

# Simulasi Pencitraan Logam dengan Antena *Bowtie* Terkopel Bolometer pada Radiasi Gelombang THz

## (*Imaging Simulation of Metal with Bowtie Antenna coupled Bolometer for THz Wave Radiation*)

Catur Apriono<sup>1</sup>, Hendry Steven Marbun<sup>2</sup>

**Abstract**—Air transportation is one of transportation modes with a significant increase in the number of passengers. However, air transportation sometimes is threatened by terrorism act and sabotages, mostly caused by negligence in detecting dangerous metal items. THz wave can be used as imaging because it is safe and has a high spatial resolution. However, THz waves are vulnerable to diffraction. In this paper, diffraction studies and metal imaging simulations of THz waves were carried out using CST Microwave Studio software. The simulation used a bowtie antenna-coupled bolometer as a sensor, due to its simple design and wide bandwidth. Simulations were carried out with various types of antennas with working frequencies of 1 THz, 3 THz, and 5 THz. Variations of plane wave polarization (Ex and Ey polarization) were also performed for each type of antennas. Simulations with increased frequency produce more accurate images because they have smaller diffraction effect and greater spatial resolution. Simulations with Ex polarization produces a better image in contrast because it has a parallel movement of the electric field with the sensor.

**Intisari**—Transportasi udara merupakan salah satu moda transportasi dengan peningkatan jumlah penumpang yang signifikan. Namun, dalam perkembangannya moda ini rawan aksi terorisme dan sabotase, yang sebagian besar disebabkan oleh kelalaian dalam mendeteksi barang logam berbahaya. Gelombang THz dapat digunakan sebagai pencitraan karena aman, memiliki resolusi spasial yang tinggi, tetapi rentan akan efek difraksi. Pada makalah ini dilakukan studi difraksi dan simulasi pencitraan logam gelombang THz dengan perangkat lunak CST Microwave Studio. Sensor yang digunakan dalam simulasi adalah antena *bowtie* terkopel bolometer karena desainnya yang sederhana dan *bandwidth* yang lebar. Simulasi dilakukan dengan variasi jenis antena yang memiliki frekuensi kerja 1 THz, 3 THz, dan 5 THz. Variasi jenis polarisasi *plane wave* (polarisasi Ex & Ey) juga dilakukan untuk masing-masing jenis antena. Simulasi dengan peningkatan frekuensi menghasilkan citra yang lebih akurat karena memiliki efek difraksi yang lebih kecil dan resolusi spasial yang lebih besar. Simulasi dengan polarisasi Ex menghasilkan citra yang lebih baik dalam kontras karena memiliki arah pergerakan medan listrik yang sejajar dengan sensor yang digunakan.

**Kata Kunci**—Pencitraan, Terahertz, Logam, Difraksi, Antena, *Bowtie*, Bolometer.

<sup>1,2</sup> Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Kampus UI Depok 16424 INDONESIA (telp: 021-7270078; fax: 021-7270077; e-mail: <sup>1</sup>catur@eng.ui.ac.id, <sup>2</sup>hendrymarboen@gmail.com)

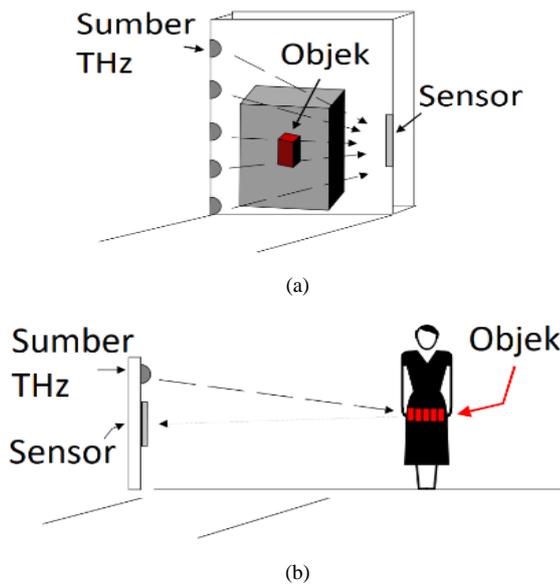
### I. PENDAHULUAN

Teknologi Terahertz (THz) merupakan teknologi nirkabel di masa depan karena memiliki *bandwidth* yang sangat lebar dan spektrum yang masih tidak berlisensi. Gelombang THz sendiri adalah gelombang elektromagnetik yang berada pada rentang frekuensi 0,1-10 THz [1]. Di masa lalu, pengembangan teknologi THz belum pesat karena keterbatasan sumber dan detektor yang bekerja baik secara efektif dan sensitif [2], [3]. Saat ini, penelitian dan pengembangan teknologi THz menjangkau berbagai aplikasi, seperti keamanan [4]-[6], farmasi [7], *Non-Destructive Testing* (NDT) [8], [9], dan industri kesehatan [10].

Keamanan merupakan suatu parameter yang perlu dipertimbangkan, terutama di dunia penerbangan [4]. Pada saat ini, masyarakat telah lebih banyak memilih transportasi udara sebagai sarana untuk bepergian, melakukan bisnis, dan aktivitas lainnya. Dalam perkembangan transportasi udara, peristiwa/tragedi selama beberapa dekade terakhir menunjukkan perlunya pemeriksaan keamanan dan deteksi barang tersembunyi yang lebih efektif [4]. Berbagai teknologi telah diterapkan dalam melakukan pemeriksaan keamanan untuk mendeteksi dan mencitrakan keberadaan setiap barang berbahaya, seperti senjata, bahan peledak, obat-obatan terlarang, dan barang ilegal lainnya. Dua teknologi yang umumnya diterapkan di bandara sebagai sistem keamanan adalah teknologi *X-ray backscatter* dan teknologi *millimeter-wave*.

Teknologi *X-ray backscatter* untuk sistem keamanan bandara berbeda dengan *X-ray* medis yang menghasilkan gelombang dengan panjang gelombang sekitar 100 pm dan radiasi sebesar 0,02-0,03  $\mu$ Sv. Meskipun jumlah radiasi cukup kecil, radiasi tersebut tergolong radiasi ionisasi yang dapat mengancam kesehatan manusia, terutama untuk *frequent flyer*, seperti pilot dan pramugari [11], [12]. Hasil pencitraan dari teknologi ini sangat akurat karena penggunaan frekuensi yang sangat tinggi, hingga dapat mencitrakan tubuh manusia, sehingga muncul isu-isu privasi dalam penerapannya [4].

Teknologi *millimeter-wave* menghasilkan gelombang elektromagnetik dalam kisaran panjang gelombang 0,1-1 mm. Panjang gelombang ini lebih panjang daripada teknologi *X-ray backscatter* dan tidak memancarkan radiasi ionisasi, sehingga lebih aman bagi manusia. Namun, teknologi ini menghasilkan gambar yang tidak seakurat teknologi sebelumnya. Panjang gelombang yang besar mengurangi resolusi spasial dan memerlukan jarak yang dekat [1].

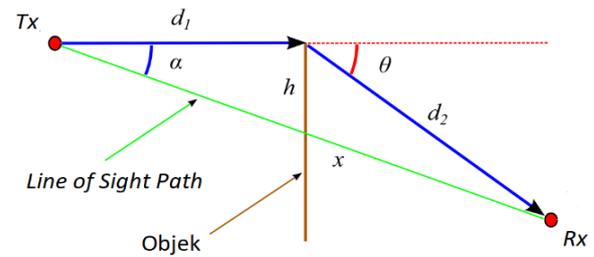


Gbr. 1 Ilustrasi pencitraan THz, (a) mode transmisi, (b) mode refleksi.

