

## **Simulasi Efek *Microwave* Pada Pemanasan Beberapa Komponen Dasar *Bio-Oil***

### **Simulation of Microwave Effects on Heating Some Bio-Oil Basic Components**

**Wayan Trimawiasa<sup>1</sup>, I Nyoman Sudiana<sup>2\*</sup>, La Aba<sup>3</sup>**

<sup>1, 2, 3</sup>Program Studi Fisika, Program Pascasarjana, Universitas Halu Oleo, Kampus Abdullah Silondae, Kendari, Sulawesi Tenggara, Indonesia 93121.

Email: <sup>1</sup>[trimawiasa@gmail.com](mailto:trimawiasa@gmail.com); <sup>2\*</sup>[nyoman.sudiana@uho.ac.id](mailto:nyoman.sudiana@uho.ac.id); <sup>3</sup>[Laabaz@yahoo.com](mailto:Laabaz@yahoo.com)

**Abstrak** – Telah dilakukan penyelidikan efek *microwave* melalui simulasi pemanasan komponen dasar *bio oil*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan model pemanasan dan distribusi energi pemanasan bahan komponen *oleic acid* dan *stearic acid*. Bahan berbentuk silinder diletakkan dalam aplikator pemanasan berbentuk kaviti menggunakan eksitasi *microwave* frekuensi 2,45 GHz melalui *waveguide* tunggal mode  $TE_{10}$ . Penyelesaian numerik menggunakan pemecah domain waktu dan pemecah transien berhasil menyimulasikan model pemanasan bahan dielektrik dengan hasil distribusi energi bergantung pada permitivitas kompleks bahan.

**Kata kunci:** *Microwave, bio oil, oleic acid, stearic acid, pemanasan*

**Abstract** – An investigation of the *microwave* effect has been carried out by simulating heating the basic components of *bio oil*. This research aims to produce a heating model and energy distribution of *oleic acid* and *stearic acid* component materials. The cylindrical material is placed in a cavity-shaped heating applicator using a *microwave* excitation frequency of 2.45 GHz through a single *waveguide*  $TE_{10}$  mode. Numerical solution using time-domain solver and transient solver succeeded in simulating the heating model of the dielectric material with the results of the energy distribution depending on the complex permittivity of the material.

**Keywords:** *Microwave, bio oil, oleic acid, stearic acid, heating*

## **1. Pendahuluan**

Dalam beberapa dekade terakhir, energi *microwave* telah banyak diterapkan sebagai energi ramah lingkungan yang sangat efisien di berbagai bidang seperti pengolahan makanan, industri kimia, dan obat-obatan [1]. Pemrosesan bahan dengan teknologi *microwave* menarik minat ilmuwan karena dapat memberikan pendekatan dan cara baru dalam meningkatkan sifat fisik material, memberikan alternatif untuk mengolah bahan yang sulit diproses, mengurangi dampak lingkungan dari pemrosesan bahan, memberikan keuntungan ekonomi melalui penghematan energi, ruang, dan waktu, dan memberikan peluang untuk menghasilkan material dan struktur mikro baru yang tidak dapat dicapai dengan metode lain [2]. Penggunaan luas terkini *microwave* adalah sebagai pemanas dalam pemrosesan material dalam penelitian maupun industri [3].

Aplikasi terkini teknologi pemanasan *microwave* banyak diaplikasikan pada proses konversi bahan bio massa menjadi *bio oil* melalui teknik pirolisis *microwave* [4-6]. Beberapa penelitian pirolisis *bio oil* telah berhasil diterapkan pada beberapa bahan komoditi pertanian, seperti: Nilam [7], Jerami Padi [8], Bambu [9] dan rumput laut [10]. Pada proses konversi bahan bio massa menghasilkan banyak komponen *bio oil* yang terdiri lebih dari 300 senyawa, seperti bio-oil, padatan, air dan hidrokarbon lainnya seperti, keton, ester, aldehida, fenol, alkohol, furan, asam, gula, dan lain-lain [11]. Sifat permitivitas biomassa memainkan peranan penting dalam pirolisis berbantuan *microwave* karena mempengaruhi penyerapan *microwave* biomassa [12, 13]. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan kualitas produk pemanasan *microwave* pada konversi *bio oil* seperti penggunaan berbagai bahan penyerap *microwave* [14].

Kualitas pemanasan *microwave* sangat dipengaruhi oleh keseragaman distribusi *microwave* di dalam bahan. Distribusi *microwave* dipengaruhi oleh banyak faktor yaitu struktur fisik dan kimia bahan [6], frekuensi *microwave*, densitas bahan, orientasi *microwave*, medan listrik relatif terhadap bahan anisotropik seperti serat kayu, pantulan dari permukaan antar muka bahan, intensitas medan listrik, geometri aplikator *microwave* [15], geometri, ukuran, permitivitas [16], dan sifat termal bahan [17], waktu pemaparan, dan kopling perpindahan panas dan kelembaban selama pemrosesan *microwave* [18]. Efek meja putar, dan mode *stirrer* juga mempengaruhi distribusi pemanasan bahan menggunakan *microwave* [12]. Disamping itu distribusi *microwave* dipengaruhi oleh masing-masing komponen kimia penyusun bahan, pada bahan dengan multi komponen, tiap komponen bahannya memiliki efek penyerapan energi *microwave* dan karakteristik panas yang berbeda-beda [12]. Meskipun berbagai efek pada proses dan hasil pemanasan *bio oil* dipelajari dan dilaporkan, masih sulit untuk memprediksi secara akurat proses dan hasil pemanasan secara terperinci. Belum terdapat penelitian bagaimana sesungguhnya interaksi *microwave* terhadap bahan *bio oil* terutama pada komponen dasar penyusun bahan *bio oil*. Oleh karena itu penelitian melalui penyelesaian numerik menggunakan simulasi sangat perlu dilakukan untuk memahami bagaimana sesungguhnya interaksi *microwave* terhadap *bio oil* secara teoritis khususnya pada bahan komponen dasar penyusun *bio oil*.

