

# The Pattern of Microwave Scattering by the Dielectric of Milks

(Pola Hamburan Gelombang Mikro oleh Beberapa Dielektrik Susu)

**Agung Tjahjo Nugroho<sup>\*</sup>, Nurul Sa'adah, Bowo Eko Cahyono**  
*Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember*  
*Jln. Kalimantan 37, Jember 68121*

## ABSTRACT

A microwave electric field scattering by a dielectric object had been developed to identify the type of a milk. A simple geometric tomographic system is applied. The milk is placed in a cylindrical tube and emitted with a microwave signal which is described in term of a harmonic function. The scattering field anywhere outside the cylinder is quantified analytically in which the unknown coefficients of the analytic function are determined at the surface of the cylinder. Three different type of milks, whole milk, UHT, and skim milk are studied. The incident fields are scanned from 1 GHz to 20 GHz and the scattering fields due to the illumination are quantified in three different locations around the objects. The study shows that the scattering field pattern depend on the type of the milk. The whole milk produces the lowest and highest magnitude of the scattering field at 2.4 GHz and 4.5 GHz respectively. These frequency points are higher than that produced by the UHT and skim milk.

Instrumentasi nondestruktif dikembangkan untuk mengidentifikasi jenis susu berdasarkan pola hamburan gelombang mikro dari dielektrik objek. Hamburan gelombang mikro terjadi ketika bahan dielektrik dipancarkan gelombang mikro. Medan listrik gelombang mikro yang terhambur diukur di sekitar objek. Pada artikel ini metode komputasi dikembangkan untuk mensimulasikan pola hamburan gelombang mikro dari objek. Medan listrik yang menyinari objek direpresentasikan menggunakan pendekatan deret harmonik. Kemudian medan terhambur diselesaikan secara analitik dari persamaan gelombang dengan memberi syarat batas pada permukaan objek. Pola hamburan yang terjadi pada rentang 1 GHz sampai dengan 20 GHz dievaluasi untuk mengidentifikasi jenis susu dari objek. Hasil pengujian menunjukkan pola hamburan gelombang mikro tergantung pada jenis susu. Puncak medan susu murni berada pada frekuensi sekitar 2.5 GHz dan 4.5 GHz. Frekuensi yang menghasilkan puncak tertinggi pada susu murni lebih tinggi dibandingkan susu yang sudah diolah seperti susu UHT dan susu skim.

**Keywords:** microwave scattering, scattering field pattern, milk identification.

**\*)Corresponding author:**  
Agung Tjahjo Nugroho  
E-mail: agungtnugroho@unej.ac.id

## PENDAHULUAN

Susu merupakan salah satu sumber utama gizi dan protein bagi manusia. Kadar gizi dan kandungan protein tergantung pada jenis dan kualitas susu. Susu dapat diperoleh dengan cara pemerahan hewan mamalia seperti sapi, kambing dan kuda. Susu juga dapat diperoleh dari olahan biji-bijian seperti susu kedelai, susu kacang almond dan susu beras. Di Indonesia, walaupun susu nabati semakin populer tetapi susu dari hewan merupakan susu yang paling banyak dikonsumsi, terutama susu sapi. Kualitas dan nilai gizi susu sapi selain tergantung pada kesehatan

dan kualitas pakan sapi juga tergantung pada teknik pengolahan yang dilakukan [1]-[4]. Pengolahan perlu dilakukan agar susu dapat bertahan lebih lama, lebih enak dan bernilai ekonomi lebih. Beberapa susu olahan yang banyak beredar dikalangan masyarakat di antaranya yaitu susu UHT (*Ultra-high Temperature Processing*) dan susu skim [5]. Pada artikel ini beberapa susu olahan diidentifikasi berdasarkan pola hamburan gelombang mikro.

Susu diletakkan pada sebuah penampung yang berbentuk silinder, kemudian disinari dengan gelombang elektromagnetik pada frekuensi gelombang mikro. Kemudian, medan terhambur yang

diakibatkan oleh dielektrik susu diukur di sekitar susu. Model fisis ini serupa dengan model *forward problem* pada tomografi gelombang mikro [6], [7]. Turnier mengkuantisasi medan listrik terhambur di sekitar objek dengan pendekatan numerik. Fauziah juga telah berhasil mengaplikasikan pendekatan numerik untuk mengkuantisasi medan terhambur disaat objek disinari dengan gelombang mikro mode TMz [8].