Teknologi THz menawarkan opsi alternatif dari masalah yang timbul dengan radiasi elektromagnetik yang lebih panjang dari teknologi *X-ray backscatter*, cukup panjang untuk menembus pakaian, tetapi cukup pendek untuk memberikan resolusi tinggi dengan daya yang sangat rendah [4]. Selain itu, teknologi ini tidak terpengaruh oleh debu, kabut, dan hujan [13]. Radiasi yang diproduksi bukanlah radiasi ionisasi, sehingga aman untuk jaringan manusia [14].

Gbr. 1 menunjukkan dua metode pencitraan THz, yaitu mode transmisi dan mode refleksi [1]. Perbedaan utama kedua metode adalah posisi objek dalam sistem. Pada mode transmisi, objek berada di antara sumber dan sensor. Sumber gelombang THz menghasilkan radiasi yang diarahkan ke objek, lalu sensor mendeteksi gelombang yang mengenai objek. Sementara itu, pada metode mode refleksi, sumber dan sensor berada di bidang yang sama dengan perbedaan posisi dan tinggi. Metode ini bekerja dengan menghasilkan gelombang THz di sumber yang akan mengenai objek. Dengan efek reflektif dari objek, gelombang dipantulkan dan diterima oleh sensor.

Pada makalah ini diusulkan rancangan simulasi pencitraan objek logam dengan penerapan mode transmisi menggunakan sumber radiasi gelombang permukaan (*plane wave*) di spektrum frekuensi THz dengan antenna jenis *bowtie* terkopel bolometer sebagai komponen sensor untuk mendeteksi radiasi di tiap piksel. Selain lebih sederhana dalam desain dan observasi, metode ini juga menawarkan keefektifan dalam pencitraan dengan kuantitas yang rendah, seperti dimensi logam [15]-[17]. Penggunaan antenna *bowtie* memberikan alternatif pada penerimaan radiasi gelombang elektromagnetik yang lebih luas dikarenakan karakteristik jenis antenna yang bersifat *omnidirectional*, sedangkan bolometer merupakan komponen sensor yang berbasis pada perubahan suhu dan merupakan kandidat untuk sensor gelombang THz di lingkungan suhu ruang. Dalam simulasi dilakukan variasi jarak sensor terhadap objek, variasi jenis antenna sebagai sensor, dan variasi arah polarisasi radiasi *plane wave*. Simulasi skenario pertama dilakukan tanpa menggunakan sensor untuk



Gbr. 2 Ilustrasi difraksi ujung tajam (*knife edge diffraction*).

mengetahui efek difraksi yang terjadi pada pencitraan dengan radiasi gelombang THz dan mengetahui karakteristik jarak yang dapat terhindar dari pengaruh difraksi. Skenario simulasi kedua dilakukan dengan menempatkan sensor berupa antenna *bowtie* terkopel bolometer pada jarak yang didapat melalui simulasi sebelumnya. Data-data yang diperoleh dari simulasi diolah dan direpresentasikan melalui gambar dua dimensi hasil pencitraan.

## II. DIFRAKSI UJUNG TAJAM (*KNIFE EDGE DIFFRACTION*) DAN ANTENA *BOWTIE* TERKOPEL BOLOMETER SEBAGAI SENSOR

### A. Difraksi Ujung Tajam (*Knife Edge Diffraction*)

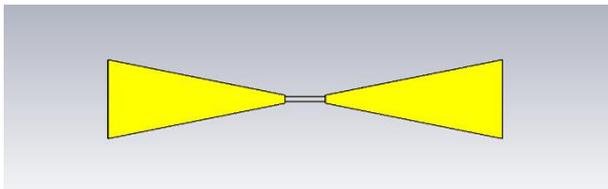
Salah satu isu yang dapat ditemukan dalam melakukan pencitraan THz adalah adanya efek difraksi [18]. Difraksi merupakan suatu fenomena yang dijelaskan berdasarkan prinsip Huygens, yang dapat diartikan sebagai fenomena pembelokan suatu gelombang di sekitar tepi penghalang atau lubang (bukaan) [19].

Difraksi ujung tajam (*knife-edge diffraction*) merupakan masalah yang umum terjadi ketika terdapat suatu objek pada jalur propagasi suatu gelombang yang terdapat di antara *transmitter* dan *receiver*, ketika ujung objek tersebut menjadi sumber kedua dari propagasi gelombang [18]. Difraksi ujung tajam dapat dimodelkan seperti pada Gbr. 2 [18]. Faktor-faktor yang terdapat pada model difraksi ujung tajam mencakup  $x$  (panjang dari *Line of Sight (LOS) path* antara *transmitter* dan *receiver*),  $\alpha$  (sudut antara *transmitter* dan *receiver*, dalam radian),  $h$  (ketinggian yang diukur dari perpotongan  $x$  dengan objek sampai ujung atas objek),  $d_1$  (jarak antara *transmitter* dengan objek),  $d_2$  (jarak antara objek dengan *receiver*), dan  $\theta$  (sudut difraksi dalam radian).

Nilai daya yang diterima (*received power*) pada *receiver* ketika terjadi difraksi ujung tajam dapat dihitung menggunakan (1) sampai (4). Jika nilai  $v$  lebih besar dari 0,78, digunakan (5) untuk mendapatkan nilai  $J(v)$ . Persamaan (6) merupakan persamaan untuk menghitung nilai daya yang diterima yang terdapat di daerah observasi [20].

### B. Antena *Bowtie* Terkopel Bolometer sebagai Sensor

Makalah ini memperhitungkan penggunaan antenna *bowtie* terkopel bolometer sebagai sensor dalam pencitraan dengan radiasi gelombang THz. Antenna menggunakan dua *patch* segitiga. *Patch* segitiga disusun dalam kondisi geometri yang berhadapan dengan bentuk seperti dasi kupu-kupu (*bowtie*). Kelebihan antenna ini adalah desain yang sederhana dan *bandwidth* yang lebar [21], [22].



Gbr. 3 Antena *bowtie* terkopel bolometer satu elemen dengan material emas.

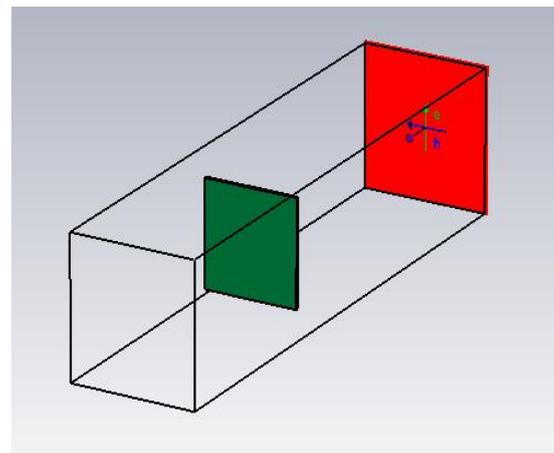
Gbr. 3 menunjukkan ilustrasi antena *bowtie* terkopel bolometer satu elemen dengan memperhitungkan bahan emas karena memiliki nilai konduktivitas yang tinggi. Sebuah bolometer diletakkan di antara kedua bagian antena yang saling berhadapan. Bolometer ini memiliki fungsi sebagai komponen observasi energi yang ditangkap oleh antena. Bolometer yang digunakan merupakan jenis *lossy metal* dengan nilai resistivitas  $8,75 \times 10^{-6} \Omega m$ . Penggunaan antena *bowtie* terkopel bolometer sebagai sensor dalam simulasi pencitraan dilakukan karena antena tersebut memiliki cakupan penerimaan gelombang radiasi yang cukup besar. Selain itu, antena *bowtie* terkopel bolometer dinilai memiliki sensitivitas yang tinggi dan cocok digunakan sebagai sensor pada pencitraan radiasi gelombang THz [21], [22].

