



Sintesis dan Karakterisasi Penyerapan Gelombang Mikro pada Komposit PANi - Barium Heksaferrit Tersubstitusi Mn dan Ti - CFO

Banu Nursanni¹, Kilat Pramana Putra², Gemi Nastiti²

¹Jurusan Pendidikan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan, Indonesia

²Jurusan Ilmu Material, Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Sains, Universitas Indonesia, Indonesia

E-mail: banunursanni@unimed.ac.id

Abstrak

Dalam pembuatan material penyerap gelombang mikro diperlukan pengembangan material yang memiliki sifat dielektrik dan sifat magnetik agar material mampu berinteraksi dengan kedua medan gelombang mikro tersebut. Salah satu material yang banyak dikaji adalah paduan polimer konduktif dan ferrit, dimana penggunaan polimer konduktif sebagai komponen dielektrik dapat mengurangi refleksi gelombang mikro dan ferrit sebagai komponen magnetik menghasilkan rugi elektrik dan magnetik yang besar. Paduan dua komponen tersebut mampu menghasilkan material baru yang dapat meningkatkan sifat dielektrik dan sifat magnetik yang diharapkan ada pada suatu material penyerap gelombang mikro. Pada penelitian ini diwakili oleh $BaFe_{10.8}Mn_{0.6}Ti_{0.6}O_{19}-CoFe_2O_4$ (BHFTM/CFO) sebagai material magnetik dan polianilin (PANi) sebagai polimer konduktif. Pada awal penelitian, dilakukan sintesa dan karakterisasi terhadap masing-masing komponen komposit yaitu matrik PANi dan material magnet BHFTM/CFO dengan komposisi 90/10. PANi yang digunakan merupakan hasil sintesa melalui metode polimerisasi oksidatif kimia menggunakan inisaiator Ammonium Peroksidisulfat (APS) dan monomer anilin dengan waktu polimerisasi 10 jam. Sedangkan untuk material magnetik BHFTM dan CFO masing-masing komponen disintesa melalui teknik pemaduan mekanik konvensional kemudian diolah dengan iradiasi ultrasonik untuk mendapatkan partikel nanokristalin. Komposit PANi/BHFTM/CFO disintesa dengan cara menambahkan material magnetik ke dalam matriks PANi kemudian dilakukan pengepresan dengan tekanan sebesar 5 ton selama 10 detik sebanyak 2 kali. Kemudian PANi/BHFTM/CFO diukur sifat absorpsi gelombang mikro menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) pada rentang frekuensi Ku-band (10 – 15 GHz). Hasil pengukuran menunjukkan *reflection loss* (RL) maksimum pada komposit mencapai -19.99 dB pada 12,8 GHz dan - 19.08 dB pada 12.75 GHz. Hasil RL tersebut menunjukkan bahwa komposit dapat digunakan untuk aplikasi penyerap gelombang mikro di atas 8 GHz.

Kata Kunci: polianilin; magnet komposit; bahan penyerap gelombang mikro.

Abstract

In the manufacture of microwave absorbing materials, it is necessary to develop materials that have dielectric and magnetic properties so that the material can meet these two microwave fields. One of the most studied materials is a conductive polymer and ferrite composite, where the use of conductive polymers as a dielectric component can reduce microwave reflection and ferrite as a magnetic component resulting in large electrical and magnetic losses. The combination of these two components is capable of producing new materials that can improve the dielectric and magnetic properties expected to exist in a microwave-absorbing material. In this research, $BaFe_{10.8}Mn_{0.6}Ti_{0.6}O_{19}-CoFe_2O_4$ (BHFTM/CFO) as a magnetic material and polyaniline (PANi) as a conductive polymer. At the beginning of the research, synthesis and characterization of each component of the composite were carried out, namely the PANi matrix and BHFTM/CFO magnetic material with a composition of 90/10. The PANi used is the result of synthesis through a chemical oxidative polymerization method using Ammonium peroxodisulfate (APS) and aniline monomer with a polymerization time of 10 hours. Whereas for the BHFTM and CFO magnetic materials, each component was synthesized through conventional mechanical alloying techniques then treated with ultrasonic irradiation to obtain nanocrystalline particles. PANi/BHFTM/CFO composites were synthesized by adding magnetic material to the PANi matrix then pressing with a pressure of 5 tons for 10 seconds twice. Then PANi/BHFTM/CFO assessed the absorption properties of microwaves using a Vector Network Analyzer (VNA) at the Ku-band frequency (10 - 15 GHz). The measurement results show that the maximum reflection loss (RL) in the composite reaches -19.99 dB at 12.4 GHz and - 19.08 dB at 12.75 GHz. The results of the RL indicate that the composite can be used for microwave absorber applications above 8 GHz.