Untuk kasus geometri sederhana solusi analitik dari persamaan gelombang terhambur dapat digunakan seperti yang dilakukan oleh Goni dan Okhmatovski serta Zan, et al [9], [10]. Solusi dilakukan dengan mengekspansi gelombang elektromagnetik yang digunakan untuk mengiluminasi dengan deret harmonik. Solusi dapat diperoleh jika syarat batas atau batas antara dua bidang material diketahui [11], [12]. Pada bidang batas, jumlah total gelombang mikro di titik tersebut dapat dinyatakan sehingga koefisien yang timbul pada ekspansi deret harmonik dapat dinyatakan. Dengan demikian solusi analitik hamburan gelombang mikro dapat dinyatakan. Dengan memisalkan susu sebagai material homogen yang memiliki properti dielektrik seragam untuk satu sampel dan dapat diletakkan pada sebuah tabung silinder. Material dielektrik homogen berbentuk silinder dapat dimodelkan dalam sistem sederhana [10]. Dengan demikian, pola hamburan gelombang mikro dapat diperoleh dengan solusi analitik untuk

permasalahan hamburan oleh silinder dielektrik.

Dalam artikel ini, beberapa jenis susu, yaitu: susu murni, susu UHT dan susu skim diidentifikasi berdasarkan pola hamburan gelombang mikro yang terjadi. Dielektrik parameter yang digunakan mengacu pada Nunes, et al, serta Harindran dan Madhurima [13], [14] yang kemudian diekspansi pada rentang frekuensi 1 GHz sampai dengan 20 GHz menggunakan Persamaan Cole-Cole [13]. Hamburan gelombang mikro pada rentang frekuensi yang sama disimulasikan. Pola yang terjadi digunakan untuk mengidentifikasi dan membedakan satu jenis susu dengan jenis lainnya.

### METODE PENELITIAN

Dalam artikel ini pendekatan simulasi dilakukan. Dielektrik susu mengacu pada pengukuran yang dilakukan oleh Nunes, et al [13]. Dari beragam jenis, dipilih tiga jenis susu, yaitu: susu murni, susu UHT dan susu skim. Dengan parameter dielektrik pada frekuensi tinggi yang dapat dilihat pada Tabel 1. Jenis susu diidentifikasi dengan pola hamburan gelombang mikro pada rentang frekuensi 1 GHz sampai dengan 20 GHz. Perbedaan pola spektrum medan listrik yang terukur di sekitar objek dievaluasi untuk membedakan jenis susu.

Tabel 1. Koefisien Persamaan Debye untuk Properti dielektrik Air dan tiga jenis susu

Sample	$\epsilon'(\omega)$				$\epsilon''(\omega)$	
	$\epsilon'_s$	$\epsilon'_\infty$	$\tau$ (ps)	$(\epsilon'_s - \epsilon'_\infty)$	$\tau$ (ps)	$\sigma(\Omega^{-1}m^{-1})$
Air	81.09	6.70	10.61	75.63	10.44	0.036
Susu Murni	69.69	10.49	12.51	62.82	11.55	0.666
Susu Skim	74.30	11.74	12.68	66.60	11.62	0.653
Susu UHT	72.42	11.68	12.74	65.08	11.60	0.655

Properti dielektrik diekspansi pada frekuensi 1 GHz sampai dengan 20 GHz agar pola hamburan dapat diamati pada rentang frekuensi yang dimaksud. Pemodelan Cole-Cole digunakan untuk mengekspansi hasil pengukuran [15], [16]. Fitting data menggunakan persamaan berikut:

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon'_\infty + \frac{\epsilon'_s - \epsilon'_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (1)$$

$$\epsilon''(\omega) = \frac{(\epsilon'_s - \epsilon'_\infty)(\omega \tau)}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2)$$

Dielektrik objek - dalam hal ini: tiga jenis susu dan air - diletakkan dalam sebuah tabung silinder, sehingga

dapat dimodelkan sebagai objek berbentuk silinder yang diletakkan pada pusat koordinat dan berdiri pada sumbu x, seperti yang terlihat pada Gambar 2. Objek diiluminasi dengan gelombang elektromagnetik dengan mode TMz. Gelombang datang dalam bentuk *plane wave* yang dinyatakan dalam bentuk deret sebagai berikut

$$\mathbf{E}^i = \hat{\mathbf{a}}_z E_0 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} j^{-n} J_n(k_0 \rho) e^{jn\phi} \quad (3)$$