Penelitian ini dimaksudkan untuk memahami bagaimana interaksi dan efek *microwave* terhadap komponen dasar *bio oil* melalui simulasi. Terdapat beberapa software simulasi *microwave* yang biasa digunakan pada dunia industri maupun penelitian ilmiah, salah satunya adalah CST Studio Suite. Perangkat lunak CST menyediakan fasilitas yang mampu menampilkan simulasi dalam bentuk tiga dimensi pada berbagai macam komputasi elektromagnetik dan termal bahan. Dengan penelitian ini diharapkan mampu memberikan pemahaman yang lebih komprehensif dalam memprediksi hasil pemanasan *microwave* pada proses peningkatan kualitas hasil konversi *bio-oil*.

## 2. Landasan Teori

Interaksi gelombang elektromagnetik terhadap medium dapat dijelaskan dengan baik oleh ke empat persamaan Maxwell yang terkenal

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho & \nabla \times \mathbf{E} &= -(\partial \mathbf{B})/\partial t \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 & \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + (\partial \mathbf{D})/\partial t \end{aligned} \quad (1)$$

Dimana  $\mathbf{E}$  dan  $\mathbf{H}$  adalah medan listrik dan magnet,  $\mathbf{J}$  adalah rapat arus,  $\mathbf{D}$  adalah rapat fluks listrik, dan  $\mathbf{B}$  adalah rapat fluks magnet. Hubungan konstitutif yang menghubungkan  $\mathbf{J}$ ,  $\mathbf{D}$  dan  $\mathbf{B}$  dengan  $\mathbf{E}$  dan  $\mathbf{H}$  adalah  $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ ,  $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ , dan  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ . Dengan  $\sigma$  adalah konduktivitas listrik,  $\mu$  adalah permeabilitas magnetis dan  $\epsilon$  adalah permitivitas listrik [19].

Kemampuan suatu bahan untuk berinteraksi dengan energi elektromagnetik terkait dengan permitivitas kompleks bahan (sifat dielektrik atau suseptibilitas). Dengan asumsi bahan bersifat dielektrik homogen, isotropik, dan linier dicirikan oleh permitivitas kompleks absolut yang bergantung pada frekuensi

$$\epsilon_{a,b,s}(\omega) = \epsilon_0 \epsilon(\omega) = \epsilon_0 [\epsilon'(\omega) - i\epsilon''(\omega)] \quad (2)$$

Dengan  $\epsilon_0$  adalah permitivitas vakum dan  $\omega$  adalah frekuensi sudut,  $\epsilon'$  bagian nyata atau konstanta dielektrik,  $\epsilon''$  bagian imajiner atau dikenal sebagai faktor kerugian. Konstanta dielektrik adalah ukuran seberapa banyak energi dari medan listrik eksternal disimpan dalam material. Bahan dengan faktor kerugian  $\epsilon''$  tinggi mudah dipanaskan dengan *microwave*. Sebaliknya, jika suatu bahan memiliki faktor kerugian yang sangat rendah, maka akan transparan terhadap efek *microwave* [20].

## 3. Metode Penelitian

Aplikator pemanasan *microwave* komponen *bio oil* didesain berbentuk struktur kaviti menggunakan Software CST Studio Suite. Pada pemanasan bahan komponen *bio-oil* yang diselidiki adalah pemanasan komponen dasar *oleic acid* dan *stearic acid*. Dimensi kaviti berbentuk balok tiga dimensi yang diletakkan simetris terhadap sumbu Cartesian  $x$ ,  $y$ ,  $z$  [12, 21]. Bahan yang dipanaskan diletakkan dalam ruang kaviti berisi udara pada koordinat (0, 0, 0), berbentuk silinder, radius bahan 3 senti meter dan tinggi 6 senti meter. Port tunggal sebagai sumber eksitasi *microwave* diterapkan pada ujung *waveguide* pada mode dasar  $TE_{10}$  yang diletakkan pada salah satu sisi balok pada bidang potong  $x$  positif. *Waveguide* dengan kode WR340 digunakan [21].

Sifat elektromagnetik dan thermal bahan dinding kaviti serta *waveguide* menggunakan model PEC (*Perfect Electric Conductor*) dan model PTC (*Perfect Thermal Conductor*). Sementara itu untuk *oleic acid* dan *stearic acid* menggunakan pendekatan kerugian di dalam bahan berdasarkan model nilai tangen delta listrik bahan yang selalu konstan. Parameter input yang digunakan untuk mendefinisikan properti berbagai bahan yang diperlukan untuk simulasi diperoleh melalui literatur (Tabel 1).

**Tabel 1.** Parameter *input* bahan yang digunakan dalam simulasi *Coupled EM-Thermal*.

Material	Dielectric Constant $\epsilon'$	Loss Factor $\epsilon''$	Loss Tan ( $\epsilon''/\epsilon'$ )	Thermal Conductivity (W/K/m)	Heat Capacity (kJ/K/kg)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
<i>Oleic Acid</i>	2,563 <sup>a</sup>	0,0074 <sup>a</sup>	0,002887 <sup>g</sup>	0,3292 <sup>a</sup>	0,744 <sup>b</sup>	893,5 <sup>c</sup>
<i>Stearic Acid</i>	2,318 <sup>d</sup>	0,001391 <sup>g</sup>	0,0006 <sup>e</sup>	0,29 <sup>f</sup>	1,76 <sup>f</sup>	940,8 <sup>c</sup>
Udara	1,00059 <sup>g</sup>			0,026 <sup>g</sup>	1,005 <sup>g</sup>	

