

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

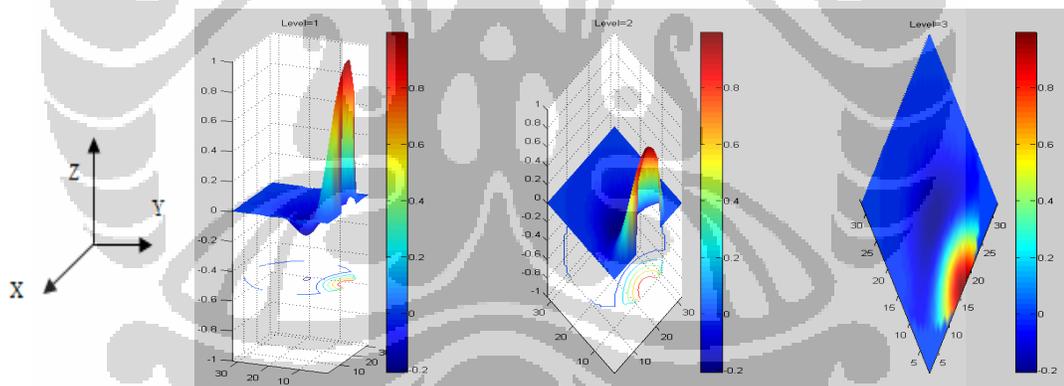
Dua metode penelitian yaitu komputasi dan eksperimen telah dilakukan sebagaimana telah diuraikan pada dua bab sebelumnya. Pada bab ini akan diuraikan mengenai hasil yang diperoleh dari penelitian tersebut beserta analisisnya.

4.1 Distribusi Sensitivitas dengan Variasi Model Sensor.

Berikut dipaparkan distribusi masing-masing model sensor yang telah dibuat. Sensitivitas ini adalah sensitivitas hasil normalisasi.

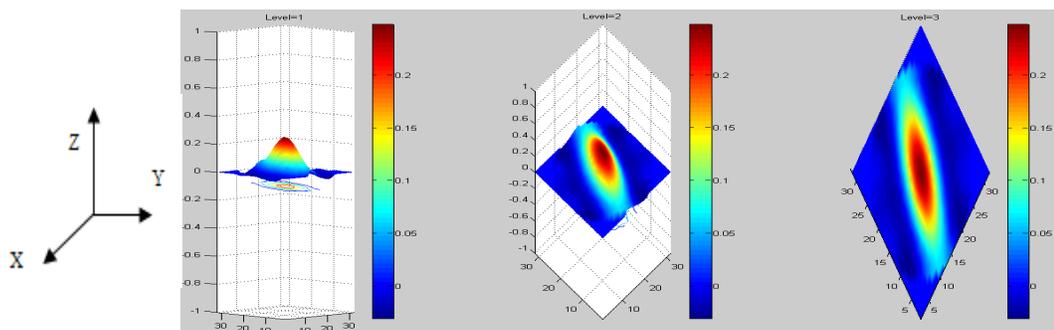
1. Hasil sensitivitas model 8 sensor satu tingkat

- Untuk pasangan sensor 1 dan 2 (berdampingan)



Gambar 4.1 Distribusi sensitivitas matrik 8 sensor, pasangan sensor 1 dan 2, satu tingkat

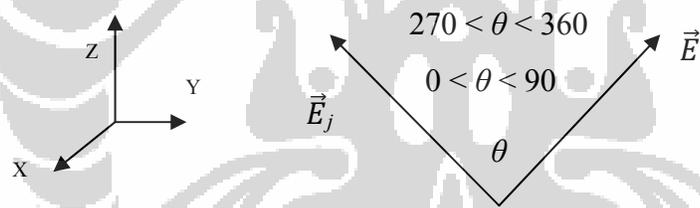
- Untuk pasangan sensor 1 dan 5 (bersebrangan)



Gambar 4.2 Distribusi sensitivitas matrik 8 sensor, pasangan sensor 1 dan 5, satu tingkat

Gambar diatas adalah distribusi sensitivitas yang dihasilkan oleh sensor persegi satu tingkat. Garadasi warna menunjukkan intensitas sensitivitas matrik yang berbeda-beda. Warna biru menunjukkan intensitas yang paling rendah, sedangkan warna merah menunjukkan intensitas yang paling tinggi. Rendah dan tingginya suatu intensitas di tentukan dari interaksi medan listrik yang dihasilkan antara kedua sensor tersebut. Warna merah adalah hasil perkalian *dot product* dari medan listrik antara kedua sensor yang saling menguatkan dengan syarat $0 < \theta < 90$ dan $270 < \theta < 360$ secara sederhana dapat dijelaskan pada gambar 4.3. Sedangkan warna biru merupakan hasil *dot product* dari medan listrik antara kedua sensor yang saling melemahkan dengan syarat $90 < \theta < 270$ secara sederhana dapat dijelaskan pada gambar 4.4

$$\text{Karena } \vec{E}_i \cdot \vec{E}_j = |\vec{E}_i| |\vec{E}_j| \cos \theta$$

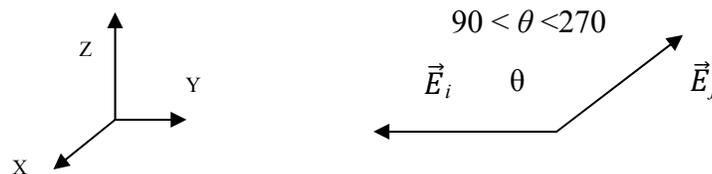


Gambar 4.3 Ilustrasi interaksi medan listrik antara kedua sensor yang saling menguatkan

Keterangan :

\vec{E}_i adalah medan yang dihasilkan pada sensor i

\vec{E}_j adalah medan yang dihasilkan pada sensor j



Gambar 4.4 Ilustrasi interaksi medan listrik antara kedua sensor yang saling melemahkan

Makna dari warna merah adalah jika ada suatu benda dengan permitivitas yang lebih besar dibandingkan permitivitas di sekitarnya, yang diletakkan pada posisi warna merah maka akan sangat mempengaruhi nilai kapasitan yang di ukur karena nilai suatu kapasitan sangat bergantung pada distribusi sensitivitas medan listrik. Sedangkan perubahan medan listrik dipengaruhi oleh permitivitas suatu objek.