Keywords: polianiline; composite magnet; microwave absorbing materials.

PENDAHULUAN

Perkembangan ilmu dan teknologi secara intensif telah menghasilkan banyak material cerdas. Salah satu diantaranya adalah material penyerap gelombang mikro. Secara teori gelombang mikro terdiri dari komponen magnetik dan komponen dielektrik. Sehingga akan terjadi dua interaksi yaitu interaksi gelombang dengan komponen dielektrik dan interaksi antara gelombang dengan komponen magnetik.

Pada interaksi antara gelombang dengan komponen dielektrik akan terjadi medan internal yang akan menginduksi gerak translasi dari muatan bebas atau berikatan (elektron atau ion) yang menyebabkan muatan kompleks (dipol) berotasi. Pada interaksi antara gelombang dengan komponen magnetik akan terjadi efek magnetisasi yaitu medan induksi yang mempengaruhi nilai magnetisasi (Manawan: 2014). Sehingga diperlukan suatu material yang mampu berinteraksi dengan kedua komponen tersebut.

Hingga saat ini ferrit masih menjadi pilihan material penyerap pada gelombang mikro, misalnya barium heksa ferrit (BHF, $Ba_{0.6}Fe_2O_3$). Material tersebut dapat digunakan karena memiliki rentan frekuensi serapan yang sangat lebar yaitu 1 kHz – 65. Namun sifat intrinsik dan ekstrinsik BHF membatasi serapan hanya pada daerah frekuensi tertentu saja. Misalkan pada BHF tipe M memiliki nilai anisotropi kristal (H_a) permeabilitas tinggi, magnetisasi total (M_s) dan koersivitas (H_c) tinggi, dan frekuensi resonansi magnetik yang lebar (Ezzati: 2015). Namun, tingginya nilai medan koersivitas pada ferrit menyebabkan sifat anisotropik material semakin meningkat sehingga sifat absorpsinya menjadi semakin lemah (Afghahi: 2017).

Solusi untuk memperkecil nilai koersivitas BHF ialah dengan memperkecil ukuran partikel menjadi nano dengan metoda ultrasonik. Dengan mengubah ukuran menjadi nanopartikel maka kinerja material sesuai dengan syarat material penyerap gelombang mikro yaitu saturasi magnetisasi tinggi dan resistivitas tinggi (Afghahi: 2017). Dengan kata lain fraksi permukaan yang berinteraksi akan meningkat sejalan dengan semakin bertambah kecilnya ukuran butir (Nikmanesh: 2017).

Selain ukuran partikel, dilakukan rekayasa struktur kristal BHF yaitu substitusi Fe^{3+} dengan kation lain atau kombinasi kation

tetravalen (titanium, timah, zirconium, iridium, ruthenium) dan divalen (kobalt, magnesium, mangan, zink, nikel) yang umumnya digunakan untuk mengubah sifat fisika dan kimia heksaferrit tipe-M tergantung dari tujuan yang diinginkan (Ghzaie: 2017). Pada penelitian ini, substitusi bertujuan untuk mengubah lebar serapan frekuensi dan meningkatkan serapan gelombang elektromagnetik.

Kobalt ferrit (CFO) berpotensi digunakan pada material penyerap gelombang mikro untuk menurunkan refleksi signal elektromagnetik dan dapat diaplikasikan pada frekuensi rendah dan tinggi (Sodaee: 2017). Sehingga diharapkan penggabungan BHF tersubstitusi Ti dan Mn (BHFTM) sebagai magnet keras dan CFO sebagai magnet lunak diharapkan dapat meningkatkan nilai magnetik dan lebar serapan frekuensi jika dibandingkan per komponennya (Yang: 2015).