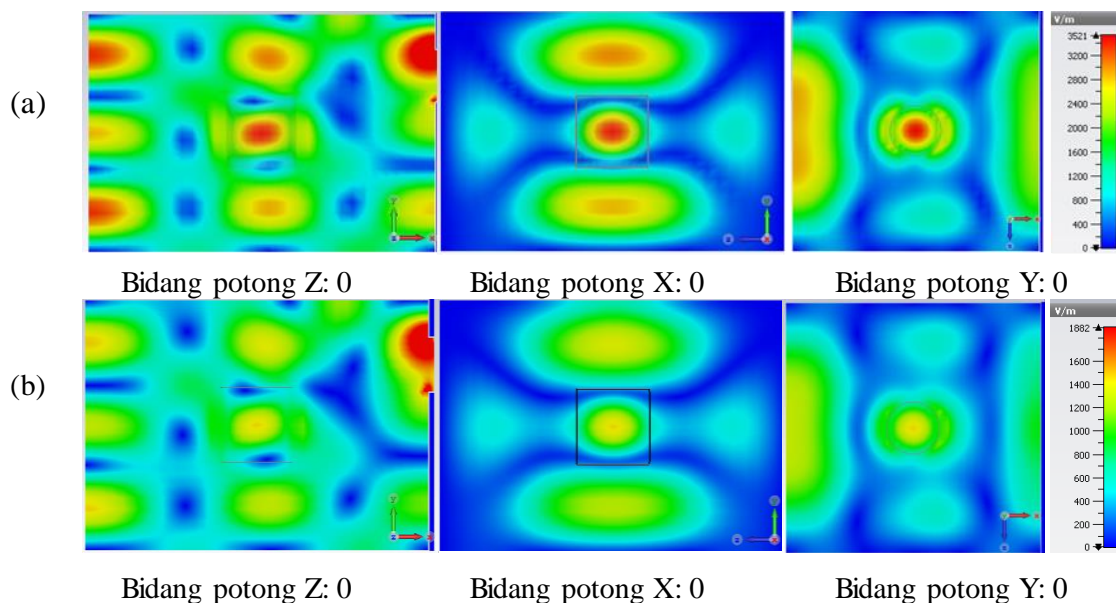
Sumber: <sup>a</sup> dari referensi [22], <sup>b</sup> dari referensi [23], <sup>c</sup> dari referensi [24], <sup>d</sup> dari referensi [25], <sup>e</sup> dari referensi [26], <sup>f</sup> dari referensi [27], <sup>g</sup> dari penelitian ini.

Pemecah yang diterapkan menggunakan pemecah domain waktu pada frekuensi 2,45 GHz untuk simulasi elektromagnetik dan pemecah transient untuk pemanasan bahan. Pada simulasi elektromagnetik diterapkan kondisi batas komponen medan listrik tangensial  $\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0$  [22]. Pada simulasi thermal menerapkan kondisi batas Isothermal ke segala arah atau  $T = \text{konstan}$  pada dinding kaviti [28]. Penerapan signal *Gaussian* dengan penyesuaian jumlah sinyal, waktu denyut sinyal dan penerapan *AR Filter* sinyal dilakukan sehingga kondisi *steady state* simulasi terpenuhi. Langkah lainnya yaitu menerapkan *mesh* dengan 10 sel per panjang gelombang (*cells per wavelength*) pada simulasi termal dan 35 Sel per kisi kotak model maksimum (*cells per max model box edge*) pada simulasi pemanasan.

#### 4. Hasil Dan Pembahasan

##### 4.1 Model pemanasan bahan menggunakan *microwave*

Simulasi model *Electromagnetic-Thermal Coupling microwave* dalam simulasi elektromagnetik menggunakan struktur kaviti dan properti *input* bahan yang sama dengan simulasi *thermal*. Bahan yang dipanaskan adalah bahan *bio oil* pada komponen dasar *oleic acid* dan *stearic acid* yang bersifat dielektrik. Bahan dielektrik hanya dapat berinteraksi terhadap komponen medan listrik *microwave* melalui mekanisme kehilangan polarisasi dielektrik bahan.



**Gambar 1.** Nilai absolut medan listrik maksimum kaviti dengan daya tersitumalsi 12,5 W yang berisi bahan (a) *oleic acid* dan (b) *stearic acid*.

Gambar 1 menunjukkan jenis bahan *oleic acid* dan *stearic acid* dalam kaviti dapat mempengaruhi persebaran medan listrik. Terdapat pola berbentuk bulatan dengan citra warna cenderung merah yang menandakan distribusi medan listrik yang semakin tinggi, sedangkan warna yang biru merupakan citra medan listrik yang rendah. Medan listrik pada kaviti yang mengandung bahan *oleic acid* dan *stearic acid* menunjukkan pola persebaran yang berbeda pada area tertentu terutama di sekitar bahan. Medan terdistribusi secara tidak uniform, baik di luar maupun di dalam bahan. Pada penampang dari bidang potong Z:0 jumlah sebaran medan listrik atau mode kaviti jumlahnya lebih banyak dibandingkan jika dilihat dari bidang potong lainnya. Di dalam bahan terdapat area medan dengan citra yang menandakan distribusi medan listrik sangat rapat sementara di bagian pinggir bahan medan listrik jauh lebih rendah. Bentuk yang ditunjukkan melalui pengamatan pada bidang potong X:0 dan Y:0 memberikan pola medan listrik yang agak simetris terhadap ukuran bahan.

Di dalam ruang kaviti interaksi *microwave* terhadap dinding kaviti dan bahan membentuk pola penyebaran atau mode medan listrik. *Microwave* yang menjadi gelombang insiden terhadap dinding akan dipantulkan berlawanan arah. Perpaduan gelombang insiden dengan gelombang pantul yang memiliki frekuensi dan panjang gelombang yang sama akan menimbulkan superposisi *microwave*. Superposisi *microwave* membentuk gelombang berdiri dengan amplitude medan listrik minimum (*node*) pada simpul gelombang dan amplitude medan listrik maksimum (*antinode*) pada perut gelombang. *Node* dan *anti node* menghasilkan distribusi medan listrik, kerugian daya dalam bahan, dan kerugian volumetrik yang tidak merata dalam kaviti dan menghasilkan *cold spot* dan *hot spot* pada bahan [24, 30]. Lokasi zona medan *microwave* distribusi tinggi dan rendah yang dibuat oleh beberapa pola gelombang berdiri yang ditumpangkan dalam kaviti bergantung pada dimensi rongga, *port microwave*, spektrum frekuensi, dan geometri, dimensi, sifat dielektrik, dan lokasi bahan [24-30].

