

Contents list available at [Sinta](https://sinta)

ARMATUR

: Artikel Teknik Mesin & Manufaktur

Journal homepage: <https://scholar.ummetro.ac.id/index.php/armatur>

Development of Radar Absorbing coating Using Polyurethane FR 2/55 with Barium Hexaferrite ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$), Neodymium (NdFeB), and Graphite (C)

Selly Septianissa^{1*}, Pawawoi²¹Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Widyatama, Jl. Cikutra 204A Kota Bandung, Indonesia²Jurusan Teknik Metalurgi, Fakultas Teknologi Manufaktur, Univeristas Jenderal Achmad Yani, Jl. Gatot Subroto Bandung, Indonesia

ARTICLE INFO

Keywords:

Radar Absorbing coating
Polyurethane FR 2/55
Barium heksaferit
Neodymium
Grafrit

ABSTRACT

The main objective of this study is to develop a Radar Absorbing coating (RAC) consisting of a base coat matrix, magnetic, and dielectric materials. The base coat used is FR 2/55 polyurethane topcoat, typically applied as a top layer in Eurocopter's Super Puma helicopter. Barium hexaferrite ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) and neodymium (NdFeB) serve as magnetic materials, while graphite (C) is used as a dielectric material. In this study, three different material compositions were tested: 50%wt $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ + 50%wt graphite, 50%wt NdFeB + 50%wt graphite, and 100%wt graphite, with a 30%wt filler addition to the base coat. Reflection loss measurements revealed optimal results for 50%wt $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ + 50%wt graphite, achieving a maximum reflection loss of -2.88 dB at 12.00 GHz, and for 50%wt NdFeB + 50%wt graphite with a maximum reflection loss of -2.93 dB at 12.00 GHz. As a comparison, measurements of 50%wt $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ + 50%wt graphite in four layers showed an increased reflection loss of -4.78 dB at 10.54 GHz. Although the results are far below the minimum absorption standard of 25 dB (50%), this coating can still be used as a RAC with a thicker layer.

Pendahuluan

Radar Absorbing coating (RAC) atau pelapis penyerapan radar merupakan bahan yang dirancang untuk mengurangi atau menyerap gelombang elektromagnetik

yang dipancarkan oleh radar [1], [2], sehingga mengurangi visibilitas objek yang dilapisi di detektor radar. RAC sangat penting dalam berbagai aplikasi militer, terutama pada kendaraan udara dan darat

*Corresponding author: selly.septianissa@widyatama.ac.id

DOI: <https://10.24127/armatur.v6i1.7998>

Received 4 January 2025; Received in revised form 17 January 2023; Accepted 18 March 2023

Available online 19 March 2025

yang membutuhkan teknologi stealth untuk menghindari deteksi musuh [3], [4], [5]. Seiring dengan perkembangan teknologi radar yang semakin canggih, kebutuhan akan bahan pelapis yang dapat menyerap gelombang radar dengan efisien terus meningkat [6], [7].

Salah satu bahan yang banyak digunakan sebagai matriks dalam RAC adalah cat berbasis polyurethane [8]. *Polyurethane FR 2/55 top coat*, khususnya, dikenal memiliki ketahanan yang baik terhadap faktor lingkungan dan dapat diaplikasikan dengan mudah pada berbagai permukaan [9]. Cat jenis ini telah digunakan pada *top coat* helikopter Eurocopter Super Puma, menjadikannya bahan yang cocok untuk digunakan dalam penelitian pengembangan RAC [10], [11], [12].

Selain sifat mekanik dan kimia yang baik, kinerja penyerapan radar pada RAC sangat bergantung pada jenis bahan pengisi yang digunakan. Bahan pengisi magnetik seperti barium heksaferit ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) [13] dan neodimium (NdFeB) memiliki kemampuan untuk menyerap gelombang elektromagnetik pada frekuensi tertentu, yang sangat berguna dalam meningkatkan kemampuan radar *absorbing coating* [14], [15]. Di sisi lain, bahan dielektrik seperti grafit (C) juga berperan penting dalam meningkatkan penyerapan gelombang radar melalui interaksi dengan medan elektromagnetik [16], [17].

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan RAC berbasis cat *polyurethane FR 2/55 top coat* dengan variasi penambahan bahan pengisi magnetik dan dielektrik [18]. Variasi bahan yang ditambahkan meliputi kombinasi $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, NdFeB , dan grafit dalam berbagai proporsi. Penggunaan bahan-bahan ini diharapkan dapat menghasilkan RAC dengan kemampuan penyerapan radar yang optimal pada berbagai frekuensi radar [19].

Barium heksaferit ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) adalah bahan magnetik dengan sifat ferromagnetik yang sangat baik, yang membuatnya efektif dalam menyerap gelombang elektromagnetik [20], [21].

Dalam penelitian ini, $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dicampurkan dengan grafit (C) dalam komposisi 50%wt untuk mengevaluasi kinerjanya sebagai bahan pengisi dalam RAC. Selain itu, neodimium (NdFeB) juga digunakan sebagai bahan magnetik alternatif yang memiliki sifat magnetik yang lebih kuat dibandingkan dengan $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ [22], [23].

