

**DETEKSI CACAT PADA CARBON FIBER REINFORCED POLYMER
BERDASARKAN KOEFISIEN KORELASI PEARSON DARI SINYAL ECHO
ULTRASONIK**

**DEFECT DETECTION IN CARBON FIBER REINFORCED POLYMER USING
PEARSON CORRELATION COEFFICIENT FROM ULTRASONIC ECHO
SIGNALS**

**Yusuf Giri Wijaya¹⁾, Suprijanto²⁾, Afid Nugroho³⁾, Rhakamerta Hijazi⁴⁾, Damar Rastr
Adhika⁵⁾**

^{1,4}Magister Instrumentasi dan Kontrol, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

²Kelompok Keahlian Instrumentasi dan Kontrol, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

^{1,3}Pusat Riset Teknologi Penerbangan, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Rumpin, Bogor, Indonesia

⁴Pusat Riset Teknologi Analisis Berkas Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Serpong, Tangerang, Indonesia

⁵Kelompok Keahlian Teknologi Nano dan Kuantum, Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

⁵Pusat Penelitian Nanosains dan Nanoteknologi, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia
email: yusuf.giri.wijaya@brin.go.id¹⁾, supri89@itb.ac.id²⁾, afid001@brin.go.id³⁾, rhak001@brin.go.id⁴⁾
damar@itb.ac.id⁵⁾

Received:
8 Juli 2024

Accepted:
24 Juli 2024

Published:
19 September
2024



Abstrak

Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) adalah material komposit yang sering digunakan dalam industri penerbangan, otomotif, dan kelautan karena kekuatannya yang tinggi dan beratnya yang ringan. Namun, keandalan CFRP dapat terganggu oleh cacat internal yang terjadi selama proses manufaktur atau penggunaan. Penelitian ini bertujuan untuk mendeteksi adanya cacat pada CFRP berdasarkan koefisien korelasi Pearson dari sinyal echo ultrasonik. Metode ini menggunakan gelombang ultrasonik untuk mengidentifikasi cacat berdasarkan perubahan pola sinyal. Sinyal referensi diperoleh dengan merata-ratakan sinyal dari beberapa lokasi bebas cacat. Perubahan pola sinyal terhadap sinyal referensi dikuantifikasi menggunakan koefisien korelasi Pearson untuk mengklasifikasikan daerah bebas cacat dan yang memiliki cacat. Sampel uji berupa pelat tipis CFRP dengan cacat buatan dari material teflon berbentuk lingkaran dengan jari-jari 15 mm yang diletakkan pada dua kedalaman berbeda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa koefisien korelasi Pearson efektif membedakan antara area bebas cacat dan yang memiliki cacat. Area bebas cacat menunjukkan korelasi dalam rentang 0,97 sampai 1, sementara area dengan cacat menunjukkan korelasi rendah dalam rentang 0 sampai 0,36.

Kata Kunci: komposit, CFRP, uji tak merusak, ultrasonik, koefisien korelasi Pearson.

Abstract

Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) is a composite material widely used in the aerospace, automotive, and marine industries due to its high strength and low weight. However, the reliability of CFRP can be compromised by internal defects occurring during manufacturing or use. This study aims to detect defects in CFRP using the Pearson correlation coefficient from ultrasonic echo signals. This method utilizes ultrasonic waves to identify defects based on changes in signal patterns. The reference signal is obtained by averaging the signals from several defect-free locations. Variations in the measurement signals compared to the reference signal are quantified using the Pearson correlation coefficient to classify defect-free and defect-containing areas. The test samples consisted of thin CFRP plates with artificial defects created using Teflon material in the form of circles with a radius of 15 mm, placed at two different depths. The results indicate that the Pearson correlation coefficient effectively distinguishes between defect-free and defective areas. Defect-free areas showed correlation values in the range of 0.97 to 1, while defective areas showed low correlation values in the range of 0 to 0.36.

Keywords: composite, CFRP, non-destructive test, ultrasonic, coefficient correlation Pearson.

DOI:10.20527/sjmekinematika.v9i2.322

How to cite: Wijaya, Y. G., Suprijanto S., Nugroho, A., Hijazi, R., & Adhika, D. R., "Deteksi Cacat pada Carbon Fiber Reinforced Polymer Berdasarkan Koefisien Korelasi Pearson dari Sinyal Echo Ultrasonik". Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika, 9(2), 153-166, 2024.

PENDAHULUAN

CFRP merupakan material komposit yang terdiri dari matriks polimer yang diperkuat dengan serat karbon. Matriks polimer ini umumnya terbuat dari resin epoksi atau vinil ester yang memberikan dukungan struktural dan melindungi serat karbon. Kelebihan CFRP adalah memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, ketahanan terhadap korosi dan kondisi lingkungan[1]. CFRP sudah umum diaplikasikan dalam pembuatan mobil, pesawat terbang, maupun kapal laut dikarenakan kemampuannya mengurangi bobot struktural tanpa mengurangi kekuatan[2].

Kekuatan CFRP dapat menurun seiring dengan adanya cacat di dalamnya. Cacat sering muncul selama proses manufaktur, seperti delaminasi, porositas, dan inklusi. Delaminasi adalah pemisahan antar lapisan dalam CFRP. Porositas adalah rongga-rongga kecil dalam matriks yang dapat muncul akibat parameter curing yang tidak tepat atau tidak optimal, seperti durasi, tekanan, atau pengisangan resin dengan vakum. Perlakuan suhu pada saat proses curing juga mempengaruhi kekuatan pada material komposit[3]. Sedangkan inklusi adalah kehadiran material asing yang masuk ke dalam CFRP selama proses manufaktur, yang dapat menjadi titik awal kerusakan atau retak. Cacat juga dapat timbul karena proses penggunaan yang ekstrem atau akumulasi kerusakan seiring waktu penggunaan[4]. Uji tak merusak (NDT) menjadi krusial untuk memastikan keandalan material dalam jangka panjang[5].