Jika dirunut citra medan listrik dari permukaan ke arah internal bahan, persebaran medan listrik tiba-tiba menurun pada sub-permukaan bahan dan meningkat secara gradual menuju pusat bahan. Perbedaan distribusi yang tajam ini nampak jelas dari area medan listrik berbentuk konkaf-konveks di kanan dan kiri bahan dan dibatasi dengan citra berwarna hijau yang ditunjukkan oleh citra kaviti pada bidang potong Y:0. Bentuk konkaf-konveks distribusi medan listrik di sekitar bahan diperkirakan diakibatkan oleh peristiwa pemantulan dan refraksi *microwave* terhadap bahan. Pemantulan *microwave* oleh bahan dipengaruhi karakteristik intrinsik impedansi oleh permitivitas bahan. Semakin tinggi dielektrik bahan impedansi *microwave* juga akan semakin meningkat [13]. Dari penampilan medan listrik melalui bidang potong Z:0 dan Y:0 ditunjukkan bahwa pada *oleic acid* nampak jelas di kanan kiri bahan terdapat pola distribusi medan listrik dengan warna yang cenderung lebih terang. Gambaran ini mempresentasikan bahwa perbedaan permitivitas bahan mempengaruhi pola distribusi medan listrik di dalam kaviti. Beberapa literatur menjelaskan bahwa daya eksitasi *port microwave* diserap hanya sebagian dan sisa dipantulkan oleh bahan [30]. Penyerapan daya *microwave* oleh bahan tergantung dari sifat dielektrik dan volume total bahan. Berdasarkan volume bahan, kerugian daya *microwave* menurun terhadap kenaikan volume bahan [31, 31]. Nilai penyerapan daya bahan juga proporsional terhadap nilai imajiner permitivitas bahan, frekuensi dan daya masukan yang digunakan [32].

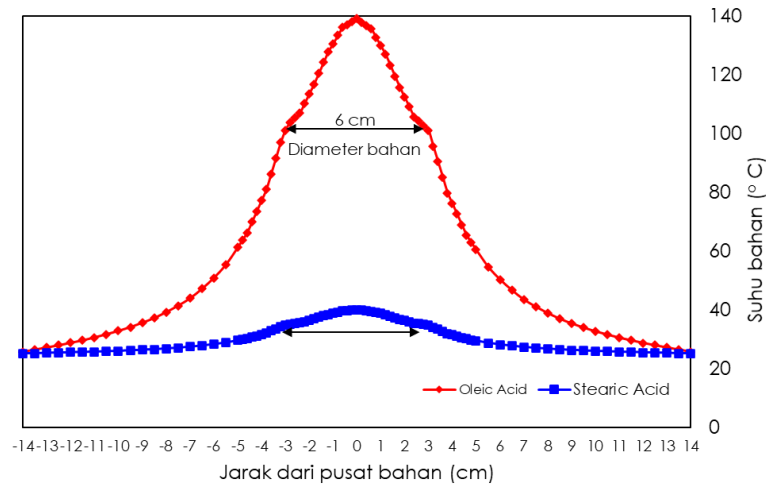
Keberadaan bahan dalam kaviti akan mempengaruhi distribusi medan listrik dalam bahan. Implikasi dari hasil simulasi ini yaitu dalam meletakkan bahan dalam kaviti pada proses pemanasan *microwave* perlu memperhatikan distribusi *node* dan *anti node* bahan. Tidak semua ruang dalam kaviti dapat terekspos oleh *microwave*. Dari hasil ini model simulasi dapat menggambarkan komponen medan listrik *microwave* dapat berinteraksi terhadap permitivitas bahan. Karakteristik interaksi *microwave* ini dapat digunakan untuk menganalisis pemanasan *microwave* terhadap komponen dielektrik *oleic acid* dan *stearic* di dalam kaviti.

#### 4.2 Distribusi energi hasil model pemanasan *microwave*

Efek kerugian volumetrik panas bahan sebagai manifestasi kerugian daya *microwave* dapat diindikasikan dengan sebaran suhu dalam kaviti. Gambar 2 Menunjukkan terdapat perbedaan distribusi panas pada bahan *oleic acid* dan *stearic acid*. Kehadiran panas bahan yang sangat tinggi hadir berasal dari bagian dalam bahan baik pada bahan *oleic acid* maupun *stearic acid*. Panas yang tinggi dari pusat bahan, meluruh secara perlahan ke arah eksternal, kemudian meluruh secara drastis pada bagian luar bahan menuju batas dinding kaviti.

Distribusi panas dalam bahan tidak uniform ditimbulkan oleh mode gelombang berdiri medan listrik *microwave* pada ruang kaviti [30]. Gelombang berdiri medan listrik maksimum yang memiliki rapat

kerugian daya elektrik di dalam bahan akan menghasilkan titik pusat panas (*hot spot*) dan titik dingin (*cold spot*) [17]. Distribusi temperatur dan lokasi *hot spot* bergantung atas distribusi medan listrik di dalam kaviti [18] dan distribusi medan yang listrik yang tidak uniform dalam bahan [33]. Adanya *hot spot* atau titik panas yang tinggi di dalam bahan muncul akibat kerapatan kerugian volumetrik yang tinggi [30].



**Gambar 2.** Grafik Distribusi panas bahan *oleic acid* dan *stearic acid* pada sepanjang sumbu-x dengan daya terstimulasi 800 W selama 1000 s.