Selain bahan magnetik, grafit dipilih sebagai bahan dielektrik karena kemampuannya untuk meningkatkan konduktivitas dan daya serap gelombang elektromagnetik [24], [25]. Grafit dapat berfungsi sebagai bahan tambahan yang memperbaiki kinerja penyerapan radar dengan mengurangi pantulan gelombang radar pada permukaan objek yang dilapisi RAC [26], [27].

Penelitian ini menguji tiga variasi bahan pengisi yang berbeda: 50%wt $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ + 50%wt grafit, 50%wt NdFeB + 50%wt grafit, dan 100%wt grafit. Setiap variasi bahan dicampurkan dengan cat *polyurethane FR 2/55* dengan kadar filler 30%wt untuk melihat pengaruh komposisi terhadap kemampuan penyerapan radar. Pengukuran *reflection loss* dilakukan untuk menentukan kemampuan setiap variasi dalam menyerap gelombang radar pada frekuensi tertentu, terutama pada frekuensi 12 GHz yang banyak digunakan dalam aplikasi radar.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi yang lebih mendalam tentang hubungan antara komposisi bahan pengisi dan kinerja penyerapan radar. Temuan ini juga dapat digunakan sebagai dasar untuk pengembangan lebih lanjut dari material RAC dengan penyerapan radar yang lebih tinggi, yang dapat digunakan pada aplikasi stealth di industri militer dan penerbangan..

Metode Penelitian

Metode penelitian ini dimulai dengan persiapan bahan dasar aluminium 2024 T3, yang diperoleh dari sisa proses dan memiliki ukuran 120x60x1 mm. Sebanyak enam buah sampel digunakan untuk

pengujian daya lekat dengan metode *cross-head adhesion* test. Setelah pengujian daya lekat, material digunakan untuk pengujian partikel terdispersi melalui metalografi. Proses pelapisan dilakukan dengan menggunakan *Alodine 1200S* sebagai lapisan konversi pada permukaan aluminium untuk meningkatkan daya adhesi sebelum pengecatan. Pengecatan dilakukan menggunakan cat epoxy primer dan polyurethane FR 2/55 topcoat yang diadaptasi dari *Process Inspection Card* (PIC).

Pengujian pengukuran ketebalan lapisan cat dilakukan menggunakan alat Elcometer untuk mengetahui ketebalan lapisan cat epoxy primer dan topcoat penyerap radar pada spesimen. Selanjutnya, pengujian metalografi dilakukan untuk menganalisis distribusi partikel magnetik dan dielektrik dalam lapisan cat. Pengujian *reflection loss* dilakukan menggunakan alat *Vector Network Analyzer* (VNA) pada

panjang gelombang X-Band (8-12 GHz), untuk mengukur seberapa besar gelombang elektromagnetik dapat diserap oleh material. Pengujian dilakukan dengan mempersiapkan dan mengkalibrasi adaptor serta mengukur spesimen dengan posisi S11 dan S21[28].

Pengujian daya lekat (*adhesion* test) dilakukan dengan metode *cross cut adhesion* yang mencakup *dry adhesion* dan *wet adhesion* sesuai dengan standar ISO 2409. Sampel yang telah dicat dibiarkan selama 7 hari pada suhu kamar untuk *dry adhesion* dan direndam dalam air demineral selama 14 hari untuk *wet adhesion*. Pengujian dilakukan dengan teknik *cross-head* untuk menentukan ketahanan lapisan cat terhadap pemisahan dari material dasar, dan hasil evaluasi dilihat menggunakan kaca pembesar untuk menentukan kategori daya lekat berdasarkan klasifikasi standar yang berlaku.

Tabel 1. Matriks penelitian pembuatan cat penyerap radar (*top coat*)

No.	Jenis Cat	Volume Cat (ml)	Volume Base (ml)	Volume Hardener (ml)	Volume Thinner (ml)	Viskositas (Second) Temp : 23°C	Time Mix Base Hardener (Menit)	Time Mix Thinner (Menit)	Cure Time Mix (Menit)
1.	FR 2/55 Topcoat	150	107	21,5	21,5	40 ± 5 Afnor Cup No.4	2-5	2-5	15
2.	FR 2/55 Topcoat	150	107	21,5	21,5	40 ± 5 Afnor Cup No.4	2-5	2-5	15
3.	FR 2/55 Topcoat	150	107	21,5	21,5	40 ± 5 Afnor Cup No.4	2-5	2-5	15

Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini tujuan penggunaan cat ini adalah untuk pesawat terbang jenis Eurocopter atau helikopter Superpuma, dengan variasi jenis partikel penyerap radar yang ditambahkan. Aluminium 2024 T3 *cladding* digunakan sebagai substrat, sesuai dengan bagian badan Eurocopter atau helikopter Superpuma. Untuk pengujian *reflection loss* radar, digunakan cetakan aluminium 2023 T3 dengan release film. Penggunaan *release film* bertujuan mempermudah proses pelepasan lapisan cat serta mencegah

terkontaminasinya cat, yang dapat memengaruhi hasil pengukuran *reflection loss*.