NDT menggunakan metode ultrasonik menjadi pilihan utama untuk deteksi cacat pada CFRP karena keakuratan dan keamanannya bagi pengguna[6,7]. Teknik ultrasonik melibatkan pengiriman gelombang ultrasonik ke dalam material dan analisis pantulan gelombang yang terjadi. Metode analisis untuk deteksi cacat yang umum digunakan adalah berdasarkan amplitudo dan waktu tempuh dari pantulan gelombang (*echo*). Meskipun telah terbukti efektif, pendekatan ini memiliki beberapa keterbatasan yaitu ketergantungan pada keahlian teknisi untuk melakukan interpretasi hasil pengujian yang tepat[8]. Penelitian-penelitian sebelumnya telah memperkenalkan metode koefisien korelasi Pearson yang dapat mengidentifikasi cacat dengan membandingkan pola sinyal hasil pengukuran dengan sinyal

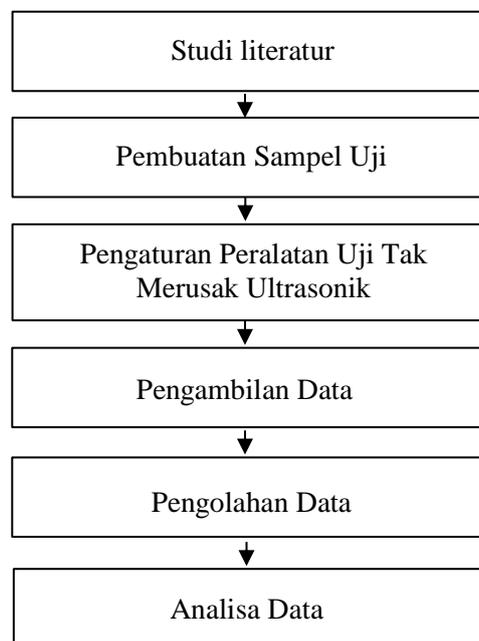
referensi [9,10]. Metode ini relatif lebih sederhana dan mudah diimplementasikan namun tetap memberikan hasil yang akurat. Dengan menggunakan metode ini, ketergantungan pada interpretasi manual oleh teknisi dapat dikurangi karena metode ini memberikan nilai kuantitatif yang mampu mengukur dan mengklasifikasikan kesamaan pola sinyal secara otomatis.

Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan metode koefisien korelasi Pearson dari sinyal *echo* ultrasonik guna mendeteksi cacat di dalam material CFRP. Proses deteksi cacat dimulai dengan melakukan klasifikasi sinyal hasil pengukuran di sampel uji. Dengan memanfaatkan teknologi ini, diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan NDT yang lebih efisien untuk material CFRP yang digunakan di berbagai sektor industri.

METODE PENELITIAN

Alur Penelitian

Kegiatan penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahap. Setiap tahap penelitian memiliki tujuan dan aktivitas spesifik yang dirancang untuk mendukung pencapaian tujuan penelitian secara keseluruhan. Tahapan penelitian ini dapat diikuti melalui diagram alir yang ditampilkan pada Gambar 1.

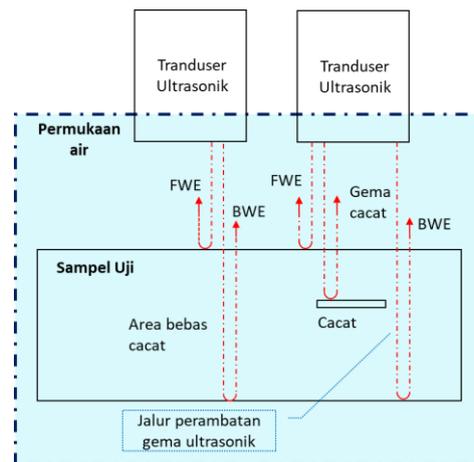


Gambar 1. Diagram alir penelitian

Penelitian dimulai dengan studi literatur untuk memahami teori dan metode yang ada. Literatur yang digunakan mencakup jurnal ilmiah, prosiding, dan buku yang terkait dengan metode ultrasonik dan koefisien korelasi Pearson. Langkah selanjutnya adalah membuat sampel uji CFRP. Setelah sampel uji selesai, peralatan uji tak merusak ultrasonik disiapkan untuk kegiatan pengujian. Kegiatan pengujian dilakukan untuk memperoleh data dengan cara mengukur dan merekam sinyal *echo* ultrasonik dari sampel uji. Data hasil pengukuran kemudian diolah menggunakan metode pengolahan sinyal untuk pemotongan, penyaringan (*filtering*), dan membuat sinyal dalam bentuk *envelope* untuk memudahkan dalam proses deteksi cacat. Sinyal yang telah diolah kemudian diklasifikasi berdasarkan koefisien korelasi Pearson untuk mengetahui karakteristik sinyal yang melewati area bebas cacat dan area cacat, sehingga dapat digunakan untuk analisis deteksi cacat.

Metode pengujian ultrasonik

NDT berbasis ultrasonik menggunakan gelombang ultrasonik dengan frekuensi lebih dari 20 kHz. Frekuensi tinggi ini memungkinkan gelombang ultrasonik untuk menembus medium padat dengan efektif. Selain digunakan dalam kegiatan NDT, metode ultrasonik juga banyak dimanfaatkan dalam berbagai kebutuhan industri, misalnya dimanfaatkan untuk melakukan penyambungan material[11]. Proses pengujian dimulai dengan mentransmisikan gelombang ultrasonik dari transduser ke sampel uji. Gelombang ultrasonik akan memantul kembali saat bertemu dengan batas antara material yang berbeda dalam sampel uji, seperti permukaan atas dan bawah, serta ketika ada cacat dalam sampel uji. *Echo* ultrasonik dari permukaan atas disebut sebagai front wall echo (FWE), dari permukaan bawah disebut back wall echo (BWE), dan *echo* akibat adanya cacat disebut *echo* cacat. Ilustrasi perambatan gelombang ultrasonik dari transduser hingga ke dalam sampel uji dan proses pemantulannya dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi perambatan gelombang ultrasonik di area bebas cacat dan area cacat

Echo ultrasonik dari sampel uji diterima kembali oleh transduser yang sama dan diubah menjadi sinyal listrik. Sinyal ini kemudian diolah lebih lanjut dan dianalisis untuk menentukan keberadaan cacat dalam material. Metode ini sangat efektif untuk mendeteksi cacat internal yang tidak dapat dilihat dari permukaan luar material.