III. PERANCANGAN SIMULASI PENCITRAAN THZ

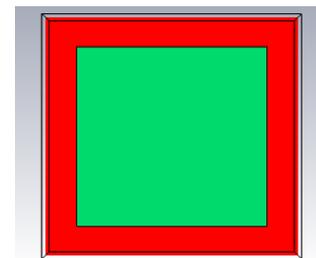
A. Perancangan Simulasi Pencitraan THz Tanpa Sensor

Simulasi tanpa sensor dilakukan untuk observasi daya pada daerah bayangan (*shadow region*) dan mempelajari efek difraksi yang muncul. Komponen yang digunakan adalah sumber radiasi gelombang berupa *plane wave* sebagai sumber radiasi dan logam berbentuk kotak sebagai objek citra. *Plane wave* pada simulasi memiliki amplitudo sebesar 1 V/m dan diletakkan sejauh 1.000  $\mu m$  dari logam. Logam memiliki bentuk kotak. Panjang, lebar, dan ketebalan logam kotak tersebut adalah 300  $\mu m$ , 300  $\mu m$ , dan 10  $\mu m$ . Material logam yang diperhitungkan adalah nikel.

Gbr. 4 menunjukkan ilustrasi tampak samping dan tampak depan dari simulasi pencitraan THz tanpa menggunakan sensor. *Plane wave* pada simulasi ditandai dengan bidang persegi berwarna merah. Logam kotak yang digunakan sebagai objek citra ditandai dengan bidang persegi berwarna hijau.



(a)



(b)

Gbr. 4 Ilustrasi simulasi pencitraan THz tanpa menggunakan sensor, (a) tampak samping, (b) tampak depan.

TABEL I  
KONDISI PADA SIMULASI PENCITRAAN THZ TANPA SENSOR

Logam	
Material	Nikel
Ukuran	300 × 300 × 10 $\mu m$
Plane wave	
Amplitudo	1 V/m
Boundary Box	
Sumbu-x	50 $\mu m$
Sumbu-y	50 $\mu m$
Sumbu-z	650 $\mu m$ –1.000 $\mu m$

$$x = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 - 2d_1d_2 \cos(\pi - \theta)} \tag{1}$$

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{d_1^2 + x^2 - d_2^2}{2xd_1}\right) \tag{2}$$

$$h = d_1 \tan \alpha \tag{3}$$

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right)} \tag{4}$$

$$J(v) = 6,9 + 20 \log(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1) \text{ dB} \tag{5}$$

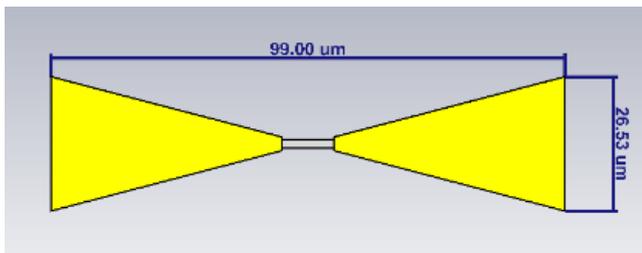
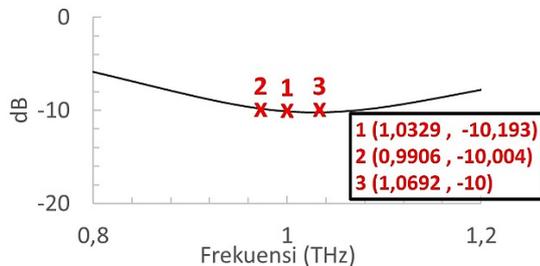
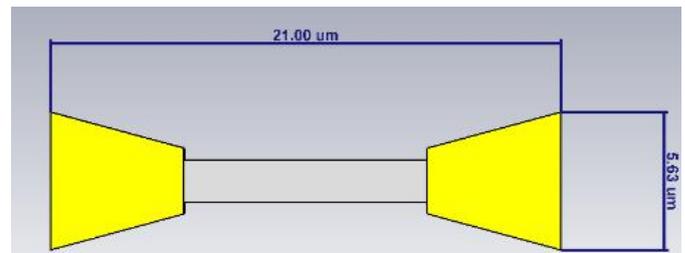
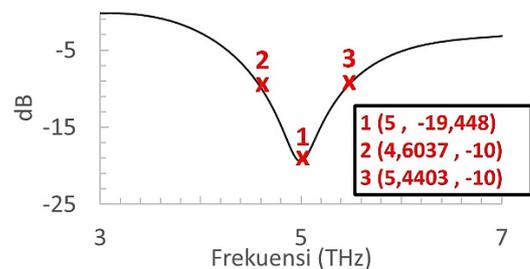
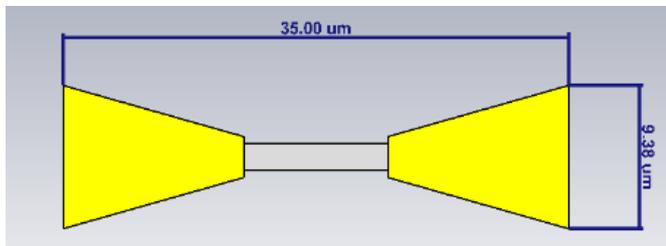
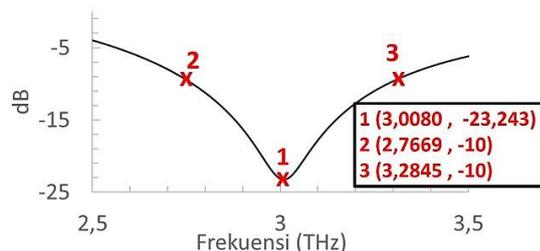
$$RP \text{ (dB)} = -25,9176 - J(v) \text{ (dB)} \tag{6}$$

Tabel I menunjukkan kondisi yang diperhitungkan dalam perancangan simulasi tanpa sensor. Nikel digunakan karena merupakan salah satu komponen yang umum dicampurkan pada baja sebagai material utama senjata api. Dimensi logam

yang didesain adalah dalam satuan  $\mu m$  mengingat frekuensi radiasi yang digunakan berada dalam spektrum THz. *Boundary box* merupakan batasan daerah dalam simulasi, diukur dari ujung terluar logam kotak yang digunakan. *Boundary box* memiliki nilai pada setiap sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z, mengingat logam yang didesain dalam bentuk tiga dimensi. Nilai *boundary box* maksimum memiliki arah pada sumbu positif dan nilai *boundary box* minimum memiliki arah pada sumbu negatif.

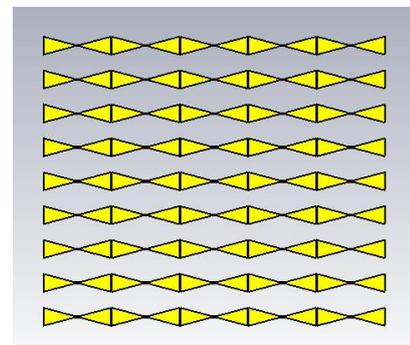
B. Perancangan Simulasi Pencitraan THz dengan Menggunakan Sensor

Pada bagian ini dilakukan diskusi perancangan simulasi pencitraan THz menggunakan sensor dengan melakukan variasi jenis sensor yang digunakan. Jenis sensor yang digunakan adalah antena *bowtie* terkopel bolometer dengan frekuensi kerja 1 THz, 3 THz, dan 5 THz.