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{1}{\Delta V} \iint_r D \, dA = -\frac{1}{\Delta V} \iint_r \epsilon(x, y, z) \nabla \phi(x, y, z) dA$$

$$\vec{E}(r) = -\nabla \phi(r),$$

$$S = \int_A \vec{E}_i \cdot \vec{E}_j \, dA$$

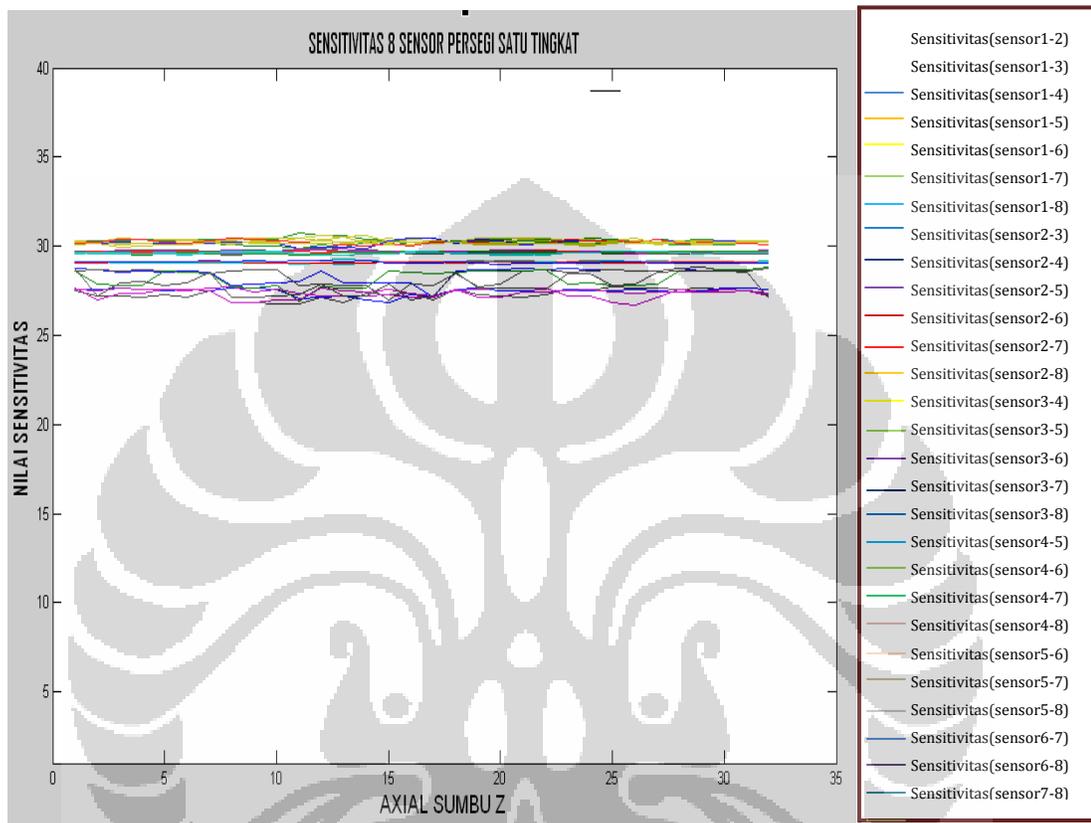
Makna warna biru adalah jika suatu benda dengan permitivitas yang lebih besar dibandingkan permitivitas disekelilingnya, yang diletakkan pada posisi warna biru maka tidak akan mempengaruhi nilai kapasitan yang di ukur karena pada posisi tersebut nilai dari interaksi medan listriknya bernilai negatif. Ketentuan ini berlaku untuk semua sensitivitas yang telah di normalisasi.

Pada gambar 4.1 terlihat bahwa warna merah ke kanan-atas, hal ini menunjukkan bahwa interaksi medan listrik yang saling menguatkan berada di daerah kanan-atas. Hal ini bisa dipahami karena pasangan sensor yang menghasilkan medan listrik saling berdekatan. Dalam gambar ini terdapat tiga buah gambar yang berbeda-beda masing-masing (dari kiri ke kanan) menampilkan tampilan *slice* terhadap ketinggian pada sumbu z. total slice ada 32. Ketiga gambar menampilkan sudut pandang yang berbeda-beda . Ketentuan ini berlaku untuk gambar-gambar hasil distribusi sensitivitas berikutnya.

Pada gambar 4.2 terlihat bahwa warna merah berada di tengah-atas gambar, hal ini menunjukkan bahwa interaksi medan listrik yang saling menguatkan berada ditengah-atas . hal ini dapat dipahami karena pasangan sensor yang menghasilkan medan listrik saling bersebrangan.