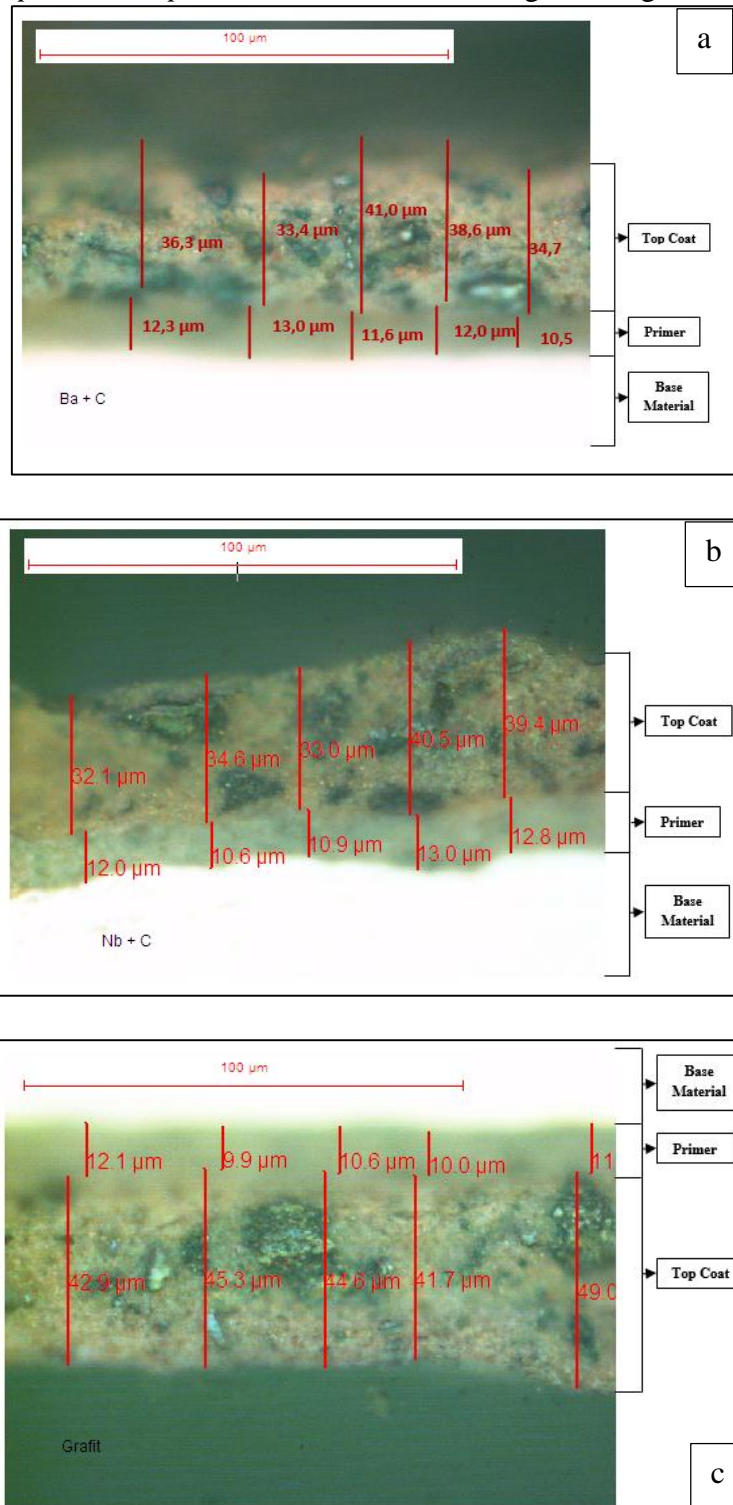
Cat epoxy primer code P05 dan cat polyurethane FR 2/55 top coat yang digunakan sebagai basis cat penyerap radar.

Pengujian Ketebalan Lapisan Cat (*Thickness*)

Hasil pengujian ketebalan lapisan cat (*thickness*) dengan menggunakan alat elcometer memperlihatkan bahwa ketebalan lapisan cat rata-rata sesuai dengan standar *process inspection card* (PIC), tetapi pada pengujian ketebalan lapisan cat dengan

metode metalografi seperti yang terlihat pada gambar 1 terjadi penyimpangan dimana ketebalan lapisan cat rata-rata lebih kecil dari standar *process inspection card*

(PIC). Hal ini disebabkan karena pengamatan hanya dilakukan pada satu titik tertentu yang lebih terlihat jelas dibandingkan dengan titik yang lain.



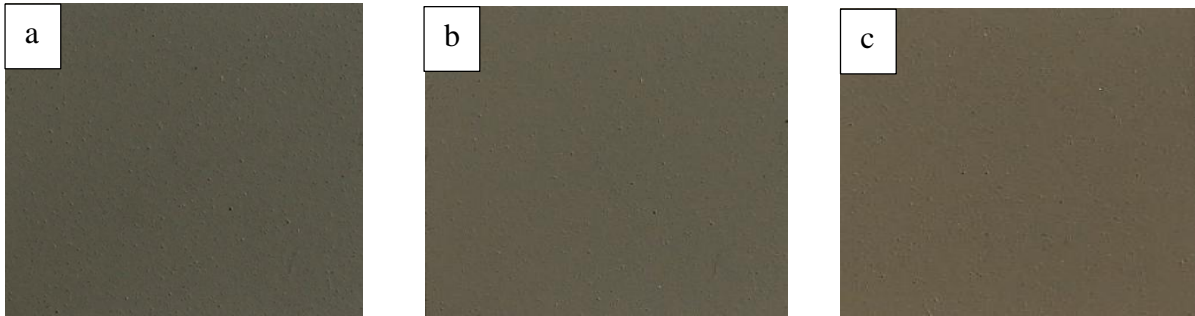
Gambar 1. Ketebalan lapisan cat (thickness) FR 2/55 : (a) *top coat* + barium heksaferit + grafit, (b) *top coat* + neodybium + grafit, (c) *top coat* + grafit