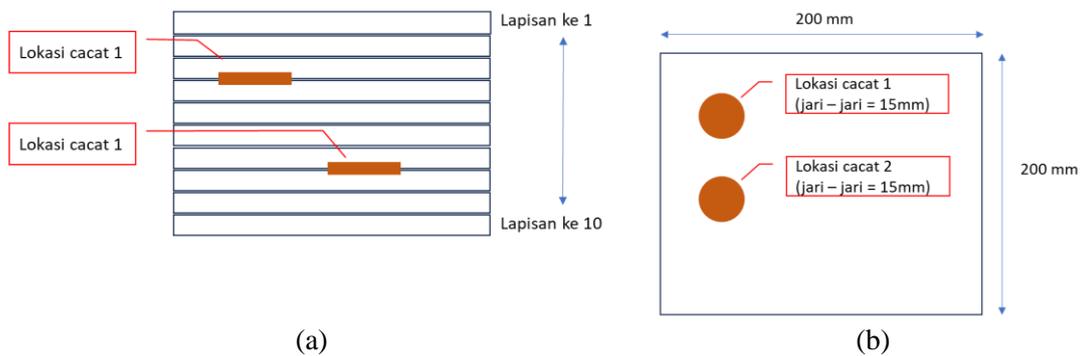
Sampel Uji

CFRP yang diuji dalam penelitian ini terbuat dari serat karbon dan resin vinil ester, dengan sepuluh lapisan serat berukuran 200 mm x 200 mm. Setelah proses produksi, CFRP memiliki ketebalan 2,3 mm. Sampel uji dibuat menggunakan teknik *vacuum assisted resin infusion* (VARI). Metode VARI merupakan metode yang sudah umum digunakan untuk pembuatan sampel uji untuk keperluan penelitian[12]. Proses dimulai dengan persiapan cetakan yang bersih dan dilapisi agen pelepas. Sepuluh lapisan serat karbon ditempatkan dalam cetakan, diikuti dengan jaring distribusi resin. Setelah ditutup plastik vakum dan disegel, pompa vakum digunakan untuk menarik resin hingga serat terinfusi sempurna tanpa gelembung udara. Setelah resin tersebar merata, komposit dibiarkan mengeras pada suhu kamar. Gambar 3 menunjukkan sampel uji hasil proses pabrikasi menggunakan metode VARI.



Gambar 3. CFRP yang digunakan sebagai sampel uji

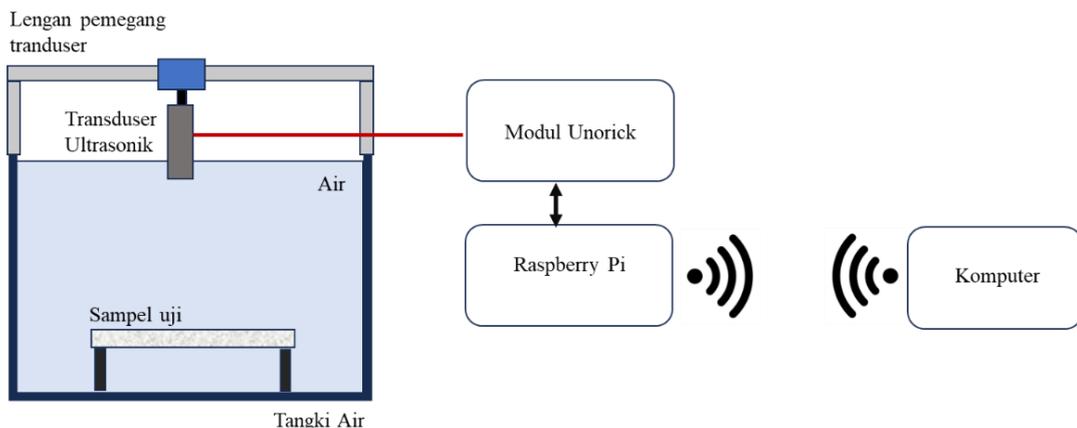
Cacat jenis inklusi sengaja ditempatkan dalam sampel uji. Cacat ini disimulasikan dengan menggunakan bahan Teflon tipis berbentuk lingkaran dengan jari-jari 15 mm. Sampel uji mengandung dua cacat buatan yang ditempatkan pada lokasi dan kedalaman berbeda. Cacat 1 ditempatkan antara lapisan serat ke-3 dan ke-4, sedangkan cacat 2 berada antara lapisan serat ke-7 dan ke-8. Perbedaan lokasi dan kedalaman cacat ini bertujuan untuk melihat pengaruh kedalaman terhadap proses identifikasi cacat. Gambar 4 menunjukkan desain simulasi cacat dalam sampel uji.



Gambar 4. Desain sampel uji dan posisi peletakan cacat, (a) Tampak samping, (b) Tampak atas

Konfigurasi peralatan pengujian

Pada penelitian ini, cacat buatan yang telah diletakkan di sampel uji CFRP di deteksi dengan NDT ultrasonik. Peralatan yang digunakan dalam proses pengujian NDT ultrasonik antara lain: transduser ultrasonik, modul Unorick, Raspberry Pi, pemegang dan pengatur posisi transduser ultrasonik, tangki air, dan komputer. Konfigurasi alat yang digunakan saat pengujian diilustrasikan dalam gambar 5.



Gambar 5. Konfigurasi alat uji ultrasonik

Transduser ultrasonik digunakan sebagai penghasil gelombang ultrasonik. Dalam penelitian ini, transduser ultrasonik yang digunakan memiliki frekuensi 5 MHz. Frekuensi 5 MHz, berdasarkan beberapa penelitian sebelumnya, mampu mendeteksi adanya cacat dalam material komposit[13,14]. Transduser ultrasonik yang digunakan merupakan produk dari SONOTEST dengan model IMR3750. Transduser ini berjenis *immersion* dengan diameter probe sebesar 3/8 inci.

Modul Unorick adalah perangkat yang digunakan sebagai pengontrol transduser ultrasonik untuk menghasilkan gelombang ultrasonik (pulser) sekaligus mengakuisisi gelombang ultrasonik. Modul Unorick merupakan perangkat berbasis ultrasonik yang dikembangkan oleh Luc Jonveaux dan bersifat *open-source*[15]. Modul Unorick telah banyak digunakan dalam berbagai penelitian berbasis ultrasonik, khususnya di bidang medis[16,17]. Modul Unorick ditampilkan dalam gambar 6.



Gambar 6. Modul Unorick

Raspberry Pi digunakan untuk mengatur parameter pulsa ultrasonik yang dihasilkan. Parameter pulsa ultrasonik yang dapat diatur meliputi lebar pulsa, jumlah pulsa, dan tegangan pulsa. Parameter ini mempengaruhi kualitas hasil pengukuran. Selain itu, pengaturan akuisisi data, seperti durasi perekaman data, juga dapat dilakukan. Raspberry Pi juga digunakan untuk menyimpan data hasil pengukuran ultrasonik. Data mentah hasil pengukuran kemudian diolah menggunakan komputer. Raspberry Pi dan komputer dihubungkan melalui jaringan nirkabel.

Pemegang dan pengatur posisi transduser ultrasonik digunakan untuk menempatkan transduser ultrasonik di atas sampel uji. Alat ini juga memudahkan proses pemindahan posisi transduser ultrasonik dari satu titik pengukuran ke titik pengukuran lainnya, dengan tetap menjaga jarak yang konsisten antara sampel uji dan transduser. Rangka alat ini terbuat dari aluminium Profile V-Slot jenis 2020, sedangkan pemegang transduser dibuat menggunakan printer 3D dengan bahan PLA.

Tangki air digunakan untuk meletakkan sampel uji dan air. Air berfungsi sebagai couplant yang memastikan tidak ada udara antara transduser dan sampel uji. Keberadaan udara dapat mengganggu proses pengujian karena udara merupakan medium perambatan gelombang ultrasonik yang buruk. Pengujian ultrasonik dengan merendam sampel uji di dalam air biasa disebut dengan tipe *immersion*. Stabilitas gelombang ultrasonik dalam pengujian tipe *immersion* sangat baik, sehingga memungkinkan pengukuran yang lebih akurat dan konsisten selama proses pengujian[18].