Gbr. 5 Antena *bowtie* terkopel bolometer dengan frekuensi kerja 1 THz.Gbr. 6. *Return loss* ( $S_{11}$ ) antena *bowtie* dengan frekuensi kerja 1 THz.Gbr. 9 Antena *bowtie* terkopel bolometer dengan frekuensi kerja 5 THz.Gbr. 10 *Return loss* ( $S_{11}$ ) antena *bowtie* dengan frekuensi kerja 5 THz.Gbr. 7 Antena *bowtie* terkopel bolometer dengan frekuensi kerja 3 THz.Gbr. 8 *Return loss* ( $S_{11}$ ) antena *bowtie* dengan frekuensi kerja 3 THz.

Gbr. 5 menunjukkan ilustrasi antena *bowtie* terkopel bolometer dengan frekuensi kerja 1 THz. Antena tersebut memiliki dimensi panjang, lebar, dan tebal masing-masing sebesar 99  $\mu\text{m}$ , 26,5  $\mu\text{m}$ , dan 1  $\mu\text{m}$ . Gbr. 6 menunjukkan hasil simulasi parameter *return loss* ( $S_{11}$ ) dari antena *bowtie* dengan desain seperti pada Gbr. 5. Hasil simulasi  $S_{11}$  menunjukkan antena tersebut memiliki *bandwidth* 0,99–1,07 THz dengan frekuensi resonansi terbaik pada 1,0329 THz.

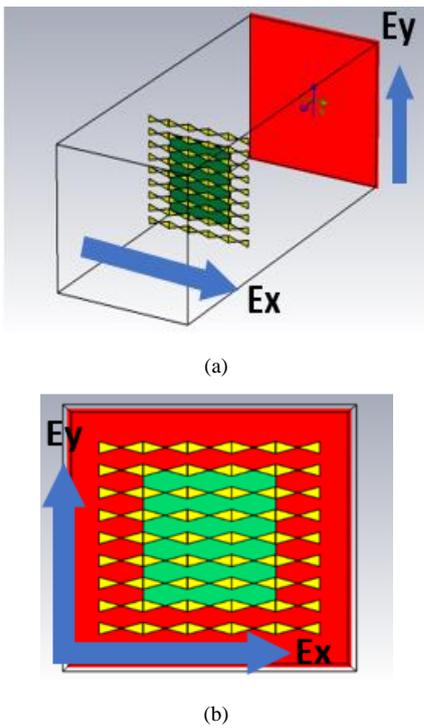
Gbr. 7 menunjukkan ilustrasi antena *bowtie* terkopel bolometer dengan frekuensi kerja 3 THz. Antena tersebut memiliki dimensi panjang, lebar, dan tebal masing-masing sebesar 35  $\mu\text{m}$ , 9,38  $\mu\text{m}$ , dan 1  $\mu\text{m}$ . Gbr. 8 menunjukkan hasil simulasi  $S_{11}$  dari antena *bowtie* dengan desain pada Gbr. 7. Hasil simulasi  $S_{11}$  menunjukkan antena tersebut memiliki *bandwidth* 2,76–3,28 THz dengan frekuensi resonansi terbaik pada 3,008 THz.

Gbr. 11 Konfigurasi 9  $\times$  5 antena *bowtie* terkopel bolometer sebagai sensor.

Gbr. 9 menunjukkan ilustrasi antena *bowtie* terkopel bolometer dengan frekuensi kerja 5 THz. Antena tersebut memiliki dimensi panjang, lebar, dan tebal sebesar 21  $\mu\text{m}$ , 5,53  $\mu\text{m}$ , dan 1  $\mu\text{m}$ . Gbr. 10 menunjukkan hasil simulasi  $S_{11}$  dari antena *bowtie* dengan desain pada Gbr. 9. Hasil simulasi  $S_{11}$  menunjukkan antena tersebut memiliki *bandwidth* 4,60–5,44 THz dengan frekuensi resonansi terbaik pada 5 THz.

Masing-masing antena terkopel dengan bolometer dari jenis *lossy metal* yang memiliki nilai resistivitas  $8,75 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ . Antena tersebut kemudian dimultiplikasi menjadi 45 elemen dan disusun dengan konfigurasi 9  $\times$  5. Multiplikasi dan penempatan dengan konfigurasi 9  $\times$  5 dilakukan untuk menyesuaikan antena dengan posisi dan ukuran logam kotak. Masing-masing elemen berperan sebagai piksel pada hasil citra. Gbr. 11 menunjukkan ilustrasi konfigurasi 9  $\times$  5 antena *bowtie* terkopel bolometer sebagai sensor pada sistem simulasi. Masing-masing jenis antena *bowtie* terkopel bolometer dengan frekuensi kerja 1 THz, 3 THz, dan 5 THz disusun sedemikian rupa sebagai sensor pada sistem simulasi.

Ilustrasi dari perancangan simulasi pencitraan THz dengan menggunakan sensor ditunjukkan pada Gbr. 12(a), yang menunjukkan tampak samping, dan Gbr. 12(b), yang menunjukkan tampak depan simulasi pencitraan. Pada masing-



Gbr. 12 Ilustrasi simulasi pencitraan THz, (a) tampak samping, (b) tampak depan.

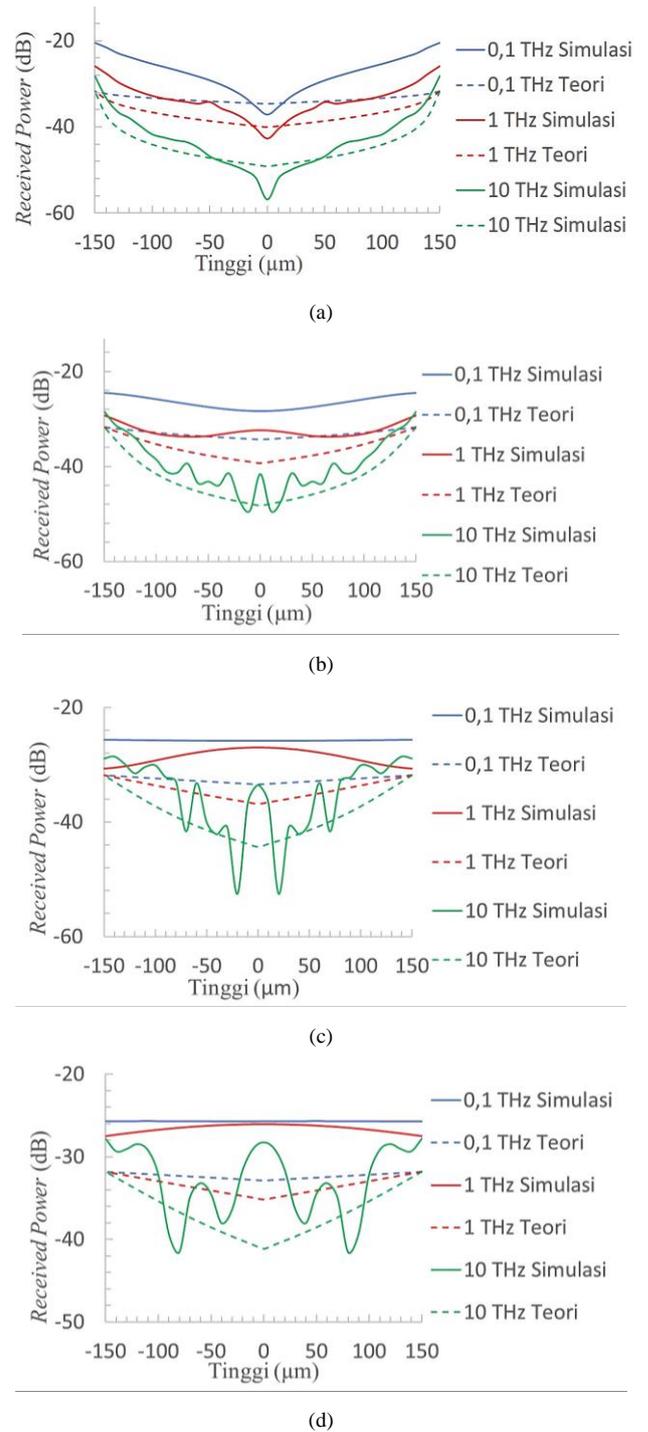
masing jenis sensor yang digunakan, dilakukan variasi jenis polarisasi *plane wave* menjadi polarisasi horizontal ( $E_x$ ) dan polarisasi vertikal ( $E_y$ ). Penamaan jenis polarisasi tersebut mengacu kepada arah pergerakan osilasi medan listrik *plane wave*.