Gambar 4.1 dan 4.2 hanya menampilkan sebagian hasil distribusi sensitivitas karena masih ada 26 pasangan lagi yang belum ditampilkan. Hal ini hanya untuk memperjelas gambaran dari distribusi sensitivitas. Karena sensor yang digunakan

sebanyak 8 buah maka jumlah pasangannya adalah $8 \times (8-1)/2$ sama dengan 28 pasangan.



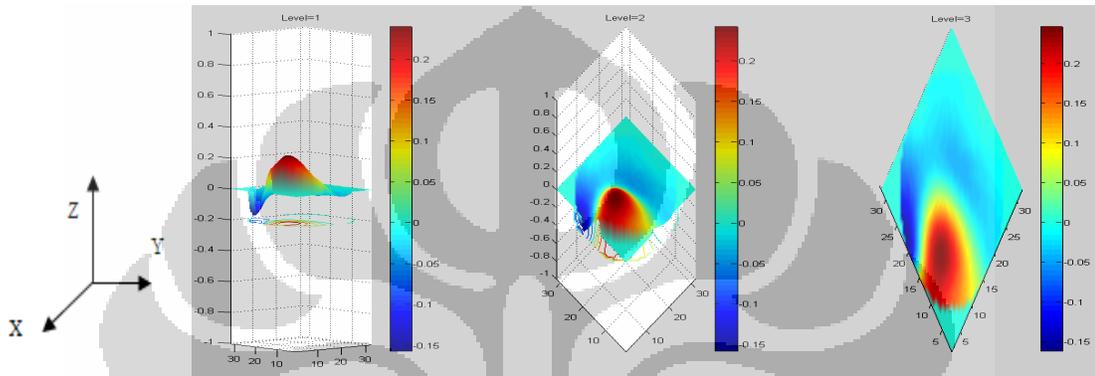
Gambar 4.5 Jumlah distribusi sensitivitas model 8 sensor persegi satu tingkat

Gambar diatas menampilkan jumlah distribusi sensitivitas model 8 sensor persegi satu tingkat. Total garis ada 28 macam. Masing-masing garis mewakili distribusi sensitivitas pasangan sensor. Warna pada masing-masing garis hanya berfungsi untuk membedakan garis satu dengan garis lainnya. Sumbu horizontal merupakan sumbu Z. angka 0 sampai 32 adalah banyaknya jumlah pixel dalam sumbu Z. sumbu vertikal mewakili nilai sensitivitas . Semakin tinggi garis sensitivitas terhadap sumbu vertikal maka semakin tinggi pula intensitas sensitivitasnya. Pada distribusi medan listrik sensor 8 persegi satu tingkat, tidak dihasilkan variasi sensitivitas. Distribusi yang terlihat cenderung garis lurus, hal inilah yang menyebabkan sensor 8 persegi satu tingkat tidak dapat menghasilkan objek 3 dimensi.

Makna garis lurus pada distribusi sensitivitas adalah bahwa sepanjang daerah tersebut tidak terjadi perubahan intensitas medan listrik.

2. Hasil sensitivitas model 8 sensor dua tingkat

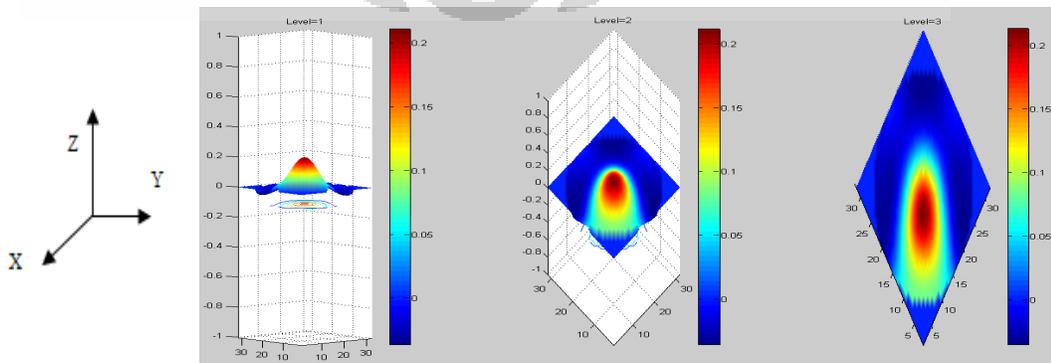
- Untuk pasangan sensor tingkat 1 dan tingkat 2 (sensor 1-8)



Gambar 4.6 Distribusi sensitivitas matrik 8 sensor, pasangan sensor tingkat 1 dan tingkat 2 (berdekatan)