Sedangkan pada material dielektrik yaitu polimer konduktif (polianilin, PANi) memiliki sifat yang unik dimana sifat tersebut dipengaruhi pemilihan proses polimerisasi dan jenis pelarut untuk proses *dedoping* (deprotonasi) dan *doping* (protonasi). Sehingga PANi dapat diubah dari tidak dapat menghantarkan listrik menjadi bersifat mampu menghantarkan listrik dengan memanfaatkan proses tersebut. Keunikan tersebut dikarenakan adanya ikatan *backbone* terkonjugasi akibat oksidasi maupun reduksi (donor-akseptor) elektron (Jaramillo-Tabares: 2012). Dengan kata lain, polimer dapat memiliki sifat konduktifitas karena kemampuan mengikat molekul-molekul yang dideteksinya.

Berdasarkan penjelasan di atas, material penyerap gelombang mikro dibuat dengan memanfaatkan ferrit yaitu BHF yang dimodifikasi dengan substitusi Ti dan Mn (BHFTM) dan CFO kemudian dipadukan dengan matriks PANi untuk mencapai syarat material penyerap gelombang mikro. Pada penulisan ini, akan difokuskan pada *resonant absorbers* yang menandakan karakteristik material yang dipengaruhi oleh frekuensi resonansi dimana material dikatakan baik apabila nilai *reflection loss* (RL) yang diperoleh mencapai nilai minus yang tinggi. RL sendiri merupakan besaran penyerapan energi gelombang mikro terhadap material penyerap dengan satuan dB.

METODE

PANi konduktif dibuat melalui reaksi polimerisasi oksidatif antara monomer anilin dan larutan asam klorida (HCl). Pada langkah pertama, 60 ml anilin ditambahkan dalam 750 mL HCl 1.5 M dan diaduk menggunakan pengaduk magnetik hingga larutan homogen. Larutan ini disebut larutan A (larutan monomer). Larutan kedua diperoleh melalui pencampuran antara 75 gr Ammonium Peroksidisulfat (APS) sebagai inisiator dan 750 mL HCl 1.5 M dengan pengaduk magnetik hingga homogen kemudian disebut larutan B (larutan inisiator). Larutan A dan larutan B dicampur bersama-sama dengan laju alir penetesan ± 2 mL/menit berkisar 10 jam sambil diaduk menggunakan pengaduk magnetik. Pada akhir proses polimerisasi akan terbentuk endapan PANi berwarna hijau kehitaman. Endapan PANi disaring dan dicuci dengan aquadest, metanol, ammonium hidroksida (NH₄OH), dan tetrahidrofur (THF). Endapan kemudian dikeringkan dalam vakum desikator selama 1 minggu.

Konduktivitas PANi dihasilkan oleh protonasi sebagai agen doping dimana serbuk PANi-EB sebanyak 8 gr dilarutkan dalam asam sebanyak 80 mL dan ditempatkan dalam reaktor untuk diaduk selama 10 jam. Pada tahap ini terjadi protonasi berupa endapan berwarna hijau kehitaman yang berupa PANi garam Emeraldin (PANi-ES).

BHFTM dibuat melalui teknik paduan mekanis dan reaksi *solid state*. Dilakukan perhitungan berdasarkan stoikiometri dari prekursor BaCO₃, Fe₂O₃, MnCO₃, dan TiO. Serbuk prekursor dicampur dan digiling menggunakan *ball mill planetary* dengan rasio massa bola terhadap sampel 10:1. Bubuk yang diperoleh setelah 30 jam waktu *milling* disinter pada suhu 1200 °C selama 2 jam. Pada pembuatan CFO, perlakuan dilakukan sama dengan pembuatan BHFTM namun berbeda perlakuan pada sintering, yaitu suhu yang digunakan adalah 900 °C selama 12 jam. Serbuk kristal BHFTM dan CFO kemudian dicampur dengan PANi konduktif untuk membuat komposit dengan rasio massa 80:20, 50:50, dan 20:80.