Pemeriksaan Partikel Terdispersi

Pemeriksaan partikel terdispersi dilakukan dengan dua cara. Pemeriksaan

pertama dilakukan secara visual menggunakan foto makro yang ditunjukkan pada gambar 2. Permukaan lapisan cat terlihat bertekstur kasar secara merata, menandakan bahwa partikel yang ditambahkan terdispersi dengan baik dalam

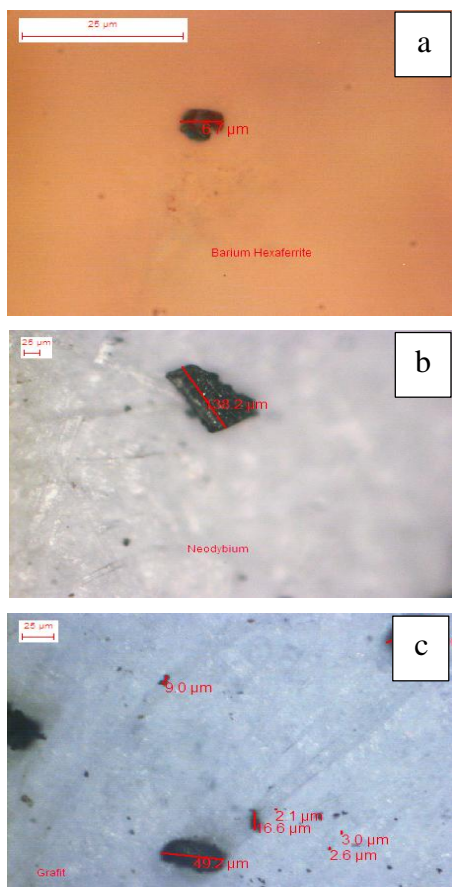
cat. Perbedaan warna cat terlihat jelas, dimana cat yang mengandung partikel magnetik dan dielektrik memiliki warna yang lebih tua dibandingkan dengan cat yang hanya mengandung partikel dielektrik.



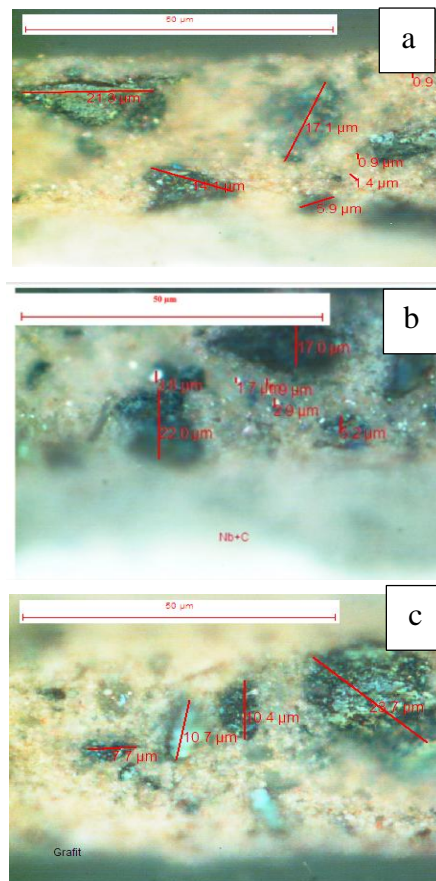
Gambar 2. Foto makro FR 2/55 : (a) top coat + barium heksaferit + grafit, (b) top coat + neodybium + grafit (c) top coat + grafit

Pemeriksaan ukuran partikel sebelum ditambahkan pada cat dapat dilihat pada gambar 3. Gambar tersebut menunjukkan bahwa ukuran partikel grafit lebih kecil dibandingkan dengan partikel barium heksaferit dan neodymium.

Pemeriksaan lebih lanjut pada gambar 4. menunjukkan bahwa setelah diterapkan pada cat, ukuran partikel-partikel tersebut menjadi lebih besar. Hal ini disebabkan oleh sifat koagulan grafit yang cenderung menggumpal bersama barium heksaferit dan neodymium.



Gambar 3. Ukuran partikel dengan metalografi : (a) barium heksaferit, (b) neodybium (c) grafit



Gambar 4. Partikel terdispersi FR 2/55 : (a) *top coat* + barium heksaferit + grafit, (b) *top coat* + neodimium + grafit, (c) *top coat* + grafit

Pendispersian yang merata ini menunjukkan bahwa tidak ada reaksi kimia antara partikel dengan basis cat *polyurethane FR 2/55 top coat*.