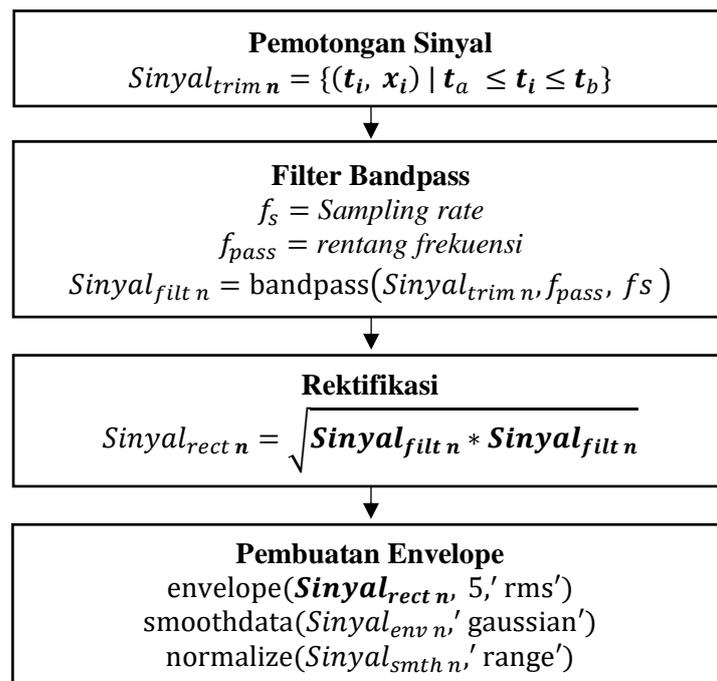
Metode Pengolahan Sinyal

Cacat dalam sampel uji dapat dideteksi setelah sinyal mentah hasil pengujian diolah melalui proses pengolahan sinyal. Proses ini dimulai dengan pemotongan sinyal yang difokuskan pada *echo* ultrasonik pertama yang melewati sampel uji. Pemotongan sinyal

bertujuan untuk meminimalkan waktu pengolahan dan memfokuskan sinyal hanya pada *echo* yang berhubungan dengan sampel uji.

Sinyal yang telah dipotong kemudian difilter untuk menghilangkan *noise*. Filter yang digunakan adalah filter *bandpass* dengan frekuensi yang disesuaikan dengan frekuensi transduser, yaitu 5 MHz. Setelah difilter, sinyal mengalami proses rektifikasi. Proses rektifikasi ini bertujuan mengubah sinyal bernilai negatif menjadi positif untuk memudahkan dalam melihat amplitudo tertinggi pada *echo* ultrasonik.

Selanjutnya, sinyal diubah menjadi bentuk *envelope* untuk memudahkan membedakan antara FWE, BWE, dan *echo* cacat dari sampel uji. Proses pembuatan *envelope* menggunakan metode RMS. Setelah sinyal berada dalam bentuk *envelope*, sinyal tersebut menjalani proses *smoothing* dan normalisasi. Hasil akhir dari proses ini disebut sebagai sinyal ultrasonik *envelope* yang siap untuk analisis deteksi cacat. Detail lengkap alur pembuatan sinyal ultrasonik *envelope* terdapat pada Gambar 7.



Gambar 7. Tahapan pengolahan sinyal ultrasonik *envelope*

Proses deteksi cacat dalam sampel uji tidak hanya dilakukan secara visual dengan memeriksa sinyal dalam bentuk *envelope* hasil pengujian, tetapi juga dapat diotomatisasi dengan mengkuantifikasi sinyal tersebut. Nilai dari proses kuantifikasi ini digunakan untuk mengklasifikasikan sinyal hasil pengukuran menjadi dua kategori: sinyal bebas cacat dan sinyal cacat. Dalam penelitian ini, klasifikasi sinyal dilakukan dengan menggunakan metode koefisien korelasi Pearson.

Penggunaan koefisien korelasi Pearson untuk klasifikasi sinyal hasil pengukuran ultrasonik sebagai sinyal cacat atau non-cacat didasarkan pada kemampuannya dalam mengukur hubungan linier antara dua set data. Koefisien korelasi Pearson mengindikasikan sejauh mana dua sinyal memiliki pola yang serupa. Dengan membandingkan sinyal uji dengan sinyal referensi, dapat diidentifikasi tingkat kesamaan antara keduanya. Sinyal referensi mencerminkan karakteristik sinyal pada area yang bebas cacat. Sinyal yang mirip dengan sinyal referensi kemungkinan besar merupakan sinyal non-cacat, sementara sinyal yang menunjukkan perubahan pola cenderung merupakan sinyal cacat.

Proses perhitungan nilai koefisien korelasi Pearson dimulai dengan melakukan alignment dari sinyal-sinyal hasil pengukuran di semua titik. Proses alignment bertujuan untuk menyelaraskan sinyal hasil pengukuran satu dengan yang lainnya, mengingat adanya pergeseran waktu yang disebabkan oleh perubahan kecil dalam jarak antara transduser ultrasonik dan sampel uji.

Langkah selanjutnya adalah pembuatan sinyal referensi, yang digunakan sebagai pembanding untuk sinyal hasil pengukuran. Sinyal referensi harus dibuat dalam setiap sesi pengujian, dengan menggunakan transduser ultrasonik yang sama, parameter pengujian yang identik, dan material uji yang sama. Hal ini diperlukan karena sinyal referensi hanya berlaku untuk kondisi-kondisi pengujian yang serupa; jika ada perbedaan, sinyal referensi tidak dapat digunakan.

Sinyal referensi dibuat dengan merata-ratakan sinyal ultrasonik *envelope* hasil pengukuran dari beberapa lokasi yang telah dikonfirmasi sebagai area sampel uji yang bebas cacat. Secara matematis, pembuatan sinyal referensi dapat dijelaskan dengan persamaan berikut:

$$A_{ref} = \frac{1}{x} \sum_{x=1}^x (A_n) \quad (1)$$

A_{ref} adalah sinyal referensi, x adalah banyaknya titik pengukuran yang digunakan untuk membuat sinyal referensi, dan A_n adalah sinyal ultrasonik *envelope* hasil pengukuran di titik n .