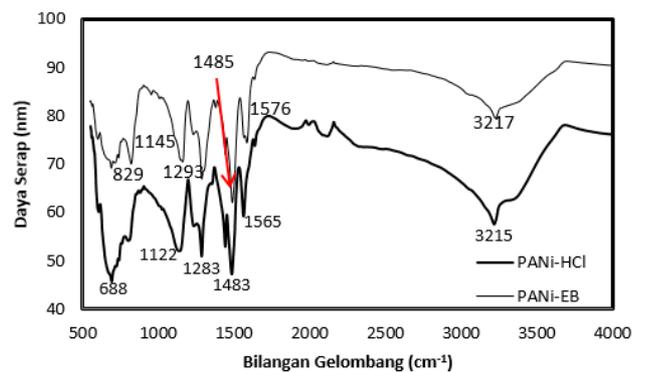
Semua bubuk PANi-EB dan PANi-ES dievaluasi dengan FTIR untuk diidentifikasi hasil polimerisasi. XRD digunakan untuk memperoleh pola difraksi pada BHFTM. *Vector Network Analyzer* (Keysight Technologies, N5232A PNA-L *Microwave Network Analyzer*, 20 GHz) digunakan untuk evaluasi karakteristik

gelombang mikro dengan mengukur transmisi dan refleksi gelombang EM dalam rentang frekuensi 10 – 15 GHz.

HASIL

A. Identifikasi Rantai Molekul pada PANi

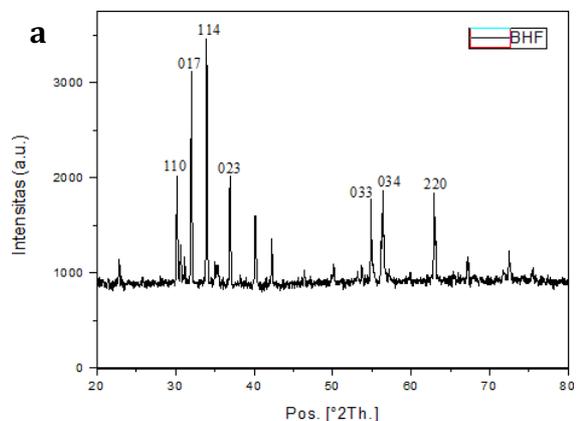
Karakterisasi FTIR diperlukan untuk mengetahui apakah PANi tersintesa secara sempurna. Dari karakterisasi FTIR didapatkan informasi mengenai gugus-gugus fungsi pada PANi, yaitu PANi-EB dan PANi-HCl (hasil doping). Hasil lebih lanjut dapat dilihat pada Gambar 1 di bawah.

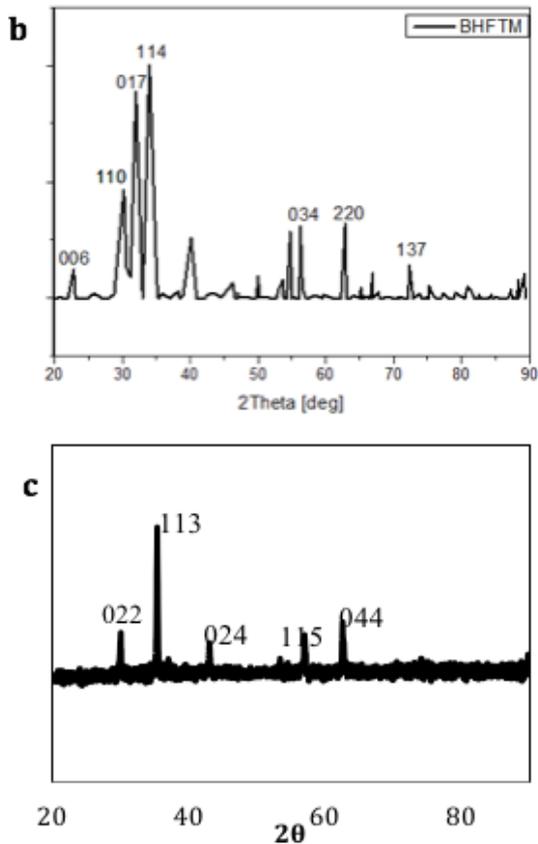


Gambar 1. Spektrum FTIR PANi-EB dan PANi-HCl

B. Struktur Kristal

Pada gambar 2 di bawah tampak pola difraksi XRD BHF (COD 96-100-8328), BHF tersubstitusi Mn dan Ti (BHFTM) (ICSD 98-007-5083), dan CFO (ICSD 98-006-6759). BHF pada percobaan ini menggunakan rasio Fe/Ba: 11 sedangkan untuk BHFTM yang digunakan memiliki komposisi BaFe_{12-2x}Mn_xTi_xO₁₉ (x = 0.6).