IV. PENCITRAAN THZ TANPA MENGGUNAKAN SENSOR

Pada bagian ini dilakukan simulasi dan kalkulasi secara teori tanpa menggunakan sensor. Simulasi dan kalkulasi secara teori dilakukan dengan variasi jarak terhadap logam ( $z$ ), yaitu 10  $\mu\text{m}$ , 25  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 75  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ , 450  $\mu\text{m}$ , dan 600  $\mu\text{m}$ . Hasil simulasi dan kalkulasi kemudian dibandingkan dan direpresentasikan dalam bentuk grafik nilai daya pada frekuensi 0,1 THz, 1 THz, dan 10 THz.

Gbr. 13 menunjukkan perbandingan *received power* dari hasil simulasi dan teori pada jarak  $z$  sebesar 10  $\mu\text{m}$ , 75  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ , dan 600  $\mu\text{m}$ . Hasil simulasi dan kalkulasi secara teori semakin berbeda seiring dengan peningkatan jarak  $z$ . Perbedaan yang signifikan terjadi pada tinggi 0  $\mu\text{m}$  (titik tengah logam). Hasil simulasi menunjukkan adanya peningkatan nilai daya pada titik tengah, sedangkan hasil kalkulasi tidak menunjukkan peningkatan intensitas daya. Perbedaan tersebut terjadi karena kalkulasi menggunakan (1) sampai (6) tidak memperhitungkan *Poisson spot* yang terjadi pada gambar dua dimensi (2D).

*Fresnel number* merupakan sebuah parameter yang memiliki kaitan dengan *Poisson spot* dan digunakan dalam menentukan jarak  $z$  dalam pencitraan [16]. *Fresnel number* dapat dikalkulasikan dengan membandingkan nilai dimensi logam sebagai objek citra (b) dengan nilai jarak ( $z$ ) dan panjang gelombang ( $\lambda$ ), seperti pada (7). Nilai *Fresnel number* dalam pencitraan dapat menentukan kualitas citra yang dihasilkan



Gbr. 13 Perbandingan *received power* simulasi dan teori dengan variasi jarak  $z$ , (a)  $z = 10 \mu\text{m}$ , (b)  $z = 75 \mu\text{m}$ , (c)  $z = 300 \mu\text{m}$ , (d)  $z = 600 \mu\text{m}$ .

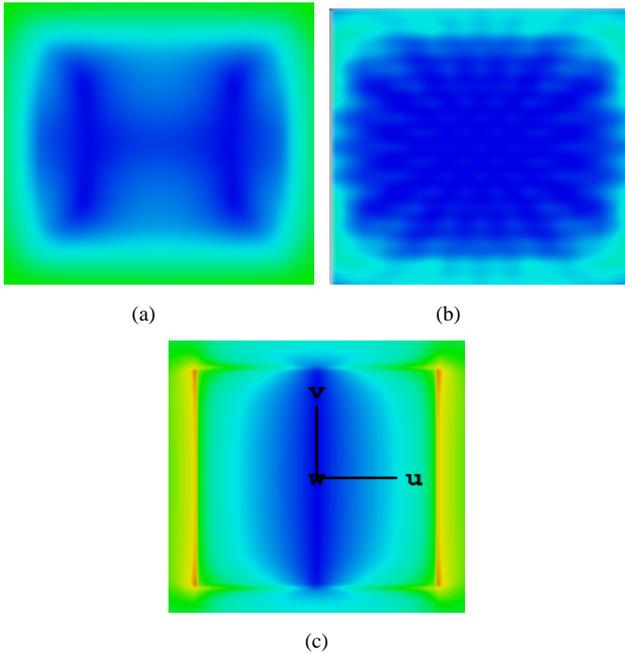
[16]. Tabel II menunjukkan hubungan antara nilai *Fresnel number* dengan citra yang dihasilkan [16]. Dengan menggunakan (7), didapatkan batasan-batasan berupa jarak  $z$  pada masing-masing kondisi radiasi 0,1 THz, 1 THz, dan 10 THz, seperti yang ditunjukkan pada Tabel III. Batasan-batasan jarak  $z$  tersebut digunakan untuk melakukan observasi nilai daya menggunakan gambar dua dimensi pada jarak  $z$  yang telah ditentukan untuk masing-masing kondisi.

TABEL II  
HUBUNGAN ANTARA NILAI *FRESNEL NUMBER* DENGAN HASIL CITRA

$Nf > 10$	Hasil citra sama dengan objek
$2 < Nf < 10$	Hasil citra hampir sama dengan objek dan <i>Poisson spot</i> mulai muncul
$Nf < 2$	Hasil citra terdapat <i>Poisson spot</i> dan sudah terpengaruh oleh efek difraksi

TABEL III  
BATASAN JARAK  $z$  PADA FREKUENSI 0,1 THZ, 1 THZ, DAN 10 THZ

	$Nf > 10$	$2 < Nf < 10$	$Nf < 2$
<b>0,1 THz</b>	$z < 3 \mu\text{m}$	$3 \mu\text{m} < z < 15 \mu\text{m}$	$z > 15 \mu\text{m}$
<b>1 THz</b>	$z < 30 \mu\text{m}$	$30 \mu\text{m} < z < 150 \mu\text{m}$	$z > 150 \mu\text{m}$
<b>10 THz</b>	$z < 300 \mu\text{m}$	$300 \mu\text{m} < z < 1.500 \mu\text{m}$	$z > 1.500 \mu\text{m}$

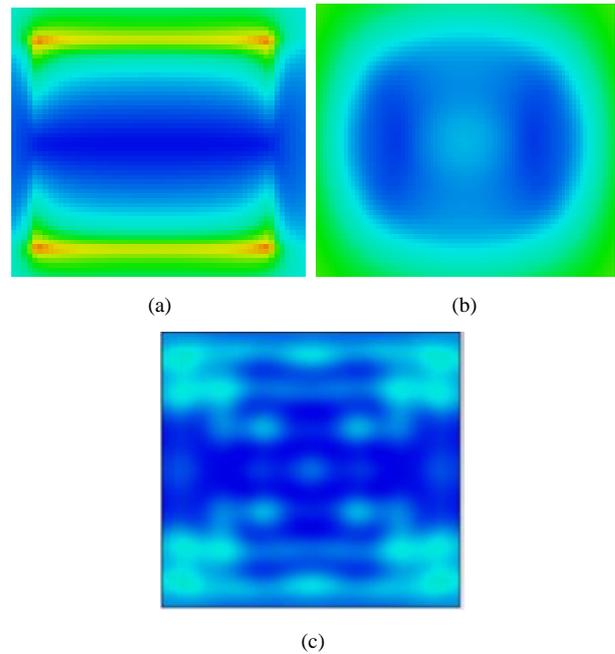


Gbr. 14 Gambar 2D ketika  $Nf > 10$  pada berbagai frekuensi, (a) frekuensi 0,1 THz, (b) frekuensi 1 THz, (c) frekuensi 10 THz.