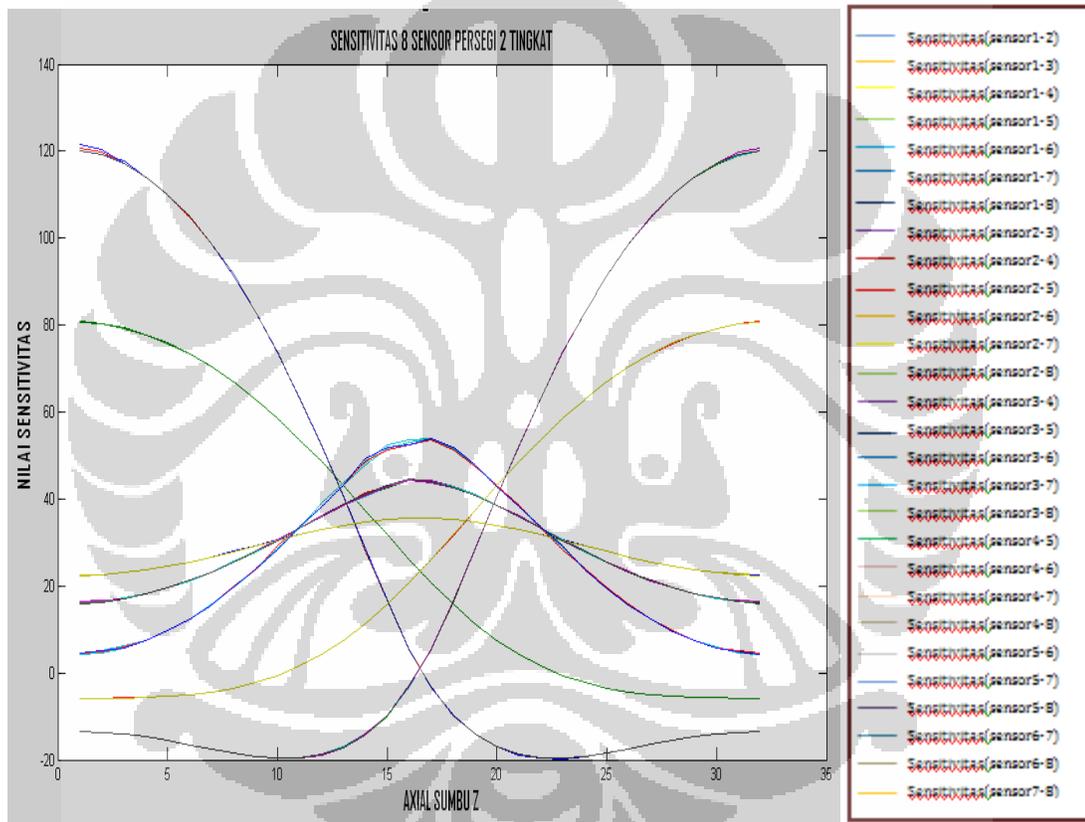
Dalam gambar 4.6 terlihat asimetri karena gambar ini adalah hasil distribusi sensitivitas antara sensor aktif yang dibawah dan sensor yang diatas tetapi berdekatan. Sensitivitas tertinggi terletak di dekat sensor yang aktif, dengan demikian pada wilayah inilah yang akan sangat mempengaruhi nilai kapasitan apabila diletakkan suatu objek yang permitivitasnya lebih besar daripada disekitarnya.

- Untuk pasangan sensor tingkat 1 dan tingkat 2 (Sensor 1 dan 7)



Gambar 4.7 Distribusi sensitivitas matrik 8 sensor, pasangan sensor tingkat 1 dan tingkat 2 (bersebrangan serta berjauhan)

Pada gambar 4.7 terlihat distribusi sensitivitas yang tidak seragam. Pada tingkat satu, terlihat dominasi warna biru sedangkan pada tingkat dua lebih di dominasi warna merah. Hal ini menjelaskan kepada kita bahwa θ yang terbentuk dari perkalian *dot product* dari medan listrik yang dihasilkan antara kedua sensor pada tingkat satu lebih banyak yang bernilai dalam rentang $90 < \theta < 270$.

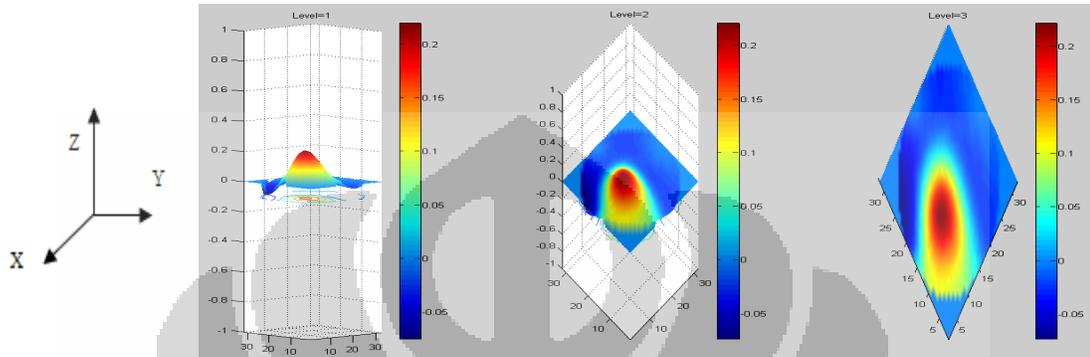


Gambar 4.8 Jumlah distribusi sensitivitas model 8 sensor persegi dua tingkat

Pada gambar 4.8 terlihat jumlah distribusi sensitivitas yang mulai memiliki variasi yang bermacam-macam, fenomena ini dikarenakan sensor terbagi dua tingkat. Sehingga terjadi interaksi medan listrik yang dihasilkan dari sensor yang berada dibawah dengan sensor yang berada diatas. Dengan sensor demikian gambar tiga dimensi bisa dihasilkan.