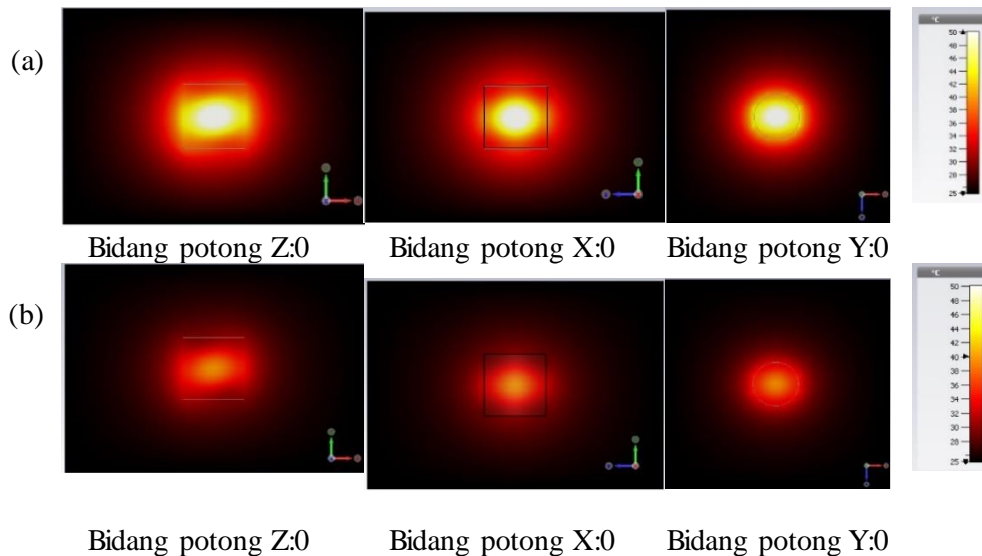
Selain adanya sebaran medan listrik akibat gelombang berdiri di dalam kaviti, pola pemanasan bahan juga dipengaruhi oleh geometri bahan yang dimuat dalam kaviti [17]. Penelitian terdahulu untuk bahan yang berbentuk silinder panas terjadi dipusat bahan, sedangkan untuk silinder yang besar pemanasan terjadi pada sub-permukaan bahan begitu pula untuk bahan dengan penetrasi daya yang tidak terlalu besar [18]. Untuk bahan berbentuk lempengan dan balok tebal, panas biasanya terjadi pada sub-permukaan bahan [18].

Pada *oleic acid* dan *stearic acid* bentuk geometri bahan berupa silinder menyebabkan *hot spot* ada pada pusat bahan. Bentuk yang konveks dari permukaan silinder akan dapat merefraksi *microwave* menuju fokus bahan [17, 30]. Walaupun impedansi bahan akibat kontribusi nilai dielektrik *oleic acid* dan *stearic acid* tidak cukup tinggi namun bentuk geometris bahan yang diterapkan dapat menambah kontribusi kehilangan panas volumetrik bahan. Bentuk geometris hasil ini juga mengkonfirmasi hasil penelitian sebelumnya [36]. Perhitungan numerik pada bahan lainnya seperti kentang berbentuk silinder juga menunjukkan *hot spot* muncul di dalam pusat bahan [36].

Selain efek distribusi medan listrik dan geometri bahan, distribusi panas bahan *oleic acid* dan *stearic acid* dipengaruhi oleh kemampuan bahan untuk mendifusi atau mentransfer panas dari medan suhu yang lebih tinggi ke medan suhu yang lebih rendah. Distribusi suhu di dalam bahan yang dipanaskan dengan *microwave* ditentukan oleh sifat termal bahan dan distribusi energi *microwave* yang diserap [12]. Laju difusi panas yang lebih rendah dibandingkan laju disipasi daya *microwave* suhu akan meningkat dengan cepat membentuk *hot spot* di dalam bahan [18]. Bentuk kemiringan kurva negatif di area dalam dan luar bahan di interpretasikan sebagai perpindahan panas secara difusi.

Distribusi energi panas bahan sangat bergantung pada posisi bahan. Pada penelitian ini bahan diletakkan di tengah pusat kaviti simetris terhadap sumbu Kartesian  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Gambar 3 menunjukkan distribusi panas volumetrik bahan *oleic acid* terhadap posisi lebih tinggi dibandingkan pada bahan *stearic acid*. Distribusi panas kedua bahan memiliki pola yang mirip namun di luar bahan tidak terbentuk variasi mode distribusi panas seperti pada distribusi medan listrik. Pemanasan dalam kaviti hanya melibatkan pemanasan pada bahan sebagai kehilangan dielektrik, tanpa diikuti kehilangan magnetik. Kehilangan panas digenerate oleh *microwave* pada bahan namun energi panas dapat terdistribusi ke seluruh bagian ruang kaviti. Semakin jauh posisi dari bahan panas cenderung menurun. Bentuk distribusi panas di luar bahan bukanlah distribusi panas sebagai kehadiran pemanasan volumetrik *microwave*. Pada bahan distribusi panas tidaklah merata, terutama di bagian alas dan tutup silinder bahan. Terdapat *node* dan *anti*

*node* panas disekitar bahan yang konsisten terhadap pola sebaran medan listrik dan kerugian daya *microwave*. Panas yang tinggi ditunjukkan oleh warna cenderung putih, dan warna yang cenderung merah menunjukkan suhu bahan yang semakin rendah. Area dengan suhu yang lebih tinggi merepresentasikan kerapatan energi volumetrik bahan yang lebih tinggi. Kerapatan kerugian volumetrik panas bahan secara proporsional positif bergantung atas daya yang digunakan.



**Gambar 3.** Suhu maksimum pemanasan selama 1000 s pada bahan (a) *oleic acid* dan (b) *stearic acid*.

Bentuk bahan mempengaruhi dimana posisi *hot spot* terjadi. Perhitungan numerik akibat superposisi panas yang berasal dari segala arah, pada balok panas yang tinggi dihasilkan pada bagian sudut bahan sub-permukaan bahan [18]. Penelitian sebelumnya menggunakan oven domestik, impedansi bahan yang sangat tinggi bertanggung jawab terhadap pemanasan bagian tepi bahan. Semakin tinggi sifat dielektrik bahan maka semakin rendah kedalaman penetrasi *microwave*. Seperti dilaporkan ke dalam penetrasi *microwave* sangat rendah dalam bahan yang mengandung garam. Selain sifat intrinsik bahan, penetrasi *microwave* juga dipengaruhi oleh frekuensi. Pada penelitian pemanasan kentang menggunakan frekuensi yang lebih rendah menunjukkan penetrasi *microwave* yang lebih dalam [30]. Volume bahan juga menentukan penyerapan *microwave*, seperti dilaporkan pada bahan air dan larutan garam semakin besar volume bahan yang dimuat dalam kaviti *microwave* menyebabkan penyerapan daya bahan yang semakin rendah [31].