Perbandingan antara sinyal referensi dengan sinyal ultrasonik *envelope* hasil pengukuran di setiap titik pengukuran dihitung menggunakan persamaan korelasi Pearson sebagai berikut:

$$r_n = \frac{\sum_{n=1}^n (A_n - \overline{A_n})(A_{ref} - \overline{A_{ref}})}{\sqrt{\sum_{n=1}^n (A_n - \overline{A_n})^2 \sum_{n=1}^n (A_{ref} - \overline{A_{ref}})^2}} \quad (2)$$

r_n adalah koefisien korelasi person di titik pengukuran n . $\overline{A_n}$ adalah rata – rata sinyal ultrasonik *envelope* hasil pengukuran di titik n , dan $\overline{A_{ref}}$ adalah rata – rata sinyal referensi.

Koefisien korelasi Pearson yang diperoleh berkisar antara 0 hingga 1. Nilai koefisien mendekati 1 menunjukkan bahwa sinyal tersebut sangat mirip dengan sinyal referensi, yang mengindikasikan bahwa titik pengukuran tersebut merupakan area bebas cacat. Sebaliknya, nilai koefisien mendekati 0 menunjukkan adanya perbedaan signifikan dengan sinyal referensi, yang menunjukkan kemungkinan adanya cacat pada titik pengukuran tersebut. Penggunaan koefisien korelasi Pearson memungkinkan deteksi cacat yang lebih efisien dan akurat daripada pemeriksaan visual, karena memberikan alat kuantitatif untuk mengukur dan mengklasifikasikan kesamaan pola sinyal.

Prosedur pengujian

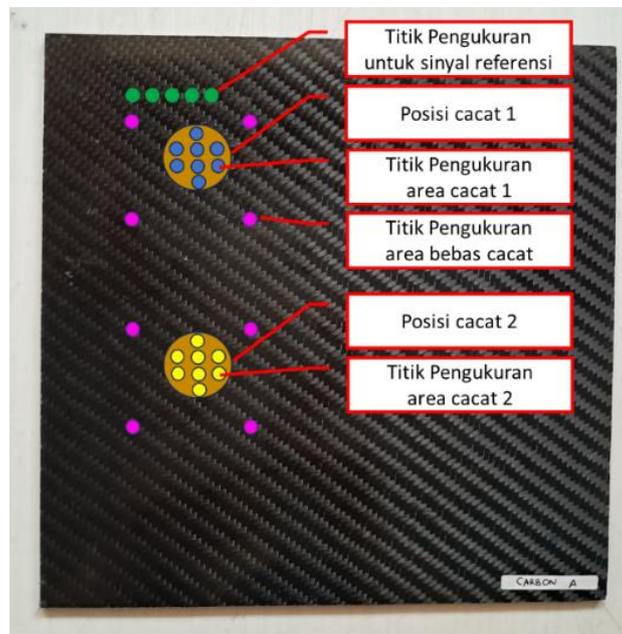
Pengujian dimulai dengan meletakkan spesimen CFRP di atas dudukan dalam tangki air. Sebelum pengujian dilakukan, pastikan tangki air, spesimen, serta perangkat pemegang dan pengatur posisi transduser berada dalam posisi rata, karena ketidakrataan dapat mengurangi akurasi pengujian. Dengan bantuan perangkat pemegang dan pengatur posisi, transduser ultrasonik diposisikan di atas sampel uji dengan jarak sekitar 70 mm, sesuai dengan rekomendasi pabrik transduser untuk menghindari pengaruh medan dekat.

Pengujian dilakukan dengan mengukur pantulan gelombang ultrasonik dari sampel uji di tiga area: area bebas cacat, area dengan cacat 1, dan area dengan cacat 2. Tujuan dari pengukuran di ketiga area ini adalah untuk mengklasifikasikan sinyal yang melewati daerah-

daerah bebas cacat dan daerah-daerah dengan cacat. Hasil klasifikasi ini dapat digunakan sebagai dasar untuk mendeteksi cacat dalam material.

Pengambilan data dimulai dengan pembuatan sinyal referensi. Posisi transduser saat pengambilan data dapat dilihat pada Gambar 8. Sinyal referensi yang digunakan dibentuk dari lima sinyal hasil pengukuran di area bebas cacat yang kemudian dirata-ratakan. Dalam penelitian ini, pengambilan sinyal referensi ditandai dengan titik berwarna hijau. Pengambilan sinyal referensi tidak hanya dapat dilakukan pada titik berwarna hijau, tetapi juga di titik manapun yang dipastikan sebagai area bebas cacat. Langkah berikutnya adalah memindahkan posisi transduser ke area bebas cacat lainnya, ditandai dengan warna magenta, dengan jumlah titik pengukuran sebanyak delapan.

Selanjutnya, pengukuran dilakukan pada titik di area cacat lokasi 1, ditandai dengan warna biru, juga dengan jumlah titik pengukuran delapan. Pengukuran kemudian dilakukan pada titik di area cacat lokasi 2, ditandai dengan warna kuning, dengan jumlah titik pengukuran delapan juga. Setelah semua data terkumpul, proses dilanjutkan dengan pengolahan data untuk mendapatkan hasil akhir yang akurat dan dapat dipercaya. Lokasi dan jumlah titik pengukuran serta lokasi cacat dalam sampel uji diilustrasikan pada Gambar 8.