Solusi hamburan gelombang elektromagnetik di sembarang tempat di luar objek merupakan solusi persamaan maju pada kasus tomografi gelombang

mikro pada syarat batas. Medan terhambur di luar objek dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\mathbf{E}^s = \hat{\mathbf{a}}_z E_0 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} [a_n H_n^{(2)}(k_0 \rho) e^{jn\phi}] \quad (4)$$

Sementara itu, medan transmisi merupakan medan yang diteruskan masuk ke dalam objek yang berasal dari medan datang dari luar objek dielektrik. Persamaan untuk medan transmisi adalah sebagai berikut

$$\mathbf{E}^d = \hat{\mathbf{a}}_z E_0 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} [b_n J_n(\beta_1 \rho) + c_n Y_n(\beta_1 \rho)] e^{jn\phi} \quad (5)$$

Sedangkan medan total merupakan penjumlahan antara medan datang (*incident*) dan medan terhambur (*scattered*). Persamaan untuk medan total dapat dinyatakan sebagai berikut

$$\mathbf{E}^t = \mathbf{E}^i + \mathbf{E}^s \quad (6)$$

Medan di sekitar objek dapat dikuantisasi jika koefisien pada persamaan (5) diketahui. Koefisien ditentukan menggunakan syarat batas. Ketika medan dievaluasi pada permukaan silinder yang memiliki jari jari  $a$  maka medan total dari medan listrik dan medan magnet harus memiliki nilai berhingga atau dibatasi oleh permukaan objek ( $\rho = a$ ). Pada selimut silinder ini medan listrik dan medan magnet yang dinyatakan dalam persamaan (6) dapat dinyatakan dalam hubungan sebagai berikut

$$[E_z^t]_{\rho=a} = [E_z^i + E_z^s]_{\rho=a} \quad (7)$$

$$[H_z^t]_{\rho=a} = [H_z^i + H_z^s]_{\rho=a} \quad (8)$$

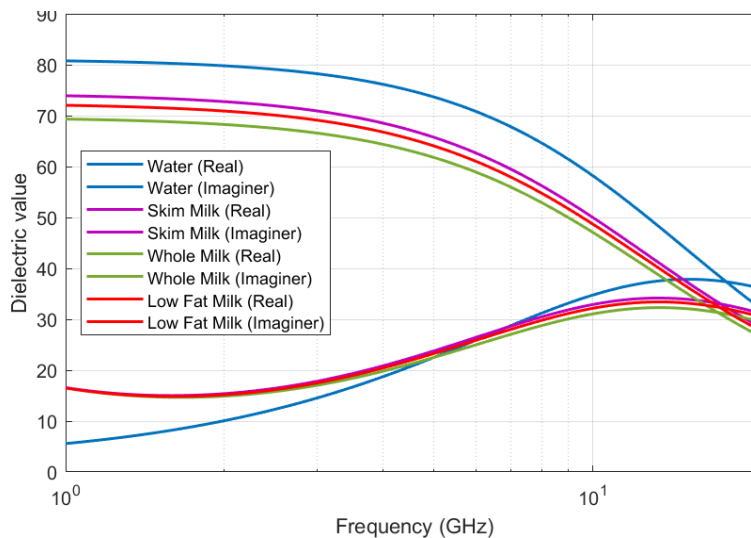
Dengan memanfaatkan Hukum Faraday pada persamaan Maxwell,