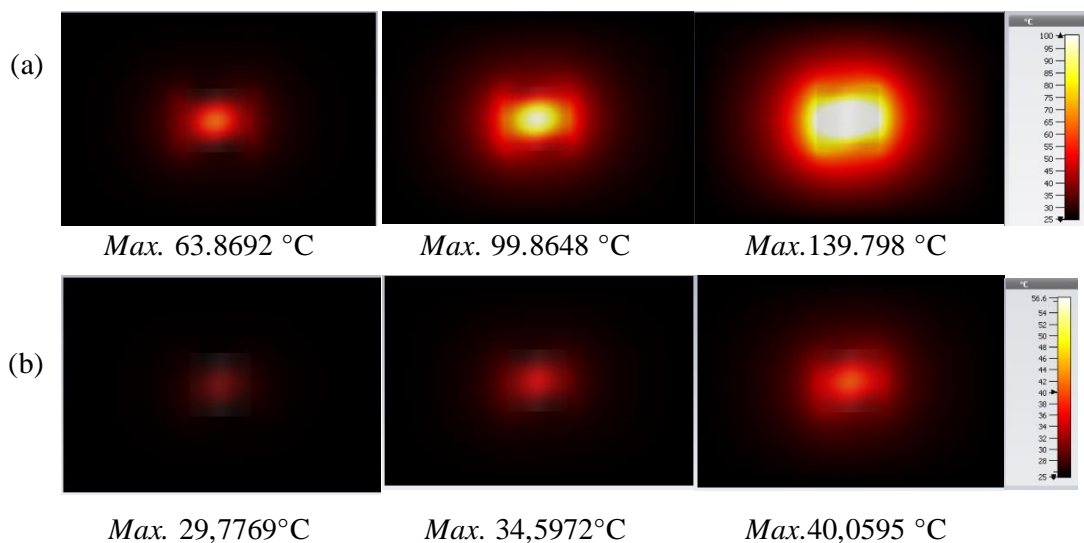
Di dalam kaviti komponen medan listrik membentuk simpul gelombang berdiri yang mengaruhi distribusi kerugian daya volume bahan. Besarnya kerugian volumetrik bahan secara proporsional sebanding dengan permitivitas relatif bahan dan kuadrat medan listrik [1, 17, 20, 31]. Di dalam kaviti kerugian daya *microwave* dapat ditimbulkan oleh mekanisme interaksi komponen listrik maupun oleh komponen magnetis *microwave* terhadap bahan [36]. Pada simulasi ini kaviti diasumsikan tidak ada mekanisme kerugian daya yang diakibatkan interaksi bahan terhadap komponen listrik maupun komponen magnetis *microwave*. Dinding kaviti menggunakan asumsi bersifat konduktor listrik sempurna ( $\sigma \rightarrow \infty$ ) menyebabkan *microwave* menembus dinding dengan penetrasi kedalaman nol atau *microwave* terpantul sempurna [13]. Kehilangan daya *microwave* di dalam kaviti disebabkan oleh hanya interaksi terhadap komponen listrik bahan. Oleh karena itu karakteristik permitivitas kompleks *oleic acid* dan *stearic acid* sangat penting dalam pemanasan *microwave*. Faktor *loss* dielektrik bahan sangat menentukan konversi energi *microwave* menjadi panas [37].

Sejauh ini simulasi pemanasan *microwave* hanya melibatkan pemanasan oleh komponen medan listrik *microwave*, tanpa pemanasan akibat interaksi bahan terhadap komponen magnetis *microwave*. Bahan menggunakan asumsi sifat dielektrik dan termal bahan yang konstan terhadap perubahan panas. Pada saat proses pengukuran secara langsung sulit dibedakan faktor kehilangan akibat kehilangan konduksi dan kehilangan oleh keseluruhan komponen dielektrik lainnya [20, 24, 30]. Sehingga secara keseluruhan dielektrik bahan pada simulasi ini dinyatakan sebagai dielektrik efektif bahan yang konstant

terhadap perubahan suhu dan frekuensi. Model dielektrik efektif konstan ini juga konsisten terhadap pengukuran nilai permitivitas *oleic acid* pada suhu hingga 70°C yang tidak banyak berubah [22].

Pada Gambar 4, distribusi panas melalui kerugian daya oleh sifat permitivitas bahan *oleic acid* dan *stearic acid*, lebih signifikan pengaruhnya dibandingkan distribusi akibat properti termal bahan. Di dalam bahan mengalami pemanasan volumetrik dengan pola pemanasan yang bentuknya konsisten seperti pada pola distribusi medan listrik dan rapat kehilangan daya bahan, sedangkan distribusi panas di luar bahan mengikuti pola persebaran panas melalui mekanisme difusi panas secara konduksi.

Distribusi panas terhadap waktu tidak bersifat statis namun sangat dinamis dan meningkat secara proporsional terhadap lama waktu durasi pemanasan. Panas yang sangat tinggi mula-mula muncul dari pusat bahan berbentuk titik panas, namun seiring bertambahnya waktu pemanasan suhu bahan meningkat membentuk pola elips hingga akhirnya berbentuk belah ketupat pada pemanasan hingga 1000 s. Peningkatan durasi waktu pemanasan, panas ditemukan tidak hanya terdapat di area *anti node* medan listrik *microwave*, juga dapat mengalir menuju area *node* dengan distribusi medan listrik yang rendah. Pengisian panas pada area *node microwave* ini diinterpretasikan terjadi perpindahan energi akibat konduksi panas. Suhu keseluruhan bahan meningkat seiring waktu seiring memperbesar zona pemanasan. Bentuk distribusi panas dalam ruang maupun peningkatan dalam waktu hasilnya sangat konsisten terhadap hasil simulasi pada penelitian simulasi pirolisis lignin sebelumnya [34]. Konsistensi ini muncul diperkirakan lignin dan komponen *oleic acid* dan *stearic acid* memiliki karakteristik permitivitas bahan yang tidak jauh berbeda.