Pengujian Reflection loss Radar (Vector Network Analyzer)

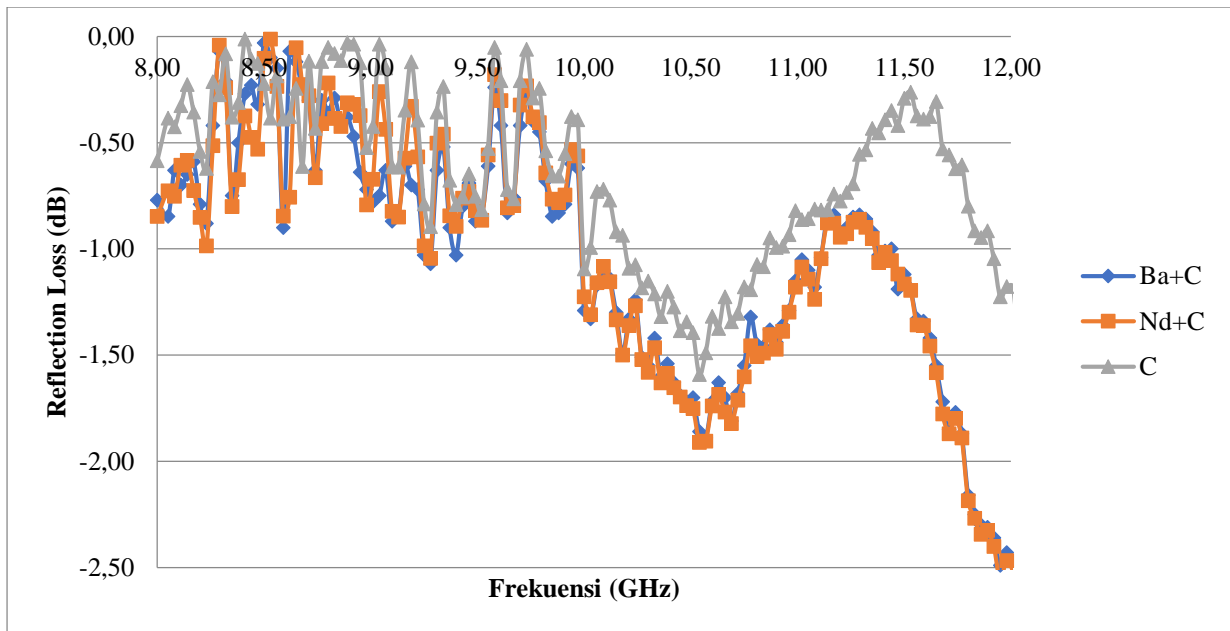
Pengujian *reflection loss* radar adalah salah satu tahapan yang paling penting dalam penelitian ini untuk mengukur seberapa besar cat menyerap gelombang radar. Pengujian dilakukan menggunakan alat *Vector Network Analyzer* (VNA) pada frekuensi X-Band (8-12 GHz), sesuai dengan spesifikasi radar udara yang digunakan pada pesawat seperti Fokker-28, Boeing 737-200, C-130 Hercules, dan helikopter Superpuma.

Hasil pengujian *reflection loss* pada berbagai spesimen dapat dilihat pada Gambar 5 dan 6. Spesimen pertama, yaitu cat *polyurethane FR 2/55 top coat* + barium heksaferit + grafit, menunjukkan rata-rata *reflection loss* sebesar -1,04 dB, dengan nilai maksimum -2,88 dB pada 12 GHz dan minimum -0,07 dB pada 8,29 GHz. Spesimen kedua, cat *polyurethane FR 2/55 top coat* + neodimium + grafit, menunjukkan hasil yang hampir serupa dengan spesimen pertama, dengan rata-rata

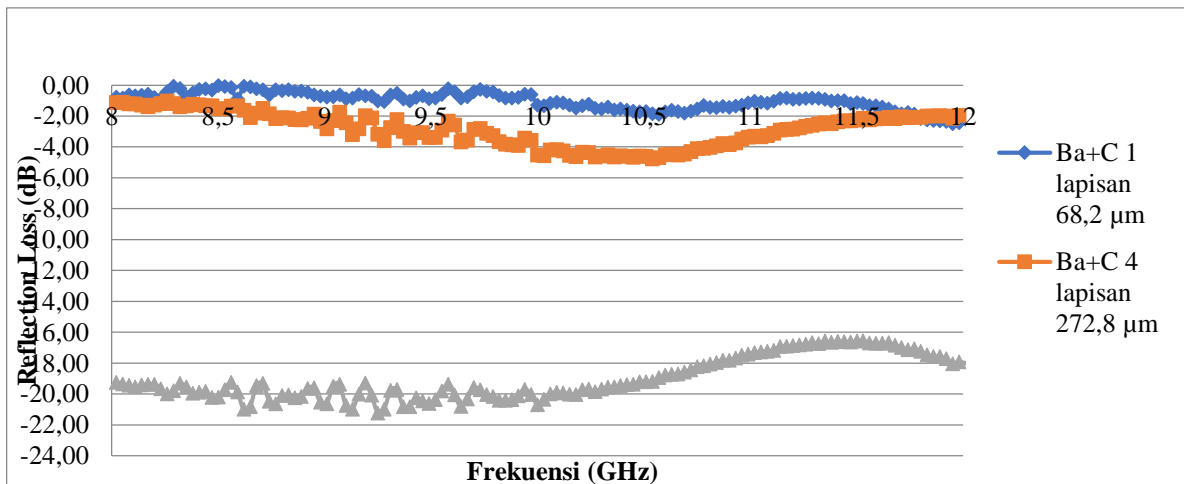
reflection loss sebesar -1,05 dB, maksimum -2,93 dB pada 12 GHz, dan minimum -0,01 dB pada 8,41 GHz. Spesimen ketiga, cat *polyurethane FR 2/55 top coat* + grafit, menunjukkan nilai *reflection loss* yang lebih rendah, dengan rata-rata -0,74 dB, maksimum -1,50 dB pada 12 GHz, dan minimum -0,01 dB pada 8,41 GHz. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan partikel magnetik seperti barium heksaferit atau neodimium dapat meningkatkan efektivitas cat sebagai penyerap radar.