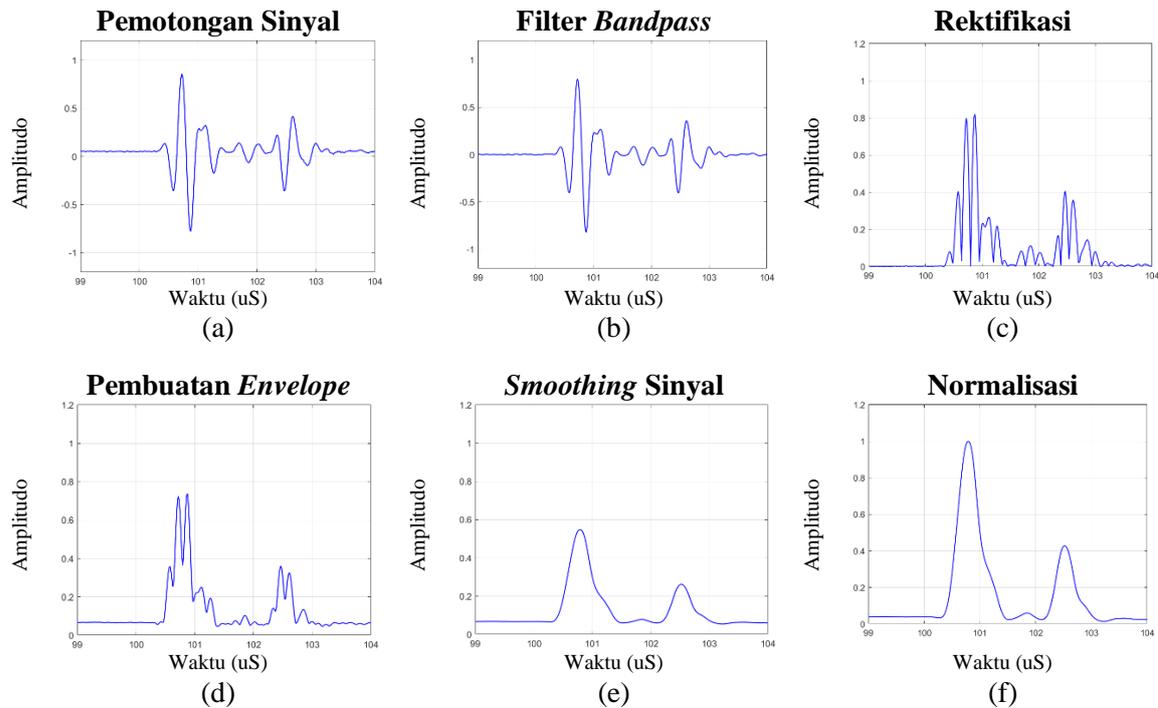


Gambar 8. Lokasi titik pengukuran di sampel uji (tampak atas)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengolahan Sinyal Ultrasonik Dalam Bentuk *Envelope*

Gambar 9 menampilkan hasil pengolahan sinyal secara bertahap dari sinyal mentah hasil pengukuran gelombang ultrasonik menjadi sinyal ultrasonik *envelope*. Proses pengolahan sinyal ultrasonik meliputi beberapa tahap, yaitu pemotongan sinyal, filterisasi, rektifikasi, pembuatan *envelope*, *smoothing envelope*, dan normalisasi. Dari grafik-grafik tersebut, terlihat beberapa perubahan signifikan, seperti sinyal yang menjadi lebih halus dan lebih terfokus pada FWE, BWE, dan *echo* cacat pada sampel uji. Pada tahap berikutnya, hasil dari teknik pengolahan sinyal ini akan diterapkan dalam proses klasifikasi sinyal hasil pengukuran dan deteksi cacat.



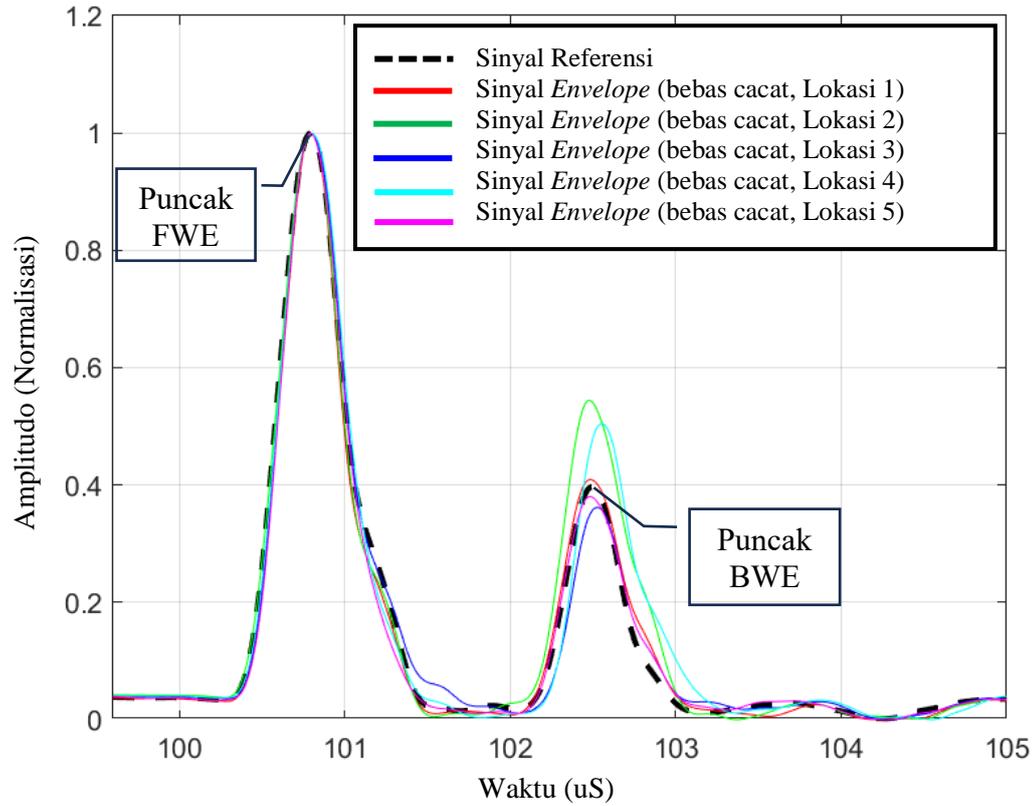
Gambar 9. Hasil pengolahan sinyal pada tiap tahap: (a) Pemotongan sinyal, (b) Filter, (c) Rekrifikasi, (d) Pembuatan *envelope*, (e) *Smoothing* sinyal, dan (f) Normalisasi.

Deteksi Cacat berdasarkan sinyal ultrasonik *envelope*

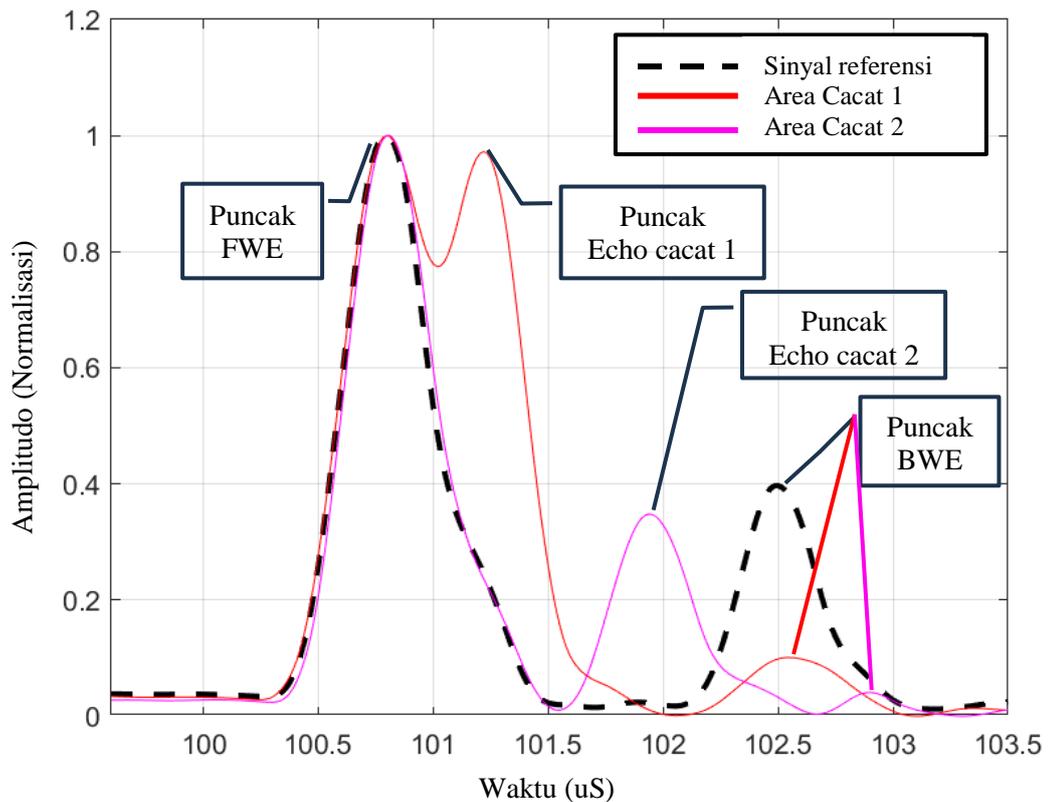
Deteksi cacat menggunakan koefisien korelasi Pearson memerlukan sinyal referensi sebagai pembanding untuk hasil pengukuran pada titik-titik sampel uji. Sinyal referensi ini harus memiliki pola kesamaan untuk setiap titik pengukuran di area bebas cacat. Gambar 10 mengilustrasikan perbandingan pola sinyal referensi yang sudah dibuat berdasarkan sinyal ultrasonik *envelope* hasil pengukuran di lima titik yang merupakan area bebas cacat.