**Gambar 4.** Pola pemanasan (a) *oleic acid* dan (b) *stearic acid* masing-masing selama 200, 500, dan 1000 s (bidang potong Z: 0).

Distribusi panas dalam bahan maupun kaviti dipengaruhi karakteristik internal permitivitas dan sifat termal bahan, oleh posisi dari pusat bahan dan lama waktu pemanasan. Pada pemanasan secara transien *oleic acid* dan *stearic acid* hubungan konversi energi *microwave* menjadi panas dalam ruang dan waktu dengan asumsi tidak ada aliran masa dalam proses pemanasan dapat dijelaskan menggunakan persamaan transfer panas  $\rho C_p (\partial T / \partial t) + \nabla(-k \nabla T) = Q_{MW}$  [26, 38]. Persamaan ini menegaskan bahwa konduktivitas berperan penting memindahkan panas ke area pemanasan non volumetrik bahan. Jika laju difusi panas lokal bahan jauh lebih kecil daripada laju disipasi daya *microwave*, suhu akan meningkat dengan cepat membentuk *hot spot* [18].

Peningkatan suhu di dalam bahan lebih cepat dibandingkan peningkatan suhu diluar bahan. Pada penambahan durasi pemanasan yang lebih lama pola pemanasan masih memiliki bentuk yang sama, hanya persebaran area panas semakin membesar. Hal ini adalah akibat proses pemanasan volumetrik bahan menggunakan *microwave* akan menghasilkan kelajuan distribusi panas yang lebih tinggi dibandingkan dengan distribusi melalui proses transfer panas [18]. Distribusi panas bahan terhadap ruang dan waktu sangat berkaitan dengan pola distribusi medan listrik dalam bahan.

Pada model pemanasan penelitian ini distribusi energi panas dipengaruhi oleh generasi panas *microwave* dan kemampuan bahan untuk mentransfer panas. Selain itu dalam beberapa literatur dijelaskan banyak faktor yang berkontribusi terhadap panas yang dihasilkan *microwave* di dalam bahan yaitu, struktur fisik dan kimia bahan, frekuensi *microwave*, densitas, orientasi medan terhadap anisotropic bahan, refleksi interfacial permukaan bahan, intensitas medan listrik, geometri aplikator, geometri, ukuran dan sifat panas bahan, waktu pemanasan, dan kelembaban bahan [18, 22].

## 5. Kesimpulan

Berdasarkan pemaparan pada pembahasan dapat disimpulkan bahwa, simulasi pemanasan *microwave* untuk bahan telah berhasil dilakukan dan hasil simulasi menunjukkan distribusi energi tergantung pada permitivitas kompleks bahan.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Halu Oleo yang telah memberikan fasilitas dalam penyelesaian penelitian ini.

## Pustaka

- [1] J. Sun, W. Wang, and Q. Yue, Review on Microwave-Matter Interaction Fundamentals and Efficient Microwave-Associated Heating Strategies, *Materials*, vol. 9, no. 4, 2016, pp.231-256.
- [2] National Research Council, *Microwave Processing of Materials*, The National Academies Press, 1994.
- [3] V.K. Saxena, and U. Chandra, *Microwave Synthesis: a Physical Concept Microwave Heating*, Intech Open, 2011. Available from: <https://bit.ly/2SCXkxS>, accessed 10 April 2021.
- [4] C. Okeke, A.E. Abioye, and Y. Omosun, Microwave Heating Applications in Food Processing, *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 9, no. 4, 2014, pp. 29-34.
- [5] Y.F., Huang, Y.F., P.T. Chiueh, and S.L. Lo, A Review on Microwave Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass, *Sustainable Environment Research*, vol. 26, no. 3, 2016, pp. 103–109.
- [6] S. Horikoshi, R.F. Schiffmann, J. Fukushima, and N. Serpone, *Microwave Chemical and Materials Processing: A Tutorial*, Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2018.
- [7] A. Yahya, and R.M. Yunus, Influence of Sample Preparation and Extraction Time on Chemical Composition of Steam Distillation Derived Patchouli Oil, *Procedia Engineering*, vol. 53, 2013, pp 1-6.
- [8] Y. Wang, Z. Zeng, X. Tian, L. Dai, L. Jiang, S. Zhang, Q. Wu, P. Wen, G. Fu, Y. Liu, and R. Ruan, Production of Bio oil From Agricultural Waste by Using a Continuous Fast Microwave Pyrolysis System, *Bioresource Technology*, vol. 269, 2018, pp.162-168.
- [9] Q. Dong, H. Li, M. Niu, C. Luo, J. Zhang, B. Qi, and W. Zhong, Microwave Pyrolysis of Moso Bamboo for Syngas Production and Bio Oil Upgrading Over Bamboo-Based Biochar Catalyst, *Bioresource Technology*, vol. 266, 2018, pp. 284-290.
- [10] A. Hakim, W. Handoyo, and A. Prasetyo, Performa dan Analisis Konsumsi Energi Pengeringan Rumput Laut Menggunakan Energi Gelombang Mikro, *Jurnal Pascapanen dan Bioteknologi Kelautan dan Perikanan*, vol. 15, 2020, pp. 85-97.
- [11] Z. Zhang, T. Su, and S. Zhang, Shape Effect on the Temperature Field during Microwave Heating Process, *Journal of Food Quality*, 2018, pp. 1-24.
- [12] A.K. Datta, and R.C. Anantheswaran, *Handbook of Microwave Technology for Food Applications*, Marcel Dekker Inc., 2001.
- [13] D.M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4<sup>th</sup> ed. John Wiley and Sons Inc., 2011.
- [14] M.A. Hossain, P.B. Ganesan, S.C. Sandaran, S.B. Rozali, and S. Krishnasamy, Catalytic Microwave Pyrolysis of Oil Palm Fiber (OPF) for the Biochar Production, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 24, no. 34, 2017, pp. 26521-26533.
- [15] D. Prastiyanto, W. Astuti, A.W. Mahmud, Design of Microwave Applicator for Processing Biomass Waste, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1444, 2019, pp.1-12.
- [16] T. Santos, L.C. Costa, M. Valente, J. Monteiro, and J. Sousa, 3D Electromagnetic Field Simulation in Microwave Ovens: A Tool to Control Thermal Runaway, *Proceedings of the COMSOL Conference*, Paris, November 2010. Available from: <https://bit.ly/3j5EQ3V>, accessed 15 June 2021.