$$\mathbf{H} = -\frac{1}{j\omega\mu} \nabla \times \mathbf{E} \quad (9)$$

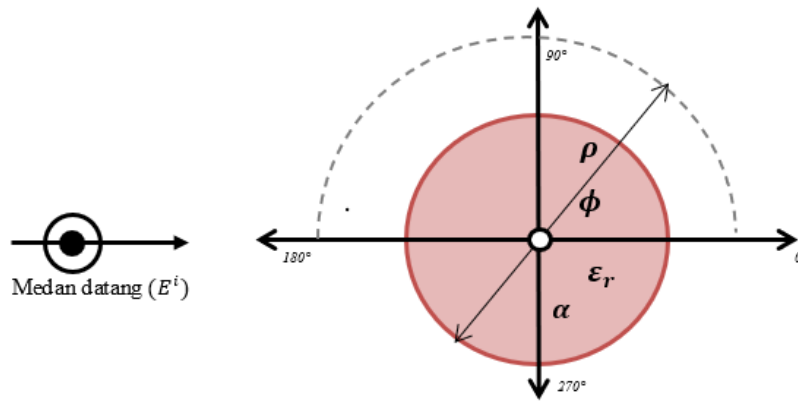
Maka medan magnet datang  $H_z^i$ , terhambur  $H_z^s$  dan total listrik datang  $H_z^t$  dapat dirumuskan dari persamaan (3), (4) dan (5) secara berturut turut. Sehingga akan didapat dua persamaan dalam variabel medan listrik dengan koefisien yang belum diketahui. Khusus untuk koefisien  $c_n$  bernilai nol ( $C_n = 0$ ) karena tidak ada medan terhambur yang dipantulkan kembali. Dengan menggunakan substitusi koefisien pada persamaan (5) dapat ditentukan sebagai berikut:

$$a_n = j^{-n} \frac{J'_n(\beta_0 a) J_n(\beta_1 a) - \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\mu_r}} J_n(\beta_0 a) J'_n(\beta_1 a)}{\sqrt{\frac{\epsilon_r}{\mu_r}} J'_n(\beta_1 a) H_n^{(2)}(\beta_0 a) - J_n(\beta_1 a) H_n^{(2)'}(\beta_0 a)} \quad (10)$$

$$b_n = j^{-n} \frac{J_n(\beta_0 a) H_n^{(2)'}(\beta_0 a) - J'_n(\beta_0 a) H_n^{(2)}(\beta_0 a)}{J_n(\beta_1 a) H_n^{(2)'}(\beta_0 a) - \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\mu_r}} J'_n(\beta_1 a) H_n^{(2)}(\beta_0 a)} \quad (11)$$



Gambar 1. Dielektrik Properti dari Air (water), susu murni (whole milk) dan susu skim (Skim milk) pada rentang frekuensi 1GHz-20GHz.



Gambar 2. Model Geometri Dielektrik Objek yang disinari gelombang Elektromagnetik palne wave dari arah sumbu x negatif

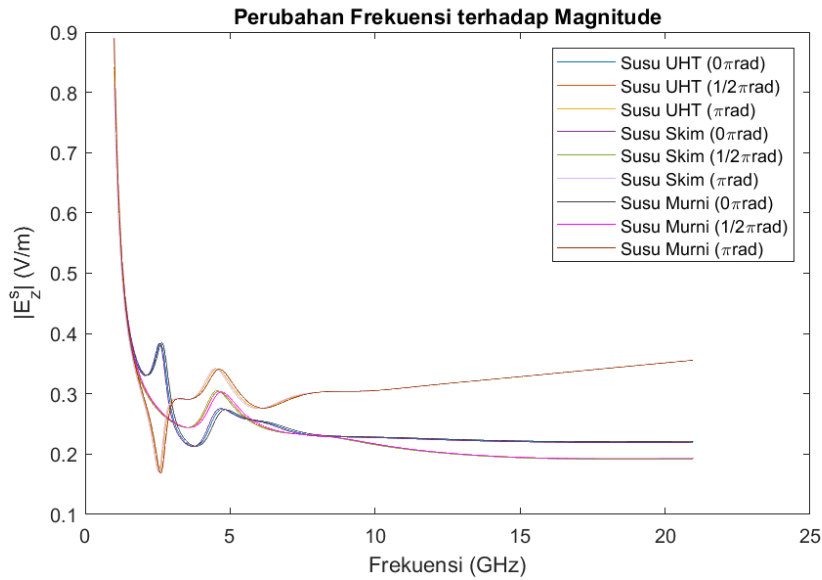
Model instrument yang digunakan berupa sebuah objek berbentuk silinder yang terbuat dari susu. Untuk itu Susu sebagai objek dielektrik diletakkan pada sebuah tabung silinder dengan jari jari 0.005 m. Objek kemudian disinari dengan gelombang mikro dengan frekuensi digeser dari 1 GHz sampai dengan 20 GHz. Hamburan di tiga titik observasi diukur. Objek pancari dengan gelombang mikro dengan mode TMz dalam bentuk plane wave. Dimisalkan gelombang dihasilkan dari sebuah kawat panjang tak terhingga yang terletak cukup jauh dari objek sehingga saat mengenai objek fase tidak menjadi parameter yang perlu diperhatikan. Besar arus yang mengalir kawat ditentukan sedemikian rupa sehingga intensitas gelombang mula mula bernilai 1.