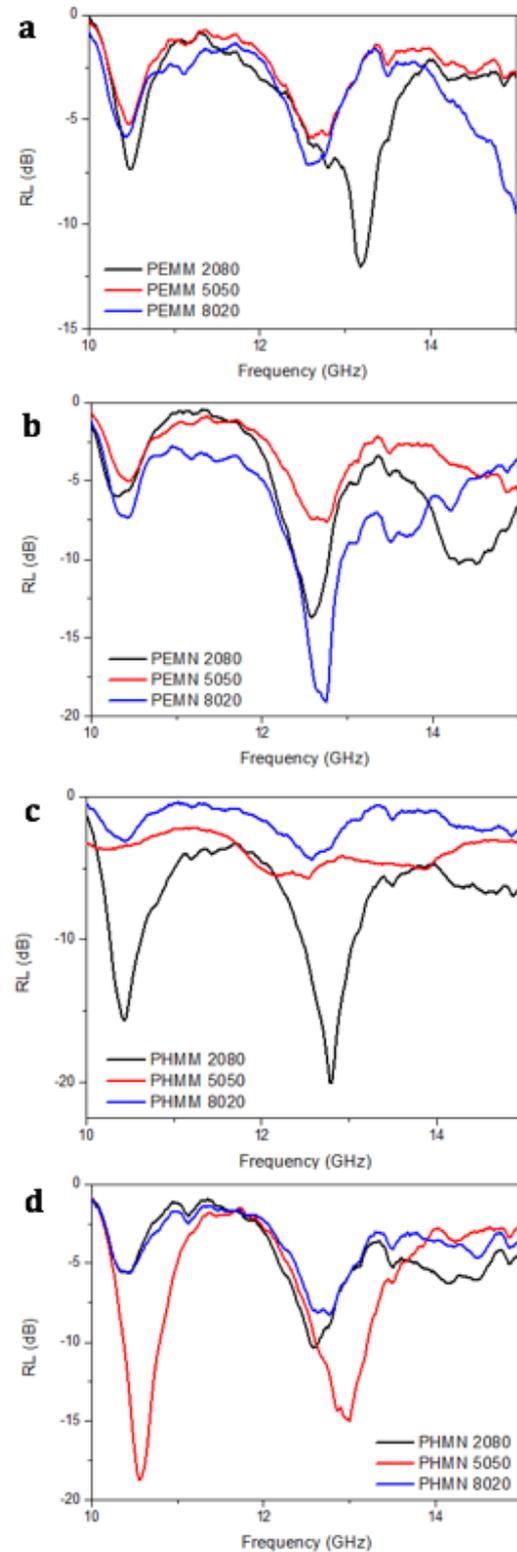


Gambar 2. Pola XRD

(a) BHF; (b) BHFTM; dan (c) CFO

C. Penyerapan Gelombang Mikro

Pada Gambar 3 menunjukkan karakterisasi serapan komposit pada Ku-band (10 – 15 GHz). Gambar 3 (a) menunjukkan *reflection loss* (RL) dari komposit dengan matriks PANi dan bahan pengisi (*filler*) BHFTM/CFO. Gambar 3 (b) menunjukkan RL pada komposit dengan matriks PANi dan *filler* material magnet yang telah menjalani perlakuan ultrasonik agar dihasilkan nanopartikel. Pada Gambar 3 (c), PANi yang digunakan merupakan PANi hasil protonasi dengan HCl (PANi-HCl) dengan *filler* sama dengan komposit sampel (a). Sedangkan pada Gambar 3 (d), matriks yang digunakan merupakan PANi-HCl dan *filler* yang telah diberikan perlakuan ultrasonik (seperti sampel b). Tujuan dari perbedaan perlakuan tersebut untuk melihat efek ukuran partikel terhadap nilai serapan yang dihasilkan.