Ketebalan lapisan cat pada pengujian ini adalah 66,2 μm , yang lebih tipis dibandingkan standar nilai penyerap radar yang optimal (lebih dari 25 dB). Oleh karena itu, pengujian tambahan dilakukan dengan lapisan cat yang lebih tebal.

Pada Spesimen pertama dengan 4 lapis cat, ketebalan total lapisan mencapai 264,8 μm , yang menunjukkan peningkatan nilai *reflection loss*. Hasilnya menunjukkan rata-rata *reflection loss* sebesar -2,84 dB, maksimum -4,78 dB pada 10,54 GHz, dan minimum -1,03 dB pada 8,26 GHz. Peningkatan nilai *reflection loss* ini membuktikan bahwa semakin tebal lapisan cat radar absorbing, semakin besar pula penyerapan radar yang tercapai.



Gambar 5. Grafik pengujian *reflection loss* cat penyerap radar ketebalan 1 lapis



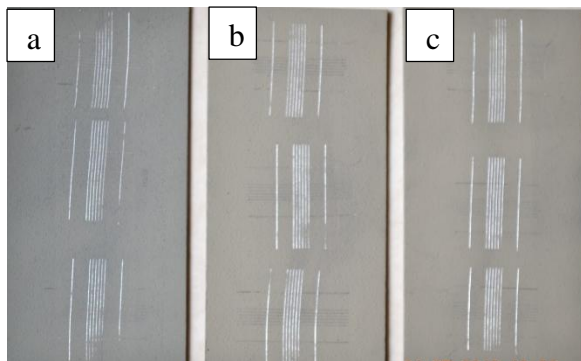
Gambar 6. Grafik perbandingan *reflection loss* FR 2/55 *top coat* + Barium Heksaferit + grafit dengan standar eccosorb foam 10 GHz

Meskipun peningkatan nilai *reflection loss* terlihat jelas, nilai ini masih kurang dari 25 dB, yang menunjukkan bahwa lapisan cat pada penelitian ini belum mencapai tingkat optimal untuk penyerap radar.

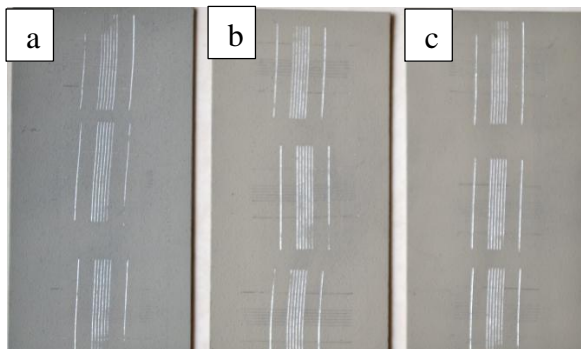
Pengujian Daya Lekat Cat (*Adhesion Test*)

Pengujian daya lekat cat dilakukan dengan metode *cross cut adhesion* sesuai standar ISO 2409. Hasil pengujian *dry adhesion* dan *wet adhesion* dapat dilihat pada gambar 7 dan 8. Pengujian menunjukkan bahwa daya lekat cat tetap

memenuhi standar ISO 2409 klasifikasi ISO 0 dan ASTM 5 B, di mana tidak ada kotak kisi yang terlepas dan tepi pemotongan sangat halus. Ini menunjukkan bahwa penambahan partikel barium heksaferit, neodmium, dan grafit tidak memengaruhi daya lekat cat secara signifikan.



Gambar 7. Hasil pengujian *dry adhesion* : (a) *top coat* + barium heksaferit + grafit, (b) *top coat* + neodybium + grafit, (c) *top coat* + grafit



Gambar 8. Hasil pengujian *wet adhesion* : (a) *top coat* + barium heksaferit + grafit, (b) *top coat* + neodybium + grafit, (c) *top coat* + grafit