Pada Gambar 10, garis putus-putus hitam menunjukkan sinyal referensi, sedangkan garis solid dengan berbagai warna mewakili sinyal ultrasonik *envelope* di lima lokasi bebas cacat yang berbeda dari lokasi pembuatan sinyal referensi. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa sinyal referensi hampir identik dengan sinyal ultrasonik *envelope* di area bebas cacat. Keenam sinyal tersebut memiliki puncak FWE pada waktu yang sama, yaitu saat $t = 100.797 \mu\text{s}$ dan puncak BWE pada saat $t = 102.531 \mu\text{s}$. Jika nantinya pola sinyal ultrasonik *envelope* hasil pengukuran menunjukkan kemunculan *echo* baru yang mengubah kemiripan pola sinyal, dapat disimpulkan bahwa area tersebut kemungkinan mengandung cacat.

Gambar 11 menunjukkan perbedaan respon sinyal ultrasonik *envelope* dari hasil pengukuran saat perambatannya tidak melewati cacat dan saat melewati cacat di dua lokasi dengan kedalaman berbeda. Garis putus-putus berwarna hitam mewakili sinyal referensi atau karakteristik sinyal yang tidak melewati cacat. Garis berwarna merah mewakili sinyal ultrasonik yang melewati cacat pada posisi 1, sedangkan garis berwarna magenta mewakili sinyal ultrasonik yang melewati cacat pada posisi 2. Garis berwarna merah dan magenta menunjukkan adanya puncak *echo* baru yang mengindikasikan adanya cacat (*echo* cacat). Puncak *echo* untuk lokasi cacat 1 terjadi pada $t = 101,219 \mu\text{s}$, sedangkan untuk lokasi cacat 2 terjadi pada $t = 101,953 \mu\text{s}$. *Echo* cacat dari lokasi 1 muncul lebih awal daripada lokasi 2 karena cacat 1 lebih dekat ke permukaan daripada cacat 2. Kehadiran sisipan cacat buatan pada kedua lokasi 1 dan 2 menyebabkan kemunculan BWE yang tertunda karena ketebalan sampel uji yang bertambah.



Gambar 10. Perbandingan pola sinyal referensi dengan sinyal hasil pengukuran di area bebas cacat.



Gambar 11. Perbandingan bentuk sinyal referensi dengan sinyal ultrasonik hasil pengukuran di area cacat 1 dan area cacat 2.

Klasifikasi sinyal ultrasonik

Tabel 1 berisi data hasil perhitungan koefisien korelasi Pearson yang dapat digunakan untuk mengklasifikasikan sinyal cacat dan non-cacat. Koefisien ini memberikan ukuran statistik dari hubungan linier antara sinyal ultrasonik *envelope* hasil pengukuran dengan sinyal referensi, memungkinkan identifikasi daerah cacat dan non-cacat pada material komposit. Tabel tersebut mencakup 8 titik pengukuran yang berbeda, namun masih dalam satu area. Terdapat 3 area yang difokuskan dalam pengujian, yaitu area bebas cacat, area cacat 1, dan area cacat 2.

Tabel 1. Koefisien korelasi Pearson untuk titik pengukuran pada Area bebas cacat, area cacat 1, dan area cacat 2.

Titik Pengukuran	Koefisien korelasi Pearson		
	Area bebas cacat	Area cacat 1	Area cacat 2
1	1.00	0.00	0.31
2	0.98	0.12	0.28
3	0.97	0.15	0.00
4	0.97	0.15	0.36
5	0.99	0.14	0.21
6	0.98	0.22	0.12
7	1.00	0.18	0.19
8	1.00	0.12	0.21

Berdasarkan Tabel 1, koefisien korelasi Pearson di area bebas cacat memiliki nilai yang mendekati 1, yaitu antara 0,97 hingga 1,00. Hal ini menunjukkan bahwa hasil pengukuran di area bebas cacat memiliki korelasi yang kuat dengan sinyal referensi. Di area cacat 1, koefisien korelasi Pearson berada dalam rentang 0,00 hingga 0,22, menunjukkan adanya hubungan yang lemah antara sinyal hasil pengukuran dengan sinyal referensi. Demikian pula, di area cacat 2, koefisien korelasi Pearson berada dalam rentang 0,00 hingga 0,36, disebabkan oleh perubahan pola sinyal yang terjadi akibat adanya cacat di dalam material.

Hasil pengujian pada sampel uji CFRP menunjukkan bahwa metode pengukuran koefisien korelasi Pearson dapat digunakan untuk mengidentifikasi cacat. Data hasil perhitungan koefisien korelasi Pearson dari delapan titik pengukuran di tiga area menunjukkan adanya perubahan koefisien korelasi Pearson. Nilai koefisien korelasi tersebut dapat dijadikan sebagai acuan untuk mengklasifikasikan pola sinyal ultrasonik yang melewati area bebas cacat dan area dengan cacat sehingga dapat langsung digunakan untuk mengidentifikasi adanya cacat. Sebagai perbandingan, dalam penelitian yang dilakukan oleh Raiminor Ramzi,dkk. menyajikan hasil pengukuran dalam bentuk grafik A-scan yang menampilkan amplitudo sinyal *echo* ultrasonik terhadap waktu pengukuran[19]. Grafik A-scan masih memerlukan interpretasi manual sehingga masih membutuhkan keahlian lebih lanjut dari teknisi yang melakukan pengujian.