Gambar 3. Karakterisasi komposit PANi/BHFTM/CFO (partikel magnet): (a) PANi/(makro)BHFTM/CFO (PE-MM); (b) PANi/(nano)BHFTM/CFO (PE-MN); (c) PANi-HCl/(makro)BHFTM/CFO (PH-MM); dan (d) PANi-HCl/(nano)BHFTM/CFO (PH-MN)

PEMBAHASAN

A. Identifikasi Rantai Molekul pada PANi

Pada Gambar 1 terdapat spektrum FTIR pada PANi-EB dan PANi-HCl. PANi-EB yang digunakan merupakan hasil proses deprotonasi (*dedoping*) dengan menggunakan reduktan yaitu ammonium hidroksida (NH₄OH). Hasil akhir proses adalah PANi tanpa *doping* dalam bentuk basa Emeraldin (EB). Pada bilangan gelombang 829 cm⁻¹ teridentifikasi vibrasi tekukan (*bending*) C-H dan pita absorpsi pada bilangan gelombang 1145 cm⁻¹ menunjukkan vibrasi regangan (*stretching*) C=N dari cincin Quinoid. Pada bilangan gelombang 1293 cm⁻¹ terdapat vibrasi regangan C-N. Bilangan gelombang 1485 cm⁻¹ dan 1576 cm⁻¹ masing-masing menandakan vibrasi regangan C=C dari cincin Benzoid dan vibrasi regangan C=C dari cincin Quinoid. Pada bilangan gelombang 3217 cm⁻¹ menandakan vibrasi regangan =N-H. Bilangan gelombang ini membuktikan bahwa PANi-EB sudah tidak lagi terprotonasi oleh asam protonik (HCl) (Geethalakshmi: 2014).

Pada PANi-HCl, absorpsi karakteristik PANi terdapat pada bilangan gelombang 1565 cm⁻¹ dan 1483 cm⁻¹ yaitu vibrasi regangan C=C dari cincin-cincin Quinoid dan cincin-cincin Benzoid sebagai *backbone* PANi. Pada bilangan gelombang 1122 cm⁻¹ menunjukkan vibrasi regangan C=N dari cincin Quinoid terprotonasi yang membuat PANi menjadi polimer konduktif. Pada puncak inilah protonasi terjadi pada atom nitrogen yang berikatan imin dengan cincin Quinoid dari gugus teroksidasi dalam PANi-EB. Hal ini menunjukkan PANi sudah ter-*doping* oleh asam protonik sebagai sumber proton (H⁺) sehingga bentuknya sudah berubah dari EB menjadi garam Emeraldin (ES) (Geethalakshmi: 2014). Selanjutnya puncak serapan lainnya menunjukkan vibrasi regangan C-N dari aromatik amina di puncak 1283 cm⁻¹. Sedangkan pada bilangan gelombang 3215 cm⁻¹ terdapat vibrasi regangan =N-H.

Dari uraian hasil spektrum FTIR di atas, dapat disimpulkan bahwa PANi-EB dan PANi hasil protonasi (*doping*) memiliki puncak pita-pita absorpsi karakteristik yang hampir sama. Dari Gambar 1 terlihat tidak ada perbedaan yang signifikan pada gugus-gugus fungsi antara PANi-EB dan PANi yang diberikan perlakuan proses *doping*. Hanya terdapat perbedaan pada nilai transmittansi yang mengalami penurunan atau peningkatan serta pelebaran puncak

absorbansi yang dipengaruhi oleh konsentrasi asam protonik.