Gelombang datang dari arah sumbu x negatif dan bergerak kearah sumbu x positif. Medan terhambur diukur di tiga titik berbeda di luar objek, pada jarak 2 kali radius objek pada  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , dan  $180^\circ$  atau  $0\pi$  rad,  $\frac{1}{2}\pi$  rad, dan  $\pi$  rad (Gambar 2). Medan didapat dengan menentukan koefisien pada persamaan (5). Koefesien ditentukan pada bidang batas di permukaan silinder. Medan terhambur diukur pada rentang frekuensi 1 GHz sampai dengan 20 GHz. Pola hamburan yang didapat dideskripsikan untuk mengidentifikasi jenis susu.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil *fitting* dapat dilihat pada Gambar 1. Dari gambar tersebut, terlihat bahwa terdapat perbedaan dielektrik properti ketiga jenis susu dan air. Perbedaan bagian real keempat material dapat terlihat dengan jelas. Komponen real merepresentasikan kemampuan bahan dalam menampung energi listrik atau kemampuan bahan untuk melewatkan medan listrik. Dengan perbedaan ini maka diharapkan pola gelombang elektromagnetik yang terhambur setelah melewati bahan dapat merepresentasikan objek yang diamati. Sementara itu, bagian imajiner ketiga jenis susu tidak jauh berbeda, sehingga *loss* atau redaman gelombang yang terjadi pun diharapkan tidak jauh berbeda, kecuali air. Dengan demikian perbedaan pola hamburan lebih banyak terjadi disebabkan karena perbedaan kemampuan bahan dalam melewatkan medan listrik.

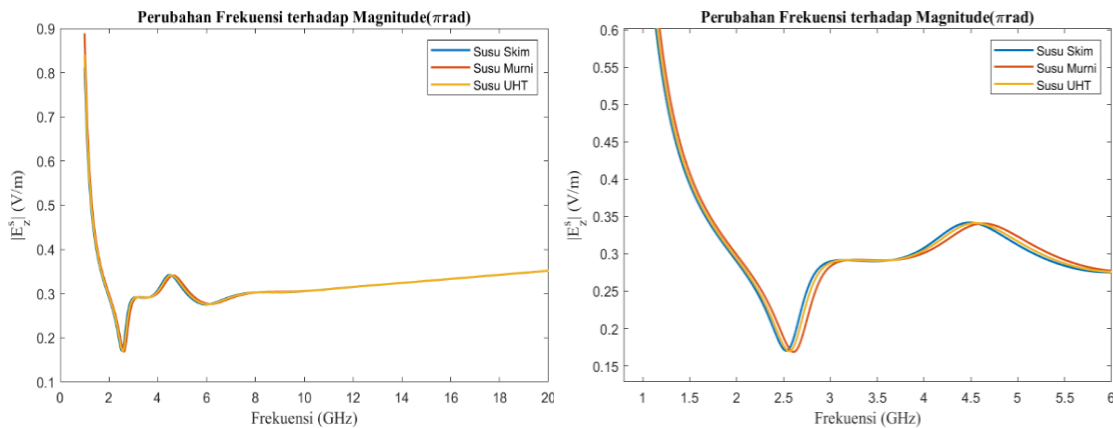
Medan terhambur disekitar susu pada tiga titik obeservasi ditentukan menggunakan persamaan 5 dan medan total terukur dapat ditentukan dengan persamaan (6) dimana medan datang diketahui dan koefesien pada persamaan (5) ditentukan dengan persamaan (10) dan (11). Hasil pengukuran dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Perubahan nilai medan terhambur pada rentang frekuensi 1GHz-20GHz oleh berbagai jenis susu dengan jari-jari 0.005 m di tiga titik observasi ( $0\pi$  rad,  $\frac{1}{2}\pi$  rad, dan  $\pi$  rad