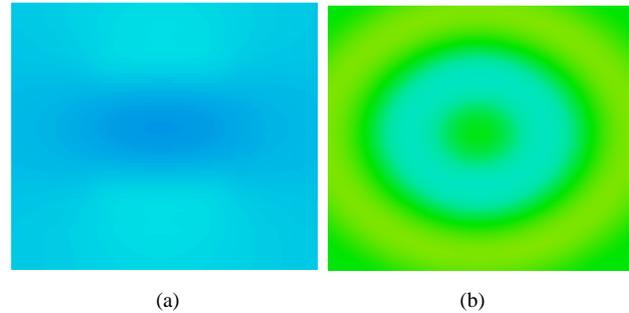
$$Nf = \frac{b^2}{z \lambda} \tag{7}$$

Gbr. 14 menunjukkan hasil dalam gambar dua dimensi ketika  $Nf > 10$ . Gbr. 14(a) menunjukkan gambar dua dimensi hasil simulasi pada frekuensi radiasi 0,1 THz dengan memperhitungkan jarak  $z = 2 \mu\text{m}$ . Gbr. 14(b) menunjukkan gambar dua dimensi hasil simulasi pada frekuensi radiasi 1 THz pada jarak  $z = 25 \mu\text{m}$ . Gbr. 14(c) menunjukkan gambar dua dimensi hasil simulasi pada frekuensi 10 THz dengan memperhitungkan jarak  $z = 150 \mu\text{m}$ . Ketiga gambar tersebut menunjukkan bahwa hasil citra menyerupai logam kotak yang digunakan sebagai objek.

Gbr. 15(a) menunjukkan gambar dua dimensi hasil simulasi pada frekuensi radiasi 0,1 THz dengan memperhitungkan jarak  $z = 10 \mu\text{m}$ . Gbr. 15(b) menunjukkan gambar dua dimensi hasil simulasi pada frekuensi radiasi 1 THz pada jarak  $z = 75 \mu\text{m}$ . Gbr. 15(c) menunjukkan gambar dua dimensi hasil simulasi pada frekuensi 10 THz dengan memperhitungkan jarak  $z = 600 \mu\text{m}$ . Berdasarkan variasi nilai daya pada ketiga gambar



Gbr. 15 Gambar 2D ketika  $2 < Nf < 10$  pada beberapa frekuensi, (a) frekuensi 0,1 THz, (b) frekuensi 1 THz, (c) frekuensi 10 THz.



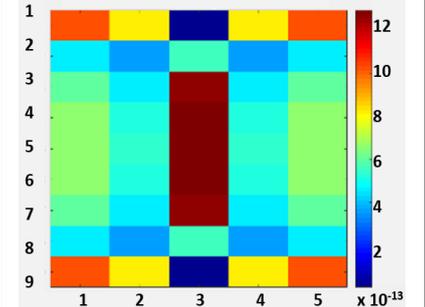
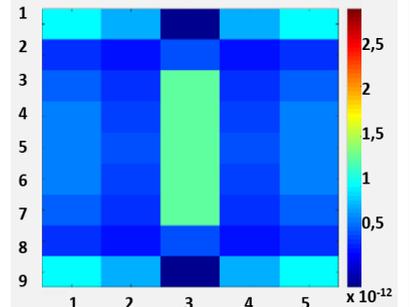
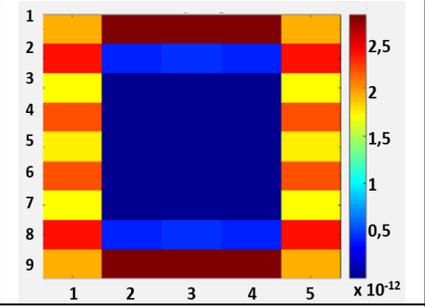
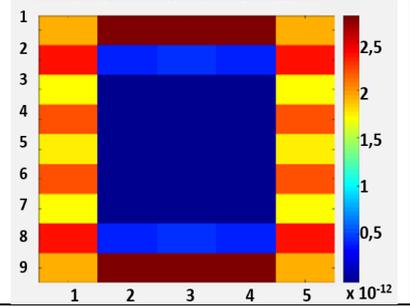
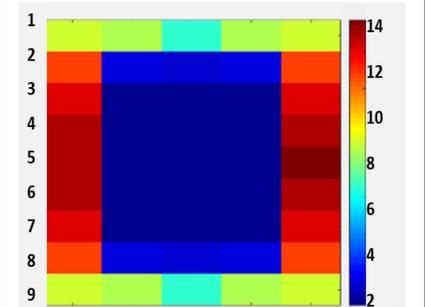
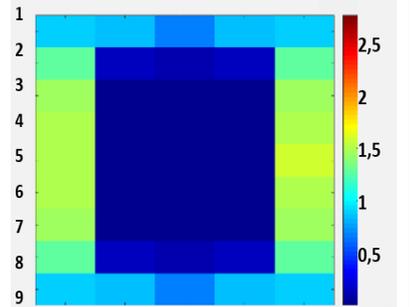
Gbr. 16 Gambar 2D ketika  $Nf < 2$  pada beberapa frekuensi, (a) frekuensi 0,1 THz, (b) frekuensi 1 THz.

tersebut, didapatkan hasil citra dengan *Poisson spot*. Walaupun *Poisson spot* hadir pada gambar, hasil citra masih menyerupai bentuk logam kotak yang digunakan sebagai objek citra.

Gbr. 16 menunjukkan hasil dalam gambar dua dimensi ketika  $Nf < 2$ . Gbr. 16(a) menunjukkan gambar dua dimensi hasil simulasi pada frekuensi radiasi 0,1 THz dengan menggunakan jarak  $z = 50 \mu\text{m}$ . Gbr. 16(b) menunjukkan gambar dua dimensi hasil simulasi pada frekuensi radiasi 1 THz pada jarak  $z = 450 \mu\text{m}$ . Pengamatan dengan frekuensi 10 THz tidak dapat dilakukan karena harus menggunakan jarak  $z > 300 \mu\text{m}$ . Sistem simulasi yang digunakan memiliki batasan hanya dapat melakukan pengamatan sampai dengan jarak  $z = 650 \mu\text{m}$ . Berdasarkan variasi nilai daya pada kedua gambar tersebut, didapatkan hasil citra dengan *Poisson spot* dengan intensitas yang sangat besar. Intensitas *Poisson spot* pada jarak tersebut menyebabkan hasil citra sangat berbeda dengan logam kotak yang digunakan sebagai objek citra.

Hasil observasi dengan ketiga kondisi tersebut menunjukkan bahwa dengan menggunakan jarak  $z$  ketika  $Nf > 10$ , hasil citra yang didapatkan menyerupai logam kotak yang digunakan sebagai objek citra. Ketika  $2 < Nf < 10$ , didapatkan hasil citra

TABEL IV  
HASIL SIMULASI VARIASI JENIS ANTENA PADA PENCITRAAN THz DENGAN ANTENA BOWTIE TERKOPEL BOLOMETER

Jenis Antena	Hasil Pencitraan THz Ternormalisasi	Hasil Pencitraan THz (Skala Sama)	Rata-rata Daya di Area Logam	Standar Deviasi Daya di Area Logam
Frekuensi 1 THz			$6,66 \times 10^{-13}$	$3,62 \times 10^{-13}$
Frekuensi 3 THz			$1,34 \times 10^{-13}$	$1,98 \times 10^{-13}$
Frekuensi 5 THz			$4,09 \times 10^{-14}$	$5,81 \times 10^{-14}$

dengan *Poisson spot*, tetapi masih menyerupai logam kotak yang digunakan sebagai objek citra. Ketika  $N_f < 2$ , didapatkan hasil citra tidak merepresentasikan logam kotak sebagai objek citra yang digunakan.