Metode korelasi Pearson hanya dapat mengetahui adanya cacat tanpa bisa mengetahui kedalaman cacat. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 1 yang menunjukkan tidak adanya perubahan nilai yang signifikan di area pengukuran dengan cacat 1 dan 2. Oleh karena itu, metode ini disarankan hanya untuk pengujian NDT ultrasonik dengan sampel uji yang tipis karena tidak memerlukan lokasi kedalaman cacat.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa metode ultrasonik dan koefisien korelasi Pearson efektif dalam mendeteksi cacat pada material CFRP. Sinyal ultrasonik *envelope* hasil pengukuran memiliki korelasi yang kuat dengan sinyal referensi di area bebas cacat, namun menunjukkan korelasi yang lemah di area yang mengandung cacat. Hal ini menunjukkan bahwa metode ini mampu mengidentifikasi adanya cacat dengan akurasi yang baik. Namun, meskipun metode ini efektif dalam mendeteksi keberadaan cacat, metode ini belum mampu menentukan posisi kedalaman cacat secara tepat. Nilai koefisien korelasi antara area cacat 1 dan cacat 2 tidak menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan. Oleh karena itu, penggunaan metode ini cocok untuk uji tidak merusak (NDT) pada material yang tipis yang hanya perlu mengetahui keberadaan cacat tanpa harus mengetahui lokasi kedalamannya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Institut Teknologi Bandung (ITB) atas bantuan berupa alat dalam penelitian ini. Terima kasih kepada Lembaga Pengelolaan Dana Pendidikan Republik Indonesia (LPDP RI) atas bantuan berupa dana riset pada penelitian ini.

REFERENSI

- [1] S. Hegde, B. Satish Shenoy, and K. N. Chethan, "Review on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and their mechanical performance," *Mater Today Proc*, vol. 19, pp. 658–662, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.749.
- [2] D. K. Rajak, P. H. Wagh, and E. Linul, "Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A Review," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 21, p. 3721, Oct. 2021, doi: 10.3390/polym13213721.
- [3] R. Bintarto, Moch. Syamsul Ma'arif, F. Gayuh Utami Dewi, S. Sugiarto, N. Hamidi, and P. Heryana, "Pengaruh Daya Pemanasan Microwave Oven Terhadap Kekuatan Tarik Komposit Serat Daun Nanas Bermatrik Epoxy," *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, vol. 6, no. 2, pp. 182–193, Dec. 2021, doi: 10.20527/sjmekinematika.v6i2.207.
- [4] A. Zarei, S. Farahani, and S. Pilla, "An experimental study on the manufacturing of engineered defects in composite plates," *Composites Part C: Open Access*, vol. 9, p. 100327, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jcomc.2022.100327.
- [5] J. Chen, Z. Yu, and H. Jin, "Nondestructive testing and evaluation techniques of defects in fiber-reinforced polymer composites: A review," *Front Mater*, vol. 9, Oct. 2022, doi: 10.3389/fmats.2022.986645.
- [6] B. Wang, P. He, Y. Kang, J. Jia, X. Liu, and N. Li, "Ultrasonic Testing of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites," *J Sens*, vol. 2022, pp. 1–20, Jun. 2022, doi: 10.1155/2022/5462237.
- [7] J. Jodhani, A. Handa, A. Gautam, Ashwni, and R. Rana, "Ultrasonic non-destructive evaluation of composites: A review," *Mater Today Proc*, vol. 78, pp. 627–632, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2022.12.055.
- [8] M. Ma *et al.*, "High Precision Detection Method for Delamination Defects in Carbon Fiber Composite Laminates Based on Ultrasonic Technique and Signal Correlation Algorithm," *Materials*, vol. 13, no. 17, p. 3840, Aug. 2020, doi: 10.3390/ma13173840.
- [9] W. Zeng *et al.*, "Research on a laser ultrasonic visualization detection method for human skin tumors based on pearson correlation coefficient," *Opt Laser Technol*, vol. 141, p. 107117, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.optlastec.2021.107117.

- [10] Y. Chang, D. Yang, and Y. Guo, “Laser ultrasonic damage detection in coating-substrate structure via Pearson correlation coefficient,” *Surf Coat Technol*, vol. 353, pp. 339–345, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.09.005.
- [11] D. Mulyadi, B. Sofiyanti, A. Adhi Nugroho, P. Studi Teknik Mesin, and U. Buana Perjuangan Karawang, “Optimasi Parameter Mesin Ultrasonic Welding Untuk Penyambungan Material Termoplastik,” *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, vol. 9, no. 1, pp. 55–65, 2024, doi: 10.20527/sjmeKinematika.v9i1.296.
- [12] V. Yudha, Ferriawan Yudhanto, and Joko Waluyo, “Analisa Sifat Fisis dan Mekanis Komposit Hibrid Serat Jute/Karbon yang Dibuat dengan Metode Vacuum Infusion sebagai Alternatif Bahan Helm,” *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, vol. 8, no. 1, pp. 25–35, Jun. 2023, doi: 10.20527/sjmeKinematika.v8i1.248.
- [13] M. E. Ibrahim, “Ultrasonic inspection of hybrid polymer matrix composites,” *Compos Sci Technol*, vol. 208, p. 108755, May 2021, doi: 10.1016/j.compscitech.2021.108755.
- [14] I. Papa, V. Lopresto, and A. Langella, “Ultrasonic inspection of composites materials: Application to detect impact damage,” *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 4, no. 1, pp. 37–42, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.ijlmm.2020.04.002.
- [15] L. Jonveaux, “un0rick: open-source fpga board for single element ultrasound imaging,” 2019. doi: 10.5281/zenodo.3364559.
- [16] A. P. Hariyanto, N. T. Budiarti, Suprijanto, K. H. Ng, F. Haryanto, and Endarko, “Evaluation of physical properties and image of polyvinyl chloride as breast tissue equivalence for dual-modality (mammography and ultrasound),” *Phys Eng Sci Med*, vol. 46, no. 3, pp. 1175–1185, Sep. 2023, doi: 10.1007/s13246-023-01283-y.
- [17] H. Susanti, H. Mukhtar, S. Suprijanto, and W. A. Cahyadi, “Initial Study of A-mode Ultrasound Spectroscopy Through Mechanical Wave Scattering Phenomenon for Measuring 3D-printed Bone Model Density,” *International Journal of Mechanics*, vol. 17, pp. 74–79, Aug. 2023, doi: 10.46300/9104.2023.17.11.
- [18] L. Huang, J. Li, and B. Li, “Experimental research on ultrasonic A-scan testing technology of composite solid propellant,” *J Phys Conf Ser*, vol. 2338, no. 1, p. 012011, Sep. 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2338/1/012011.
- [19] A. R. Ramzi, M. F. Mahmud, and A. B. Elmi, “Immersion ultrasonic inspection system for small scaled composite specimen,” *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 10, no. 22, Dec. 2015.