- [17] M. Regier, and H. Schubert, *Microwave Processing*, In: P. Richardson, Ed., *Thermal Technologies in Food Processing*, Woodhead Publishing Ltd, 2001, pp. 178-207.
- [18] G. Brodie, M.V. Jacob, and P. Farrell, P., *Dielectric Heating in Microwave and Radio-Frequency Technologies in Agriculture and Engineers*, De Gruyter, 2015, pp. 155-174.
- [19] P. Ratanadecho, P. Aoki, P., and M. Akahori, A Numerical and Experimental Investigation of The Modeling of Microwave Heating for Liquid Layers Using a Rectangular Waveguide (Effects of Natural Convection And Dielectric Properties), *Applied Mathematical Modelling*, vol. 26, 2015, pp. 449-472.
- [20] Aa. Barba, and M. D'amore, *Relevance of Dielectric Properties in Microwave Assisted Processes*, In: Sandra Costanzo, Ed., *Microwave materials characterization*, IntechOpen, 2012, PP. 91-118.
- [21] A.F. Harvey, Standard Waveguides and Couplings for Microwave Equipment. *Proceedings of the IEE - Part B: Radio and Electronic Engineering*, vol. 102, no. 4, 1955, pp. 493-499.
- [22] W. Ma, T. Hong, T. Xie, F. Wang, B. Luo, J. Zhou, Y. Yang, H. Zhu, and K. Huang, Simulation and Analysis of Oleic Acid Pretreatment for Microwave-Assisted Biodiesel Production, *Processes*, vol. 6, 2018, pp. 1-16.
- [23] W.E. O'Connor, R. Warzoha, R. Weigand, A.S. Fleischer, and A.P. Wemhoff, Thermal Property Prediction and Measurement of Organic Phase Change Materials in The Liquid Phase Near the Melting Point, *Applied Energy*, vol. 132, 2014, pp. 496-506.
- [24] J. Thomas, M. William and R. David, *Handbook of Chemistry and Physics: A Ready-Reference Book of Chemical and Physical Data*, CRC Press, 2016.
- [25] R.S. Phadke, Studies in The Dielectric Constants of Fatty Acids, *Journal of The Indian Institute of Science*, vol. 34, 1952, pp. 293-304.
- [26] M. Tuhkala, J. Juuti, and H. Jantunen, Determination of Complex Permittivity of Surfactant Treated Powders Using an Open-Ended Coaxial Cavity Resonator, *Powder Technology*, vol. 256, 2014, pp. 140-145.
- [27] I. Sarbu, and A. Dorca, Review on heat transfer analysis in thermal energy storage using latent heat storage systems and phase change materials, *International Journal of Energy Research*, vol. 43, 2018, pp. 29-64.
- [28] CST, *Work & Solver Overview*, CST Studio Suite, 2015.
- [29] J. Tang, and T. Chan, *Heat Transfer in Food Processing*, WIT Press, 2007.
- [30] J. Tang, Unlocking Potentials of Microwaves for Food Safety and Quality, *Journal of Food Science*, vol. 80, 2015, pp. 1776-1793.
- [31] J. Houšová, and K. Hoke, Microwave Heating – the Influence of Oven and Load Parameters on the Power Absorbed in the Heated Load, *Czech J. Food Sci*, vol. 20, no. 3, 2002, pp. 117-124.
- [32] H.W. Xiao, H. Xue, H. Xu, X. Wang, L. Shen, H. Liu, C. Liu, Q. Qin, X. Zheng, and Q. Li, Effects of Microwave Power on Extraction Kinetic of Anthocyanin from Blueberry Powder considering Absorption of Microwave Energy, *Journal of Food Quality*, vol. 2018, 2018, pp.1-13.
- [33] D. Luan, J. Tang, P.D. Pedrow, F. Liu, and Z. Tang, Analysis of Electric Field Distribution within A Microwave Assisted Thermal Sterilization (MATS) System by Computer Simulation, *Journal of Food Engineering*, vol. 188, 2016, pp. 87-97.
- [34] S. Gadkari, B. Fidalgo, and S. Gu, Numerical Investigation of Microwave-Assisted Pyrolysis of Lignin, *Fuel Processing Technology*, vol. 156, 2017, pp. 473-484.
- [35] Z. Zhang, T. Su, and S. Zhang, Shape Effect on The Temperature Field During Microwave Heating Process, *Journal of Food Quality*, vol. 2018, 2018, pp. 1-24.
- [36] Z. Peng, Heat Transfer in Microwave Heating, *Doctoral Dissertation*, Material Science and Engineering, Michigan Technological University, 2018.
- [37] U. Erle, P. Pesheck, and M. Lorence, *Development of Packaging and Products for Use in Microwave Ovens*, 2<sup>nd</sup> ed. Woodhead Publishing in Materials, Elsevier, 2020.
- [38] G.S.J. Sturm Nigar, B. Garcia-Baños, F.L. Peñaranda-Foix, J.M. Catalá-Civera, R. Mallada, A. Stankiewicz, and J. Santamaría, Numerical Analysis of Microwave Heating Cavity: Combining Electromagnetic Energy, Heat Transfer and Fluid Dynamics for a NaY Zeolite Fixed-Bed, *Applied Thermal Engineering*, vol. 155, 2019, pp. 226-238.