Tahap selanjutnya adalah penentuan jarak  $z$  yang dapat digunakan pada semua frekuensi untuk dapat mencitrakan logam kotak sebagai objek citra. Berdasarkan kalkulasi dan observasi gambar dua dimensi, ditentukan jarak  $z = 10 \mu\text{m}$  pada frekuensi 0,1 THz–10 THz. Jarak  $z$  tersebut kemudian digunakan sebagai jarak terluar logam dengan sensor yang ditempatkan pada simulasi berikutnya. Pada simulasi berikutnya ditempatkan sensor berupa antena *bowtie* terkopel bolometer pada jarak  $z = 10 \mu\text{m}$ .

V. SIMULASI PENCITRAAN THz DENGAN ANTENA BOWTIE TERKOPEL BOLOMETER SEBAGAI SENSOR

Pada simulasi ini, sensor yang digunakan divariasikan menjadi tiga jenis, yaitu sensor antena dengan frekuensi kerja 1 THz, 3 THz, dan 5 THz. Pada masing-masing jenis antena

tersebut, dipropagasikan frekuensi radiasi yang resonan dengan sensor antena. Pada setiap jenis antena, divariasikan jenis polarisasi *plane wave* ( $E_x$  dan  $E_y$ ). Penamaan jenis polarisasi tersebut mengacu kepada arah osilasi medan listrik *plane wave* yang sejajar dengan sumbu-x dan sumbu-y. Ilustrasi variasi polarisasi *plane wave* diperlihatkan pada Gbr. 12.

Antena *bowtie* terkopel bolometer yang digunakan sebagai sensor memiliki arah pergerakan medan E yang linier dan sejajar dengan sumbu-x. Hal ini membuat penggunaan jenis polarisasi  $E_x$  pada sistem disebut *co-polarization*, karena memiliki arah pergerakan medan E yang sejajar antara *plane wave* dengan sensor. Penggunaan jenis polarisasi  $E_y$  disebut *cross-polarization*, karena memiliki arah pergerakan medan E yang ortogonal antara *plane wave* dengan sensor.

Sistem pencitraan bekerja dengan membaca nilai daya yang terserap (*absorbed power*) pada sensor bolometer. Nilai *absorbed power* pada setiap bolometer diolah dan direpresentasikan pada gambar dua dimensi. Perbedaan nilai daya pada masing-masing elemen tersebut akan membuat

TABEL V  
HASIL SIMULASI VARIASI POLARISASI *PLANE WAVE* PADA PENCITRAAN THZ DENGAN ANTENA *BOWTIE* TERKOPEL BOLOMETER

Jenis Antena	Hasil Pencitraan THz Ternormalisasi Polarisis Ex	Hasil Pencitraan THz Ternormalisasi Polarisis Ey
Frekuensi 1 THz		
Frekuensi 3 THz		
Frekuensi 5 THz		

kontras yang menunjukkan indikasi keberadaan dan bentuk logam kotak yang dicitrakan.

Tabel IV menunjukkan hasil simulasi pencitraan THz dengan antena *bowtie* terkopel bolometer yang memiliki frekuensi kerja 1 THz, 3 THz, dan 5 THz. Hasil pencitraan ternormalisasi memiliki skala maksimum dan minimum yang berbeda antara satu frekuensi dengan yang lainnya. Skala maksimum dan minimum pada gambar-gambar tersebut merupakan nilai-nilai maksimum dan minimum *absorbed power* bolometer pada masing-masing simulasi tersebut.

Untuk mengetahui hubungan frekuensi terhadap pencitraan THz, hasil pencitraan THz kembali direpresentasikan dalam gambar dua dimensi berwarna. Namun, kali ini hasil citra menggunakan skala yang sama untuk semua simulasi pada bagian ini. Skala maksimum dan minimum merupakan nilai *absorbed power* maksimum dan minimum dari semua hasil simulasi.

Warna pada citra merepresentasikan nilai tingkatan *absorbed power*. Warna coklat merepresentasikan nilai maksimum, sedangkan warna biru merepresentasikan nilai minimum. Logam kotak sebagai objek citra pada sistem

simulasi ditandai dengan warna biru yang terletak pada bagian tengah hasil citra simulasi.

Dengan meninjau hasil pencitraan THz dengan skala sama, terlihat bahwa pada frekuensi kerja 1 THz, hasil citra menunjukkan beberapa titik di daerah belakang logam menunjukkan nilai daya maksimum. Hal ini menunjukkan bahwa efek difraksi masih memengaruhi hasil pencitraan.

Pada jenis antena dengan frekuensi kerja 3 THz, hasil citra mulai menunjukkan keberadaan logam kotak sebagai objek citra. Hal ini ditunjukkan dengan daerah di belakang logam kotak yang mulai kontras dengan daerah di sekitarnya. Seiring dengan peningkatan frekuensi radiasi, kontras hasil citra mulai membaik.

Hasil pencitraan pada antena dengan frekuensi kerja 5 THz mulai menunjukkan keberadaan logam kotak yang semakin baik yang ditandai dengan semakin seragamnya warna pada daerah di belakang logam kotak dan daerah di sekitarnya. Kalkulasi nilai standar deviasi dilakukan sebagai analisis tambahan untuk membuktikan hubungan tersebut. Standar deviasi menunjukkan keseragaman data nilai daya yang terdapat pada daerah di belakang logam (*shadow region*).

Hasil pencitraan pada antena dengan frekuensi kerja 5 THz mulai menunjukkan keberadaan logam kotak yang semakin baik yang ditandai dengan semakin seragamnya warna pada daerah di belakang logam kotak dan daerah di sekitarnya.

Hasil simulasi diharapkan memiliki nilai standar deviasi nilai daya di daerah belakang logam yang kecil karena hal tersebut menandakan minimnya efek difraksi pada sistem yang memengaruhi citra logam kotak. Hasil kalkulasi menunjukkan standar deviasi terkecil berada pada antena dengan frekuensi kerja 5 THz. Hal ini menunjukkan bahwa nilai *absorbed power* pada daerah di belakang logam memiliki tingkat keseragaman data paling tinggi. Keseragaman data tersebut menunjukkan efek difraksi minimum pada antena dengan frekuensi kerja 5 THz, sehingga membuat hasil citra yang diproduksi lebih representatif. Fenomena ini bersesuaian dengan teori, yaitu peningkatan frekuensi radiasi dari suatu sistem pencitraan akan memengaruhi resolusi spasial pada pencitraan [1]. Resolusi spasial merupakan ukuran terkecil objek yang dapat direkam atau dicitrakan [23]. Semakin tinggi nilai resolusi spasial suatu sistem pencitraan, semakin tinggi keakuratan dan kualitas citra yang akan dihasilkan oleh sistem.

Tabel V menunjukkan perbandingan hasil simulasi polarisasi Ex dan Ey. Hasil simulasi dengan polarisasi Ex memiliki nilai *absorbed power* yang lebih besar dan kontras yang lebih tinggi. Hal ini ditunjukkan melalui hasil pencitraan polarisasi Ex yang lebih merepresentasikan logam kotak sebagai objek citra. Hasil simulasi dengan polarisasi Ex lebih baik karena antena *bowtie* terkopel bolometer sebagai sensor memiliki polarisasi yang sejajar dengan polarisasi Ex, sehingga daya yang terserap pada sensor lebih maksimal.