Gambar 3 menunjukkan frekuensi yang sensitif dari ketiga jenis susu terdapat pada rentang 2.5 GHz hingga 4.5 GHz. Perbedaan pola dari masing-masing jenis susu juga terlihat jelas pada frekuensi ini. Pada titik pengukuran  $\pi$  rad, pada arah yang sama dengan gelombang datang, nilai *magnitude* medan terhambur mula-mula turun drastis dan mencapai titik paling rendah di frekuensi 2.5 GHz, dan kemudian naik lagi dengan puncak di sekitar 4.5 GHz. Medan terhambur pada posisi yang sama dengan medan datang akan tetapi memiliki arah yang berlawanan terletak pada titik observasi ini. Pada objek/material dengan nilai

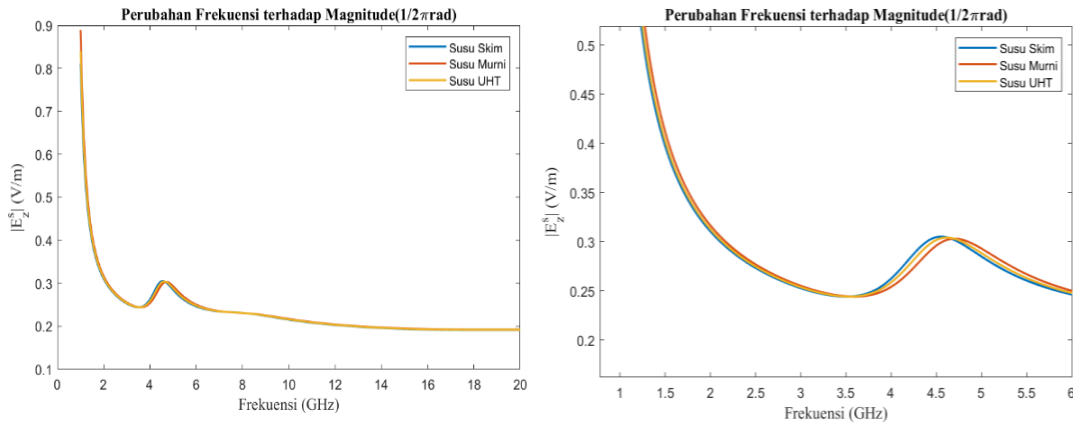
dielektrik di daerah sekitar susu, medan listrik terhambur pada arah refleksi, memiliki lembah paling dalam pada frekuensi sekitar 2.5 GHz, dengan puncak tertinggi 2 GHz kemudian. Gambar 4 menunjukkan detail perbedaan puncak frekuensi ketiga jenis susu. Terlihat susu murni memiliki lembah paling dalam dan puncak paling tinggi pada frekuensi paling tinggi dibanding dengan susu UHT dan susu skim. Pengolahan susu menurunkan frekuensi di mana puncak pada medan terhambur terjadi. Penurunan tertinggi terjadi pada susu skim, perubahan kandungan susu memungkinkan perubahan yang lebih besar dibanding pengolahan dengan menaikkan suhu.



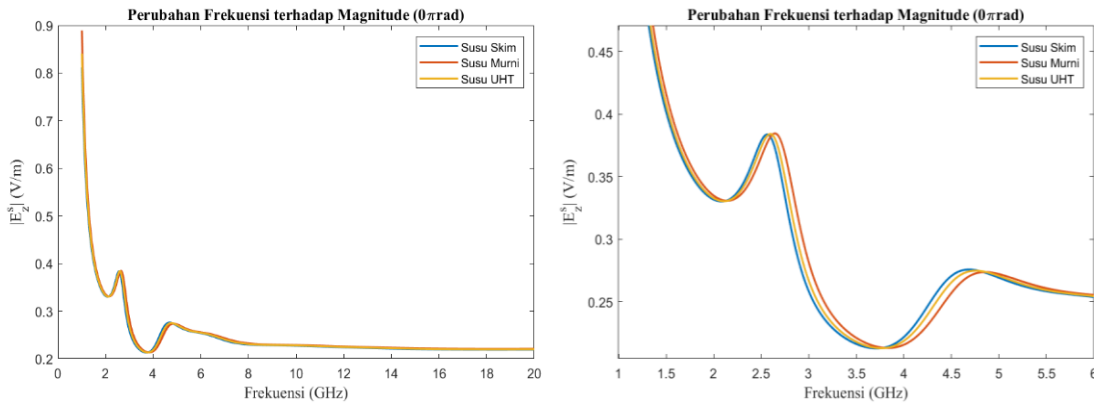
Gambar 4. Pola medan terhambur oleh tiga jenis susu pada daerah refleksi