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan dengan Variasi Penambahan Barium Heksaferit ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$), Neodymium (NdFeB), dan Grafit (C), dapat disimpulkan bahwa cat *polyurethane FR 2/55 top coat* dengan penambahan partikel magnetik barium heksaferit, neodymium, dan partikel dielektrik grafit memiliki potensi untuk digunakan sebagai *Radar Absorbing coating* (RAC). Pengujian ketebalan lapisan cat menunjukkan ketebalan rata-rata $66,2 \mu\text{m}$ berdasarkan Elcometer, sementara pengujian dengan metode metalografi menunjukkan ketebalan $51,23 \mu\text{m}$. Hasil pengujian partikel terdispersi menunjukkan bahwa partikel grafit cenderung menggumpal bersama partikel barium heksaferit dan neodymium. Pengujian *reflection loss* radar menggunakan alat *Vector Network Analyzer* (VNA) pada spesimen dengan ketebalan 1 lapis menunjukkan bahwa nilai *reflection loss* radar belum mencapai nilai penyerapan

optimal, yaitu -50 dB (50%). Namun, pada spesimen dengan lapisan 4 lapis ($272,8 \mu\text{m}$), nilai *reflection loss* radar meningkat dengan nilai maksimum sebesar $-4,78 \text{ dB}$ pada frekuensi $10,54 \text{ GHz}$. Selain itu, daya lekat (*adhesion*) semua spesimen memenuhi standar ISO 2409 klasifikasi ISO 0, yang menunjukkan daya lekat yang baik pada permukaan substrat.

Ucapan terimakasih (jika diperlukan)

Dengan ini, saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Universitas Widyatama atas segala dukungan, fasilitas, dan kesempatan yang telah diberikan selama penelitian ini berlangsung. Terima kasih juga kepada seluruh pihak yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta motivasi, yang sangat membantu saya dalam menyelesaikan tugas ini. Semoga kerja sama dan hubungan yang baik ini terus terjalin, demi kemajuan bersama dalam dunia pendidikan dan penelitian.

Referensi (tipe indentasi *hanging 1 cm*)

- [1] M.-Y. Li, S. Gupta, C. Chang, and N.-H. Tai, "Layered hybrid composites using multi-walled carbon nanotube film as reflection layer and multi-walled carbon nanotubes/neodymium magnet/ epoxy as absorption layer perform selective electromagnetic interference shielding," *Compos B Eng*, vol. 161, pp. 617–626, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.12.130.
- [2] J. Liu *et al.*, "Fast self-healing and antifouling polyurethane/fluorinated polysiloxane-microcapsules-silica composite material," *Adv Compos Hybrid Mater*, vol. 5, no. 3, pp. 1899–1909, Sep. 2022, doi: 10.1007/s42114-022-00515-1.
- [3] S. Septianissa and A. Z. Chandrasari, "Corrosion Rate of ASTM A53 Steel in Seawater Influenced by Variation in Concentration of Mangifera Indica L. Peel Extract," *Journal of Applied*

- Engineering and Technological Science (JAETS)*, vol. 6, no. 1, pp. 550–560, Dec. 2024, doi: 10.37385/jaets.v6i1.5182.
- [4] S. Septianissa and A. Z. Chandrasari, “Behavior of Bare, Cr₃C₂-20NiCr, and NiCrAlY coated Fe-Ni Based Superalloy Under Hot Corrosion in a 75 wt.% Na₂SO₄ + 25wt.% NaCl film at 9000C,” *International Journal of Science and Society*, vol. 6, no. 2, pp. 507–517, May 2024, doi: 10.54783/ijssoc.v6i2.1170.
- [5] A. G. Díez, C. R. Tubio, J. G. Etxebarria, and S. Lanceros-Mendez, “Magnetorheological Elastomer-Based Materials and Devices: State of the Art and Future Perspectives,” *Adv Eng Mater*, vol. 23, no. 6, Jun. 2021, doi: 10.1002/adem.202100240.
- [6] A. Bollero and E. M. Palmero, “Recent advances in hard - ferrite magnets,” in *Modern Permanent Magnets*, Elsevier, 2022, pp. 65–112. doi: 10.1016/B978-0-323-88658-1.00013-3.
- [7] S. Nayak and T. K. Rout, “Polymer/Polymer Composite Coatings for the Corrosion Protection of Steel Substrates,” 2022, pp. 611–626. doi: 10.1007/978-981-16-9302-1_31.
- [8] S. Pan, M. Zhou, L. Liu, and H. Shen, “Electromagnetic based flexible bioelectronics and its applications,” *Frontiers in Electronics*, vol. 5, Apr. 2024, doi: 10.3389/felec.2024.1240603.
- [9] Z. Cui *et al.*, “Thermoplastic polyurethane/titania/polydopamine (TPU/TiO₂/PDA) 3-D porous composite foam with outstanding oil/water separation performance and photocatalytic dye degradation,” *Adv Compos Hybrid Mater*, vol. 5, no. 4, pp. 2801–2816, Dec. 2022, doi: 10.1007/s42114-022-00503-5.
- [10] J. Lauzuardy *et al.*, “MICROSTRUCTURE CHARACTERISTICS OF Cr₃C₂-NiCr COATINGS DEPOSITED WITH THE HIGH-VELOCITY OXY-FUEL THERMAL-SPRAY TECHNIQUE,” *Materiali in tehnologije*, vol. 58, no. 2, Apr. 2024, doi: 10.17222/mit.2023.869.
- [11] S. Septianissa, F. Rohendi, M. Walidi, and Martoni, “Analysis of the Impact of Cooling Medium Temperature on Heat Treatment Properties of AISI 1040 Steel,” 2024, pp. 17–26. doi: 10.2991/978-94-6463-618-5_3.
- [12] B. Mordina, D. K. Setua, and E. P. Namburi, “Polymer Materials for Defence & Aerospace Applications,” 2024, pp. 1–35. doi: 10.1007/978-981-99-9791-6_1.
- [13] A. E. Muslimov, M. K. Gadzhiev, and V. M. Kanevsky, “Synthesis of Superhydrophobic Barium Hexaferrite Coatings with Low Magnetic Hardness,” *Materials*, vol. 15, no. 21, p. 7865, Nov. 2022, doi: 10.3390/ma15217865.
- [14] S. Septianissa, K. W. Widantha, and M. Walidi, “INVESTIGATION OF TEMPERATURES AND HOLDING TIMES ON HIGH-STRENGTH LOW-ALLOY STEEL FOR TANK TRACK LINKS,” *LOGIC: Jurnal Rancang Bangun dan Teknologi*, vol. 24, no. 2, pp. 87–92, Jul. 2024, doi: 10.31940/logic.v24i2.87-92.
- [15] S. Septianissa, B. Prawara, E. A. Basuki, E. Martides, and E. Riyanto, “Improving the hot corrosion resistance of γ/γ' in Fe-Ni superalloy coated with Cr₃C₂-20NiCr and NiCrAlY using HVOF thermal spray coating,” *Int J Electrochem Sci*, vol. 17, no. 12, p. 221231, Dec. 2022, doi: 10.20964/2022.12.27.
- [16] L. Jie *et al.*, “BaFe₁₂O₁₉/graphene/polyaniline coatings for flexible fabrics with enhanced microwave absorption,” *Textile Research Journal*, vol. 94, no. 3–4, pp. 494–507, Feb. 2024, doi: 10.1177/00405175231208227.

