHENA finite elements code for the ultrasonic testing of austenitic stainless steel welds,” *Ultrasonics*, vol. 49, no. 8, hlm. 653–658, 2009, doi: 10.1016/j.ultras.2009.04.001.
- [41] O. Nowers, D. J. Duxbury, dan B. W. Drinkwater, “Ultrasonic array imaging through an anisotropic austenitic steel weld using an efficient ray-tracing algorithm,” *NDT and E International*, vol. 79, hlm. 98–108, Apr 2016, doi: 10.1016/j.ndteint.2015.12.009.
- [42] H. Taheri dan A. A. Hassen, “Nondestructive ultrasonic inspection of composite materials: A comparative advantage of phased array ultrasonic,” *Applied Sciences*, vol. 9, no. 8, hlm. 1–16, Apr 2019, doi: 10.3390/app9081628.
- [43] Y. L. Kim, S. Cho, dan I. K. Park, “Analysis of flaw detection sensitivity of phased array ultrasonics in austenitic steel welds according to inspection conditions,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 21, no. 1, hlm. 1–16, Jan 2021, doi: 10.3390/s21010242.
- [44] Qiang Wang, K. Zhu, L. Wu, H. Li, X. Xu, dan S. Gong, “Performance Evaluation of Austenitic Stainless Steel Weld by Ultrasonic Phased Array Inspection Based on Probability of Detection,” *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 56, no. 7, hlm. 566–573, Jul 2020, doi: 10.1134/S1061830920070086.
- [45] S. Shahjahan, F. Rupin, A. Aubry, B. Chassignole, T. Fouquet, dan A. Derode, “Comparison between experimental and 2-D numerical studies of multiple scattering in Inconel600® by means of array probes,” *Ultrasonics*, vol. 54, no. 1, hlm. 358–367, Jan 2014, doi: 10.1016/j.ultras.2013.06.012.
- [46] M. Ma, Z. Wang, Z. Gao, dan M. Jiang, “Ultrasonic Phased Array Testing and Identification of Multiple-Type Internal Defects in Carbon Fiber Reinforced Plastics Based on Convolutional Neural Network,” *Materials*, vol. 18, no. 2, Jan 2025, doi: 10.3390/ma18020318.