3. Hasil sensitivitas model 8 sensor persegi dengan tingkat kedua di putar 45 derajat

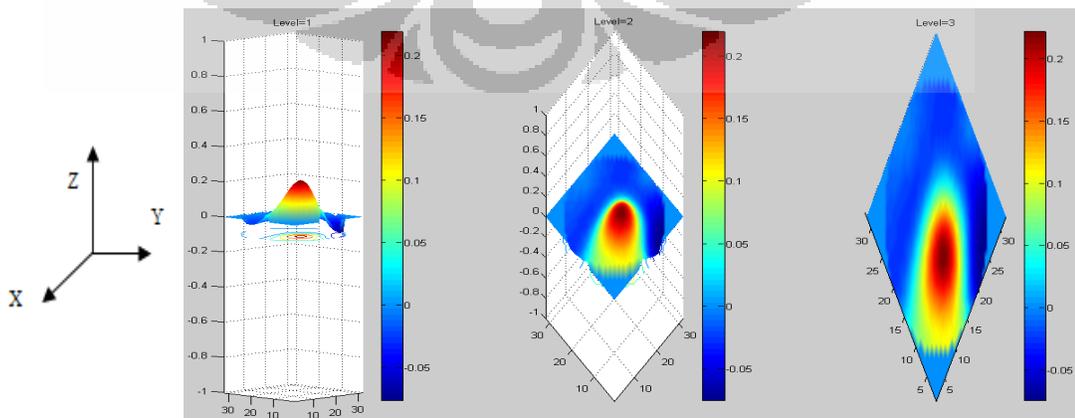
- Untuk pasangan sensor aktif tingkat 1 dan tingkat 2 (berdekatan)



Gambar 4.9 Distribusi sensitivitas matrik 8 sensor, pasangan sensor tingkat 1 dan tingkat 2 di putar 45 (berdekatan)

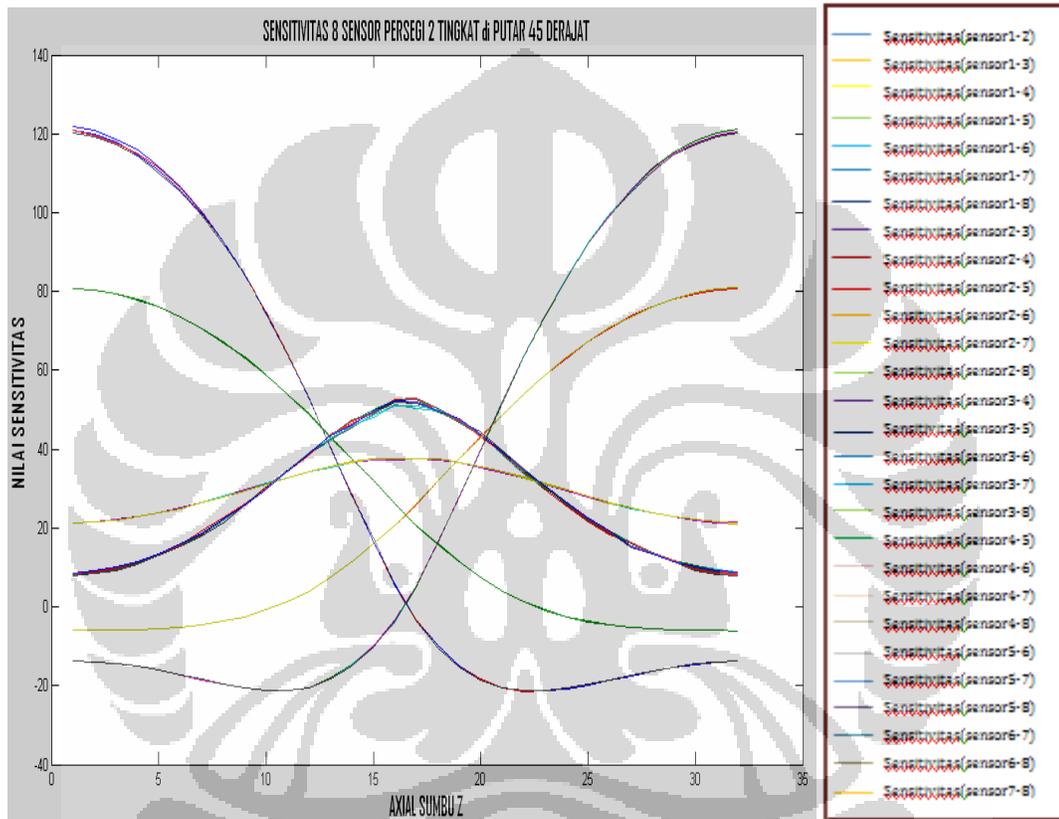
Dalam gambar 4.9 terlihat perbedaan yang cukup jelas dengan gambar 4.5 walaupun sama-sama dua tingkat. Gambar 4.9 dihasilkan dari sensor dua tingkat dengan sensor yang kedua diputar 45 derajat terhadap sumbu Z. hal ini membuktikan bahwa perbedaan letak memberikan pengaruh terhadap distribusi sensitivitas yang dihasilkan. Karena dengan merubah letak sensor maka akan merubah sudut θ dalam interaksi medan listriknya.

- Untuk pasangan sensor tingkat 1 dan tingkat 2 di putar 45 derajat (bersebrangan serta berjauhan)



Gambar 4.10 Distribusi sensitivitas matrik 8 sensor, pasangan sensor tingkat 1 dan tingkat 2 di putar 45 (bersebrangan dan berjauhan)

Dalam gambar 4.10 dapat diketahui distribusi sensitivitas yang dihasilkan tidak terlalu berbeda dengan sensor 8 persegi dua tingkat. Namun demikian nilai negatif dari sensitivitas yang dihasilkan berkurang karena perubahan sensitivitas terjadi pada arah radial.