B. Struktur Kristal

Perhitungan stokiometri pada BHF dan BHFTM (Fe/Ba : 12) tidak dapat diterapkan karena dikhawatirkan muncul fasa lainnya yaitu fase Fe₂O₃ yang dikhawatirkan terdapat pada hasil akhir. Fase Fe₂O₃ juga dapat diakibatkan pada saat proses *milling* yaitu akibat pengikisan bola-bola dan vial. Pada Gambar 2 (a) terlihat bahwa BHF dengan rasio Fe/Ba: 11 dapat terbentuk dan tidak menunjukkan adanya impuritas. Sedangkan pada Gambar 2 (b) merupakan pola difraksi XRD pada BHFTM. Dapat dilihat pola difraksi antara BHFTM menyerupai pola difraksi BHF dimana terdapat pengaruh substitusi ion Mn dan ion Ti sehingga terdapat pergeseran puncak difraksi. Jari-jari ion Mn⁴⁺ adalah 0.53 Å dan ion Ti²⁺ adalah 0.86 Å yang berbeda sedikit dengan jari-jari ion Fe³⁺ (0.65 Å) (Manawan: 2014). Adanya substitusi ion Mn dan ion Ti yang lebih sedikit dari Fe menyebabkan intensitas pada beberapa puncak pola difraksi mengalami penurunan. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan ukuran partikel setelah penambahan kation Mn dan Ti (Ezzati: 2015).

CFO yang digunakan merupakan hasil sintesa dengan pemaduan mekanik. Pada Gambar 2 (c) menunjukkan bahwa hasil identifikasi keseluruhan puncak difraksi memastikan material CFO telah memenuhi fasa tunggal CFO sesuai dengan pola difraksi berdasarkan Huang (2015).

C. Penyerapan Gelombang Mikro

Bedasarkan Xu (2014), *reflection loss* (RL) dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$RL \text{ (dB)} = 20 \log \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (1)$$

dimana RL adalah kerugian refleksi komposit dalam satuan desibel (dB), Z_{in} adalah impedansi karakteristik masukan dari penyerap, yang dapat dinyatakan sebagai:

$$Z_{in} = \left(\frac{\mu_r}{\epsilon_r} \right)^{1/2} \tanh \left[j \left(\frac{2\pi f d}{c} \right) (\mu_r \epsilon_r)^{1/2} \right] \quad (2)$$

dimana c adalah kecepatan gelombang elektromagnetik dalam ruang hampa, d adalah ketebalan lapisan penyerap dalam milimeter (mm), f adalah frekuensi gelombang

elektromagnetik, μ_r dan ε_r , masing-masing adalah permeabilitas relatif dan permitivitas relatif. Material yang mendapatkan nilai rendah terhadap RL menandakan semakin besar daya serap bahan terhadap gelombang mikro.

Pada Gambar 3 menunjukkan grafik yang dihasilkan pada pita frekuensi Ku-band terdapat puncak serapan yang lebih dalam dan lebar. Gambar 3 (a) menunjukkan komposit PANi-EB/Magnetik (mikro kristalit partikel), selanjutnya disingkat PE-MM, memiliki nilai serapan maksimal diperoleh PE-MM 20:80 yaitu -12 dB pada frekuensi 13.18 GHz. Hal ini menunjukkan adanya pengaruh komponen magnetik dibandingkan komponen PANi yang terlihat pada puncak serapan yang bergeser ke arah kanan dan terjadi pelebaran daerah serapan. Hasil serupa juga didapatkan pada komposit PANi-HCl/Magnetik multi kristalit partikel (PH-MM) yang memiliki serapan maksimal pada komposit PH-MM 20:80 yaitu -19.99 dB pada frekuensi 12.8 GHz).

Pada Gambar 3 (b) menunjukkan komposit PANi-EB/Magnetik nano kristalit partikel (PE-MN) menapai nilai serapan maksimal pada PEMN 80:20 yaitu -19.08 dB pada frekuensi 12.75 GHz. Sedangkan pada komposit PANi-HCl/Magnetik nano kristalit partikel (PH-MN) memiliki nilai serapan maksimal -18.6 dB pada frekuensi 10.58 GHz yang dihasilkan oleh komposit PHMN 50:50. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 3 (d). Pada komposit yang melibatkan nano kristalit partikel, meskipun fraksi massa komponen PANi lebih besar dibandingkan komponen magnetik, namun kontribusi komponen magnetik lebih dominan dibandingkan komponen polimer.

Berdasarkan hasil RL yang diperoleh, secara umum keempat sampel komposit dapat digunakan untuk pengaplikasian material penyerap gelombang dengan komposisi komponen tertentu. Hal tersebut berdasarkan pada Gambar 3 dimana masing-masing sampel komposit memiliki absorpsi maksimal pada frekuensi tertentu dalam rentang frekuensi gelombang mikro.