## VI. KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa fenomena difraksi pada pencitraan THz dapat diperhitungkan, dimodelkan, dan dianalisis dengan menggunakan konsep difraksi ujung tajam (*knife edge diffraction*). Peningkatan jarak,  $z$ , yang digunakan dalam simulasi menyebabkan meningkatnya fenomena difraksi dan intensitas *Poisson spot* yang dapat merusak hasil citra. Parameter *Fresnel number* digunakan untuk menentukan batasan jarak aman  $z$  dari difraksi yang merusak hasil citra. Simulasi pencitraan logam kotak dengan menggunakan sensor menunjukkan bahwa peningkatan frekuensi radiasi yang resonan dengan sensor akan membuat efek difraksi semakin menurun. Hal ini ditunjukkan dengan nilai standar deviasi yang menurun seiring dengan peningkatan frekuensi. Antena *bowtie* terkopel bolometer dapat berkontribusi dalam pengembangan sistem pencitraan THz di masa depan.

## REFERENSI

- [1] R. Knipper, A. Brahm, E. Heinz, T. May, G. Notni, H.-G. Meyer, A. Tünnermann, dan J. Popp, "THz Absorption in Fabric and Its Impact on Body Scanning for Security Application," *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, Vol. 5, No. 6, hal. 999–1004, 2015.
- [2] D.H. Auston, "Picosecond Optoelectronic Switching and Gating in Silicon," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 26, No. 3, hal. 101-103, Feb. 1975.
- [3] P.U. Jepsen, R.H. Jacobsen, dan S.R. Keiding, "Generation and Detection of Terahertz Pulses from Biased Semiconductor Antennas," *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 13, No. 11, hal. 2424–2436, Nov. 1996.
- [4] M.C. Kemp, P.F. Taday, B.E. Cole, J.A. Cluff, A.J. Fitzgerald, dan W.R. Tribe, "Security Applications of Terahertz Technology," *Terahertz Mil. Secur. Appl.*, Vol. 5070, hal. 44–52, 2003.
- [5] W.R. Tribe, D.A. Newnham, P.F. Taday, dan M.C. Kemp, "Hidden Object Detection: Security Applications of Terahertz Technology," *Proc. SPIE - Int. Sec. Opt. Eng.*, Vol. 5354, 2004, hal. 168–176.
- [6] J.F. Federici, B. Schulkin, F. Huang, D. Gary, R. Barat, F. Oliveira, dan D. Zimdars, "THz Imaging and Sensing for Security Applications - Explosives, Weapons and Drugs," *Semicond. Sci. Technol.*, Vol. 20, No. 7, hal. S266–S280, 2005.
- [7] C.J. Strachan, P.F. Taday, D.A. Newnham, K.C. Gordon, J.A. Zeitler, M. Pepper, dan T. Rades, "Using Terahertz Pulsed Spectroscopy to Quantify Pharmaceutical Polymorphism and Crystallinity," *J. Pharm. Sci.*, Vol. 94, No. 4, hal. 837–846, Apr. 2005.
- [8] D.M. Mittleman, R.H. Jacobsen, dan M.C. Nuss, "T-Ray Imaging," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 2, No. 3, hal. 679–692, 1996.
- [9] A.S. Skryl, J.B. Jackson, M.I. Bakunov, M. Menu, dan G.A. Mourou, "Terahertz Time-domain Imaging of Hidden Defects in Wooden Artworks: Application to a Russian Icon Painting," *Appl. Opt.*, Vol. 53, No. 6, hal. 1033–1038, Feb. 2014.
- [10] E. Pickwell, B.E. Cole, A.J. Fitzgerald, M. Pepper, dan V.P. Wallace, "In Vivo Study of Human Skin Using Pulsed Terahertz Radiation," *Phys. Med. Biol.*, Vol. 49, No. 9, hal. 1595–1607.
- [11] B. Friederich, D. Damyanov, J. Kohl, K. Kolpatzcek, X. Liu, T. Schultze, A. Czyliwki, J.C. Balzer, dan I. Willms, "High Resolution Image Processing Technique for the Detection of Metal Entrapments Based on a Terahertz Camera," *Proc. IRMMW-THz*, 2019, hal. 1–2.
- [12] J.S. Kwon, J.M. Lee, dan W.Y. Kim, "Real-time Detection of Foreign Objects Using X-ray Imaging for Dry Food Manufacturing Line," *Proc. Int. Symp. Consum. Electron. ISCE*, 2008, hal. 17–20.
- [13] G. Chattopadhyay, K.B. Cooper, R. Dengler, N. Llombart, dan P.H. Siegel, "Imaging at a Stand-off Distance with Terahertz FMCW Radar," *2011 30th URSI Gen. Assem. Sci. Symp.*, 2011, hal. 1.
- [14] C. Baker, T. Lo, W.R. Tribe, B.E. Cole, M.R. Hogbin, dan M.C. Kemp, "Detection of Concealed Explosives at a Distance Using Terahertz Technology," *Proc. IEEE*, Vol. 95, No. 8, hal. 1559–1565, 2007.
- [15] H.S. Marbun dan C. Apriono, "Antenna Coupled Bolometer Simulation for Terahertz Radiation Detection Diffracted by A Small Metal Object," dipresentasikan pada *3rd Int. Conf. on Smart City Innovation (ICSCI)*, Bali, Indonesia, 2020.
- [16] T.V. de Guéllis, V. Shcherbakov, dan A. Schwarzenböck, "Diffraction Patterns from Opaque Planar Objects Simulated with Maggi-Rubinowicz Method and Angular Spectrum Theory," *Opt. Express*, Vol. 27, No. 7, hal. 9372, 2019.
- [17] S.B. Tucker, J. Ojeda-Castañeda, dan W.T. Cathey, "Matrix Description of Near-field Diffraction and the Fractional Fourier Transform," *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 16, No. 2, hal. 316, 1999.
- [18] J. Kokkonen, P. Rintanen, J. Lehtomäki, dan M. Juntti, "Diffraction Effects in Terahertz Band - Measurements and Analysis," *Proc. 2016 IEEE Glob. Commun. Conf. (GLOBECOM)*, 2016, hal. 1–6.
- [19] D. Halliday, R. Resnick, dan J. Walker, *Fundamentals of Physics*, Hoboken, USA: Wiley, 2005.
- [20] A.G. Dmitrenko dan V.V. Fisanov, "Diffraction and Propagation of Electromagnetic Waves in the Presence of Chiral Media," *Russ Phys J*, Vol. 41, hal. 780–792, 1998.
- [21] C. Apriono, A.P. Aji, dan E.T. Rahardjo, "Study of Impedance Matching Effect between Terahertz Bowtie Antenna and Bolometer to Enhance Signals Detection," *Proc. 2019 7th Int. Conf. Smart Comput. Commun. (ICSCC)*, 2019, hal. 1–4.
- [22] A.P. Aji, C. Apriono, dan E.T. Rahardjo, "Surface Current Analysis of THz Bowtie Antenna-coupled Microbolometer," *Proc. 2019 16th Int. Conf. Qual. Res. QIR 2019 - Int. Sym. Electr. Comput. Eng.*, 2019, hal. 6–9.
- [23] A. Oktaviani dan Y. Johan, "Perbandingan Resolusi Spasial, Temporal Dan Radiometrik Serta Kendalanya," *J. Enggano*, Vol. 1, No. 2, hal. 74–79, 2016.