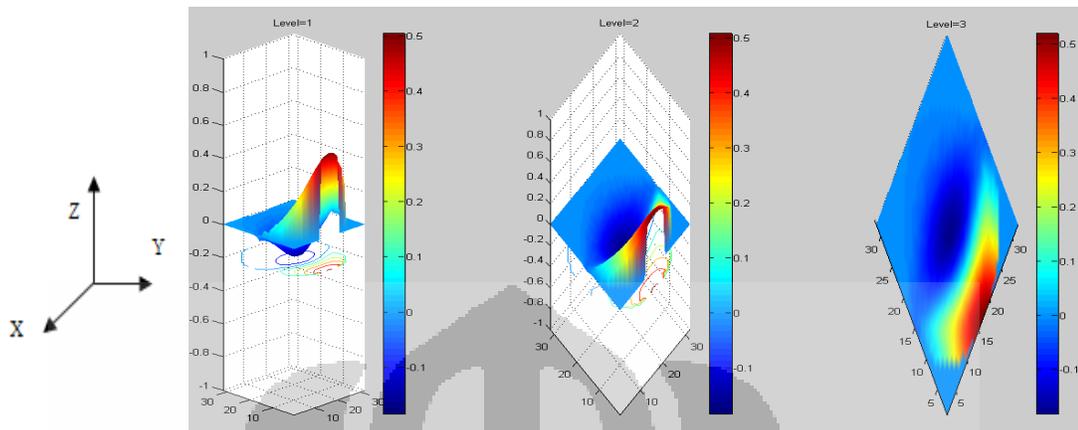


Gambar 4.11 Jumlah distribusi sensitivitas model 8 sensor persegi dua tingkat dengan tingkat kedua diputar 45 derajat

Dalam gambar 4.11 terlihat jumlah distribusi yang lebih bagus dan simetri dibandingkan dengan jumlah distribusi sensitivitas sensor 8 persegi dua tingkat sebelumnya.

4. Hasil sensitivitas model 8 sensor segitiga dua tingkat

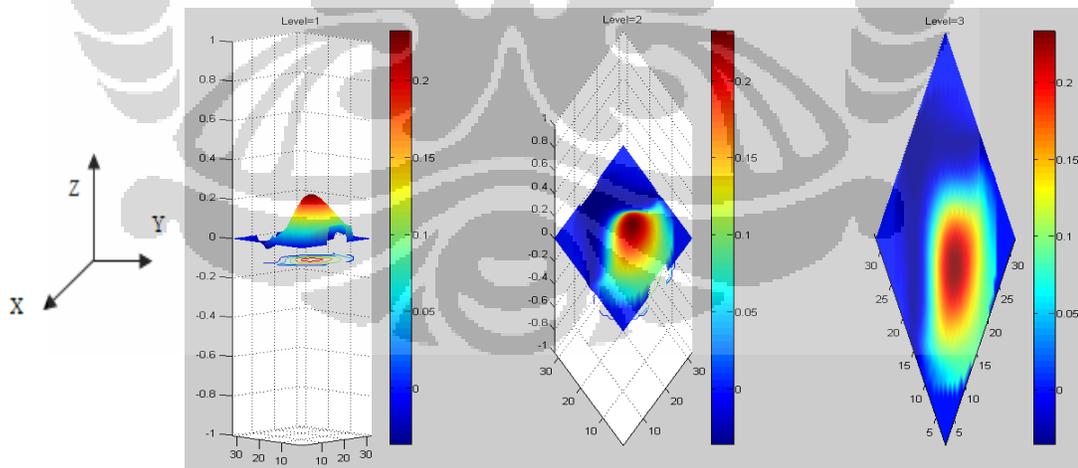
- Untuk pasangan sensor 1 dengan 5 (berdekatan, beda tingkat)



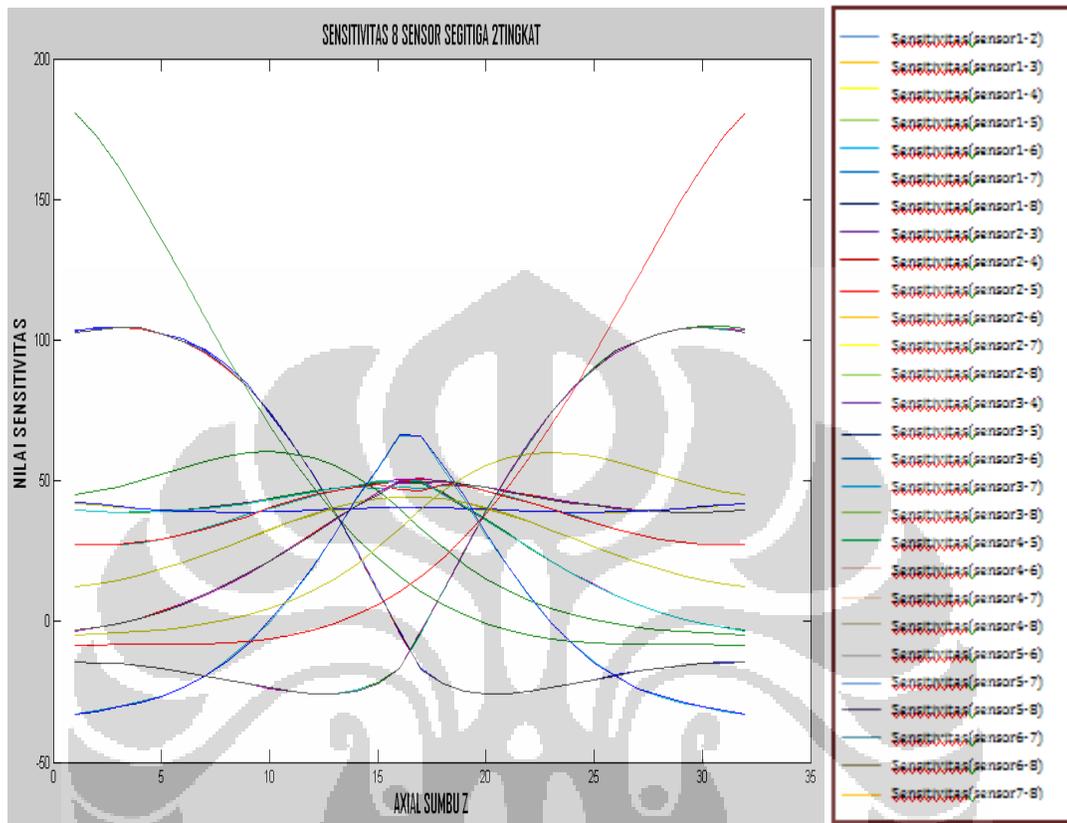
Gambar 4.12 Distribusi sensitivitas model 8 sensor dua tingkat Untuk pasangan sensor 1 dengan 5
(berdekatan, beda tingkat)