SIMPULAN

Pada penelitian ini dilakukan pembuatan PANi melalui polimerisasi oksidatif kimiawi dan BHFTM dan CFO melalui pepaduan mekanik. Hasil analisis FTIR menunjukkan spektrum IR PANi-HCl mirip dengan PANi-EB. Hasil ini menunjukkan protonasi dengan asam protonik

(HCl) tidak mengubah struktur kimia dalam PANi. Dari pengujian menggunakan VNA, dari semua sampel yang memiliki nilai RL terbesar pada Ku-band adalah -19.99 dB pada 12.8 GHz (PH-MM 20:80) dan -19.08 dB pada 12.75 GHz (PE-MN 80:20). Hasil RL menunjukkan bahwa material komposit PANi/BHFTM/CFO dapat digunakan untuk aplikasi penyerap gelombang mikro di atas 8 GHz.

REFERENSI

- Afghani, S. S. S., Jafarian, M., Salehi, & M., Atassi, Y. (2017). Improvement of The Performance of Microwave X Band Absorbers Based on Pure and Doped Ba-Hexaferrite. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 421, 340.
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.08.042>
- Ezzati, S. N., Rabbani, M., Leblanc, R. M., Asadi, E., Ezzati, S. M. H., Rahimi, R., & Azodi-Deilami, S. (2015). Conducting, Magnetic Polyaniline/Ba_{0.25}Sr_{0.75}Fe₁₁(Ni_{0.5}Mn_{0.5})O₁₉ nanocomposite: Fabrication, Characterization and Application. *Journal of Alloys and Compounds*. 646, 1157.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.05.146>
- Geetalakshmi, D., Muthukumarasamy, N., Balasundaraprabu, R. (2014). Effect of Dopant Concentration on The Properties of HCl-doped PANi Thin Film Prepared at Different Temperatures. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*. 125 (3), 1307.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.08.014>
- Ghzaiel, T. B., Dhaoui, W., Schoenstein, F., Talbot, P., & Mazaleyrat, F. (2017). Substitution Effect of Me = Al, Bi, Cr and Mn to The Microwave Properties of Polyaniline/BaMeFe₁₁O₁₉ for Absorbing Electromagnetic Waves. *Journal of Alloys and Compounds*. 692, 774.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.09.075>
- Huang, X., Zhang, J., Liu, Z., Sang, T., Song, B., Zhu, H., Wong, C. (2015). Facile Preparation and Microwave Absorption Properties of Porous Hollow BaFe₁₂O₁₉/CoFe₂O₄ Composite

- Microrods. *Journal of Alloys and Compounds*. 648, 1072.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.07.073>
- Jaramillo-Tabares, B. E., Isaza, F. J., de Torresi, S. I. C. (2012). Stabilization of Polyaniline by The Incorporation of Magnetic Nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*. 132(2-3), 529.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.11.065>
- Manawan, M., Manaf, A., Soegijono, B., & Hercuadi, A. Y. (2014). Struktur Mikro, Sifat Kemagnetan dan Karakteristik Penyerapan Gelombang Mikro dari Barium Hexaferrite Tersubstitusi Ti^{2+} - Mn^{4+} . *Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi*. 14(1), 15.
<https://doi.org/10.14203/jet.v14.15-19>
- Sodae, T., Ghasemi, A., & Razavi, R.S. (2016). Controlled growth of large-area arrays of gadolinium-substituted cobalt ferrite nanorods by hydrothermal processing without use of any template. *Ceramics International*. 42 (15), 17420.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.08.042>
- Xu, F., Ma, L., Gan, M., Tang, J., Li, Z., Zheng, J., Zhang, J., Xie, S., Yin, H., Shen, X., Hu, J., & Zhang, F. (2014). Preparation and Characterization of Chiral Polyaniline/Barium Hexaferrite Composite with Enhanced Microwave Absorbing Properties. *Journal of Alloys and Compounds*. 593, 24.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.01.032>
- Yang, H., Ye, T., Lin, Y., & Liu, M. (2015). Excellent Microwave Absorption Property of Ternary Composite: Polyaniline- $BaFe_{12}O_{19}$ - $CoFe_2O_4$ Powders. *Journal of Alloys and Compounds*. 653, 135.