Pada titik observasi tegak lurus dengan arah datang gelombang, pada posisi  $\frac{1}{2}\pi$  rad, pola hamburan yang terjadi muncul dikenal dengan nama *side poles*. Pola yang terjadi di daerah ini tergantung pada frekuensi kerja dan dielektrik objek yang disinari. Gambar 5 memperlihatkan hamburan pada daerah ini. Dari gambar terlihat pada titik tegak lurus dengan arah datang gelombang elektromagnetik tidak memperlihatkan titik lembah yang bisa diamati dengan

jelas. Puncak medan terhambur terjadi di kisaran 4.5 GHz. *Side pole* akan terlihat jelas pada frekuensi tersebut dengan salah satu puncak terjadi pada titik observasi. Dari ketiga jenis susu yang diamati terlihat pola yang sama akan tetapi frekuensi dimana puncak puncak medan terhambur pada titik  $\frac{1}{2}\pi$  rad berbeda. Susu murni memiliki frekuensi paling tinggi, sedangkan susu skim memiliki frekuensi paling rendah.



Gambar 5. Pola medan terhambur oleh tiga jenis susu pada daerah sisi (side pole)



Gambar 6. Pola medan terhambur oleh tiga jenis susu pada daerah transmisi

Pola hamburan pada daerah transmisi diperlihatkan pada Gambar 6. Titik evaluasi tepat berada di sisi lain dari gelombang datang. Medan terhambur yang terukur di titik ini merupakan medan yang berhasil menembus objek yang diamati. Gambar 6 memperlihatkan pola pada frekuensi di sekitar 2.5 GHz untuk medan terhambur di daerah transmisi berlawanan dengan medan di daerah refleksi. Pada daerah transmisi medan memuncak sebaliknya di daerah refleksi medan menurun. Akan tetapi pola cekungan pada frekuensi sekitar 3.75 GHz dan pola

puncak medan terhambur pada frekuensi sekitar 4.5 GHz sama. Pola yang terjadi pada tiga titik yang diamati sama, dengan pergeseran puncak yang konsisten. Susu murni memiliki frekuensi tertinggi; dan pengolahan susu mengakibatkan penurunan frekuensi di mana titik puncak dan lembah medan terhambur terletak. Dengan demikian, perubahan dielektrik yang terjadi karena pengolahan susu dapat mengakibatkan tergesernya puncak pada pola hamburan medan listrik yang terukur.



## KESIMPULAN

Medan listrik terhambur oleh tiga jenis susu sebagai bahan dielektrik ketika disinari dengan gelombang mikro telah dipelajari. Susu sebagai objek yang disinari gelombang mikro diasumsikan sebagai sebuah objek dengan geometri sederhana berbentuk silinder dengan properti dielektrik homogen. Solusi analitik dari medan terhambur dapat dinyatakan pada permukaan silinder dan berlaku di seluruh lokasi di luar objek, sehingga pola hamburan gelombang mikro yang disebabkan oleh susu dapat dievaluasi pada rentang 1 GHz sampai dengan 20 GHz untuk mengidentifikasi jenis susu.

Pengolahan susu dari susu murni menjadi susu UHT dan susu skim mengubah dielektrik properti bahan. *Fitting* Cole-Cole diaplikasikan untuk menyatakan nilai dielektrik pada rentang frekuensi yang diamati, mengingat pada frekuensi tinggi dielektrik bahan yang berupa bilangan kompleks bergantung pada frekuensi. Terlihat dari hasil *fitting* bagian real nilai dielektrik ketiga jenis susu dapat dibedakan dengan baik. Kemampuan bahan dalam menyimpan dan meneruskan energi dari gelombang elektromagnetik berbeda. Sementara itu tidak terdapat perbedaan yang cukup besar pada bagian imajiner. *Loss* dari gelombang relatif sama.