Pada gambar 4.12 terlihat distribusi sensitivitas yang lebih tajam dari yang sebelumnya. Hal ini dikarenakan model sensor yang digunakan adalah model segitiga. Dengan demikian perbedaan model memberikan distribusi sensitivitas yang berbeda pula.

- Untuk pasangan sensor 1 dengan 7 (berhadapan, beda tingkat)



Gambar 4.13 Distribusi sensitivitas model 8 sensor dua tingkat Untuk pasangan sensor 1 dengan 7
(berhadapan beda tingkat)

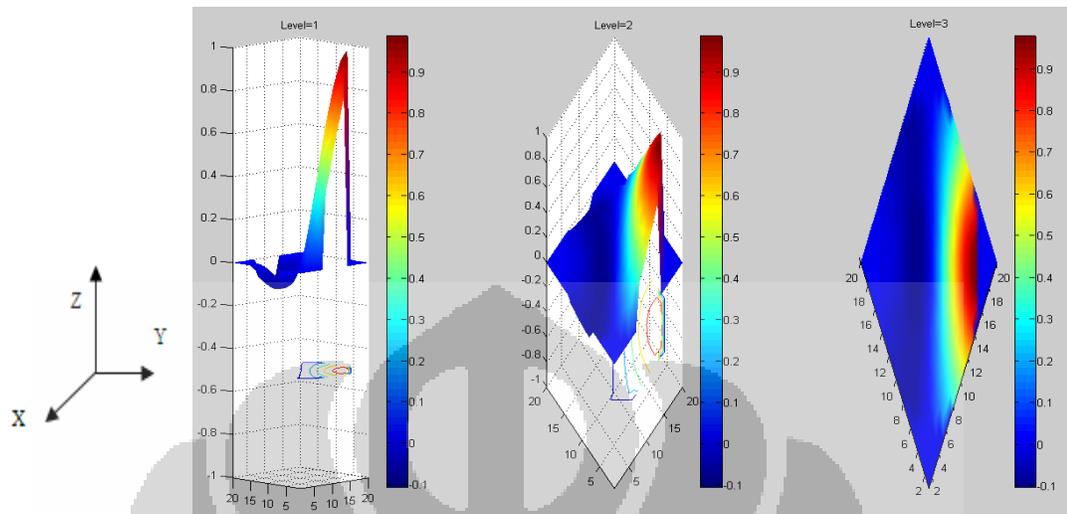


Gambar 4.14 Jumlah distribusi sensitivitas model 8 sensor segitiga dua tingkat

Pada gambar 4.14 terlihat jumlah distribusi sensitivitas yang lebih kompleks dan terlihat pula bahwa nilai intensitas rata-ratanya cukup besar. Hal ini akan mengakibatkan gambar yang dihasilkan lebih baik.

5. Hasil sensitivitas 12 sensor persegi tiga tingkat.

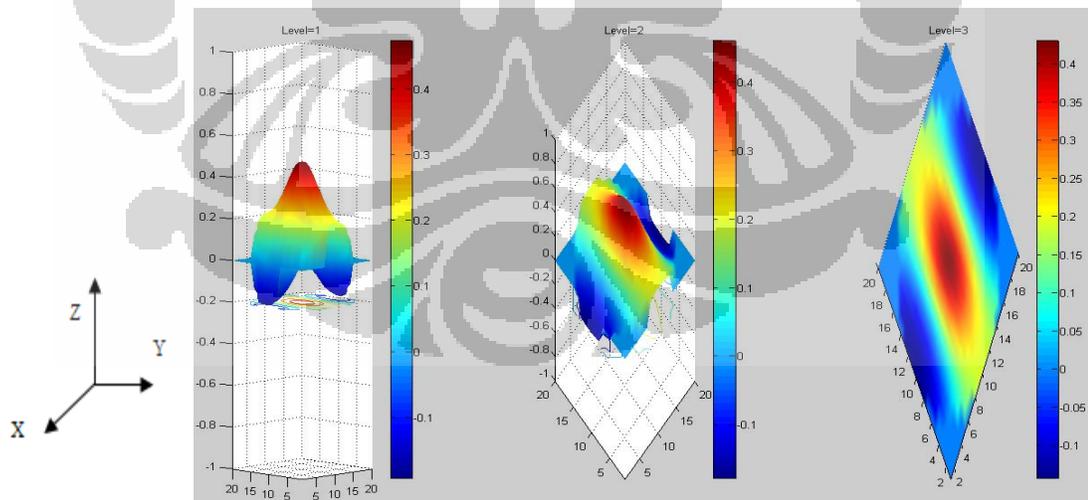
- Untuk pasangan sensor yang berdekatan (sensor 1 dan 2).