- [17] A. Giampiccolo *et al.*, “UV / visible sol gel W–TiO₂ photocatalytic coatings for interior building surfaces,” *Build Environ*, vol. 205, p. 108203, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108203.
- [18] V. Chudinov, I. Shardakov, I. Kondyurina, and A. Kondyurin, “Attachment of Fibrinogen on Ion Beam Treated Polyurethane,” *Biomimetics*, vol. 9, no. 4, p. 234, Apr. 2024, doi: 10.3390/biomimetics9040234.
- [19] B. Amrutha, J. U. Yoon, I. Woo, P. Gajula, A. A. Prabu, and J. W. Bae, “Performance optimization of MoS₂-doped PVDF-HFP nanofiber triboelectric nanogenerator as sensing technology for smart cities,” *Appl Mater Today*, vol. 41, p. 102503, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.apmt.2024.102503.
- [20] Z. Song *et al.*, “Biobased polyurethane coatings with fast self-healing and tunable mechanical properties derived from curcumin and castor oil,” *Prog Org Coat*, vol. 183, p. 107816, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.porgcoat.2023.107816.
- [21] H. Vahabi, E. Movahedifar, M. Jouyandeh, M. R. Saeb, and S. Thomas, “Improved Flame Retardancy in Polyurethanes Using Layered Double Hydroxides,” 2021, pp. 137–160. doi: 10.1021/bk-2021-1400.ch009.
- [22] H. Xu *et al.*, “Room-temperature self-healing, high ductility, recyclable polyurethane elastomer fabricated via asymmetric dynamic hard segments strategy combined with self-cleaning function application,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 454, p. 140101, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.cej.2022.140101.
- [23] W. Guo *et al.*, “Multifunctional Self-Charging Electrochromic Supercapacitors Driven by Direct-Current Triboelectric Nanogenerators,” *Adv Funct Mater*, vol. 31, no. 36, Sep. 2021, doi: 10.1002/adfm.202104348.
- [24] X. Hu, X. Zhang, C. Pi, J. Liu, A. Lin, and K. Wu, “Study on formation mechanism and corrosion resistance of an environmentally protective insulating coating on non-oriented electrical steel,” *Mater Chem Phys*, vol. 304, p. 127819, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.matchemphys.2023.127819.
- [25] A. Pierrard *et al.*, “Design of 3D-Photoprintable, Bio-, and Hemocompatible Nonisocyanate Polyurethane Elastomers for Biomedical Implants,” *Biomacromolecules*, vol. 25, no. 3, pp. 1810–1824, Mar. 2024, doi: 10.1021/acs.biomac.3c01261.
- [26] C. Ma, W. Yu, G. Ma, and W. Haidou, “Recent progress on high temperature radar absorbing coatings (RACs): a review,” *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, vol. 48, no. 6, pp. 726–753, Nov. 2023, doi: 10.1080/10408436.2022.2118663.
- [27] N. Shirke, V. Ghase, and V. Jamdar, “Recent advances in stealth coating,” *Polymer Bulletin*, vol. 81, no. 11, pp. 9389–9418, Jul. 2024, doi: 10.1007/s00289-024-05166-4.
- [28] C. Ma, W. Yu, G. Ma, and W. Haidou, “Recent progress on high temperature radar absorbing coatings (RACs): a review,” *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, vol. 48, no. 6, pp. 726–753, Nov. 2023, doi: 10.1080/10408436.2022.2118663.