Pengukuran dilakukan di tiga titik berbeda  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , dan  $180^\circ$  atau  $0\pi$  rad,  $\frac{1}{2}\pi$  rad, dan  $\pi$  rad. Nilai *magnitude* dari medan terhambur memiliki pola seperti lembah dan bukit, terutama pada frekuensi 2.5 GHz hingga 6 GHz dan mengalami penurunan pada frekuensi lebih dari 6 GHz. Pola lembah terjadi pada daerah refleksi  $\pi$  rad dan transmisi  $0\pi$  rad. Dimana lembah terdalam berada di sekitar 2.5 GHz. Sedangkan puncak bukit terlihat pada 4.5 GHz. Jenis susu mempengaruhi posisi puncak lembah dan bukit. Susu murni memiliki frekuensi paling tinggi yang menyebabkan puncak tertingi.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Lin, A. L. Kelly, J. A. O'Mahony, and T. P. Guinee, "Effects of milk heat treatment and solvent Composition on physicochemical and selected functional characteristics of milk protein concentrate," *Journal of Dairy Science*, vol. 101, no. 8, 2018.
- [2] T. C. Krishna et al., "Influence of ultra-heat treatment on properties of milk proteins," *Polymers*, vol. 13, no. 18, 2021.
- [3] K. H. Cha et al., "Effects of fermented milk treatment on microbial population and metabolomic outcomes in a three-stage semi-continuous culture system," *Food Chemistry*, vol. 263, 2018.
- [4] T. Wang, S. W. Jeon, U. S. Jung, M. J. Kim, and H. G. Lee, "L-lactate dehydrogenase B chain associated with milk protein content in dairy cows," *Animals*, vol. 9, no. 7, 2019.
- [5] H. Dewi Astuti and W. D. Andang Arif, "Pengaruh Konsentrasi Susu Skim Dan Waktu Fermentasi Terhadap Hasil Pembuatan Soyghurt," *Envirotek : Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, vol. 2, no. 1, pp. 48-58, 2009.
- [6] V. L. Coli et al., "Detection of simulated brain strokes using microwave tomography," *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology*, vol. 3, no. 4, 2019.
- [7] A. T. Nugroho, W. Maulina, and M. Z. Arif, "Microwave Tomography Image Reconstruction using Inexact Newton Backtracking Method," *International Journal of Tomography & Simulation*, vol. 31, no. 3, pp. 1-14, 2018.
- [8] H. Fauziah, A. T. Nugroho, and B. E. Cahyono, "Solusi Numerik Hamburan Gelombang Mikro oleh Silinder Dielektrik dengan Method of Moment," *Jurnal Fisika Unand (JFU)*, vol. 11, no. 1, pp. 15-21, 2022.
- [9] O. Goni and V. I. Okhmatovski, "Analytic Solution of Surface-Volume-Surface Electric Field Integral Equation on Dielectric Sphere and Analysis of Its Spectral Properties," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 12, 2021.
- [10] W. Z. Yan, Y. Du, H. Wu, D. W. Liu, and B. I. Wu, "EM scattering from a long dielectric circular cylinder," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 85, 2008.
- [11] H. A. Ragheb, "Plane wave scattering by a dielectric circular cylinder in the vicinity of a conducting strip (TM case)," *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, vol. 34, no. 5, 2019.
- [12] W. Yan, D. Liu, Y. Du, and H. T. Ewe, "EM scattering from multiple cylinders," in *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 2, 2009.
- [13] A. C. Nunes, X. Bohigas, and J. Tejada, "Dielectric study of milk for frequencies between 1 and 20 GHz," *Journal of Food Engineering*, vol. 76, no. 2, 2006.
- [14] A. Harindran and V. Madhurima, "On the efficacy of dielectric spectroscopy in the identification of onset of the various stages in lactic acid coagulation of milk," *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, vol. 54, no. 2, 2020.

- [15] P. G. Petropoulos, "On the time-domain response of Cole - Cole dielectrics," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 11, 2005.
- [16] T. P. Iglesias, G. Vilão, and J. C. R. Reis, "An approach to the interpretation of Cole-Davidson and Cole-Cole dielectric functions," *Journal of Applied Physics*, vol. 122, no. 7, 2017.