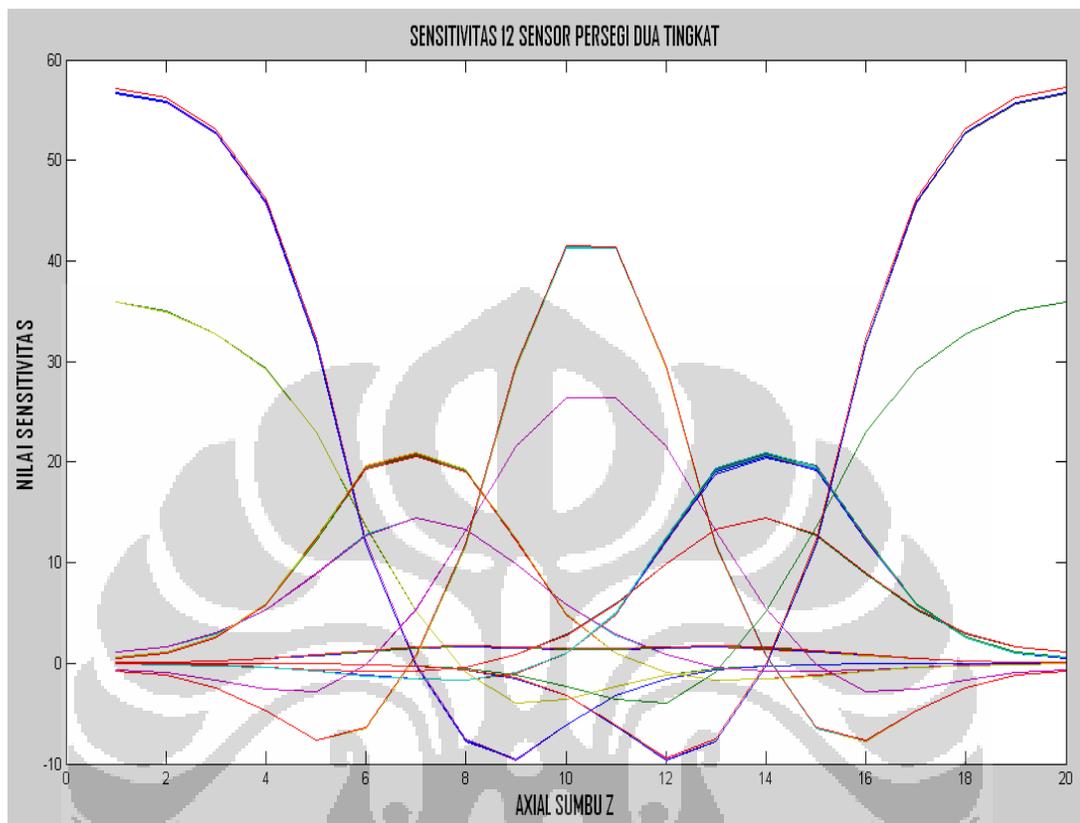
Gambar 4.15 Distribusi sensitivitas model 12 sensor persegi tiga tingkat (sensor 1-2)

Pada gambar ini dihasilkan distribusi perimitivitas yang semakin baik, nilainya-pun semakin besar. Hal ini membuktikan semakin banyak tingkat maka akan semakin besar nilai distribusi perimitivitasnya.

- Untuk pasngan sensor yang berhadapan (sensor 1-3).



Gambar 4.16 Distribusi sensitivitas model 12 sensor persegi 3 tingkat (sensor 1-3)



Gambar 4.17 Jumlah distribusi sensitivitas model 12 sensor persegi tiga tingkat

Konsep dasar dari sensor kapasitans untuk imaging volum 3D adalah mendistribusikan secara merata medan listrik sensitivitas secara keseluruhan pada ruangan 3D. Konsep ini berhubungan pada variasi sensitivitas antara pasangan elektroda yang berlaku dan kekuatan sensitivitas dari nilai total kombinasi sensitivitas dari semua pasangan kapasitans yang berlaku untuk nilai voxel tertentu.

Pemilihan jumlah elektroda dipilih berdasarkan jumlah sistem akuisisi data yang tersedia. Jumlah total pengukuran kapasitans dari n elektroda adalah $n(n-1)/2$, yang berarti terdapat 28 pengukuran pada 8 sensor sistem. Elektroda pada sensor persegi yang disusun pada tingkatan pertama melakukan distribusi medan listrik lebih seragam pada arah axial dan meningkatkan resolusi radial hingga 2 kali untuk sensor 8 elektroda.

4.2 Sensitivitas Map dengan Desain Sensor

Distribusi map sensitivitas untuk setiap model terlihat pada sub bab 4.1 , gambar menunjukkan distribusi sensitivitas yang telah dinormalisasi pada ruang 3D. Terlihat peningkatan distribusi sensitivitas untuk setiap penambahan tingkat dan perubahan letak. Dalam hal ini model 8 sensor persegi satu tingkatlah yang memiliki distribusi sensitivitas paling rendah dan simple. sebaliknya model 8 sensor segitiga dua tingkatlah yang memiliki distribusi paling tinggi dan kompleks. Namun demikian model 12 sensor persegi tiga tingkatlah yang memiliki distribusi sensitivitas paling baik karena lebih konvergen dan lebih smooth.

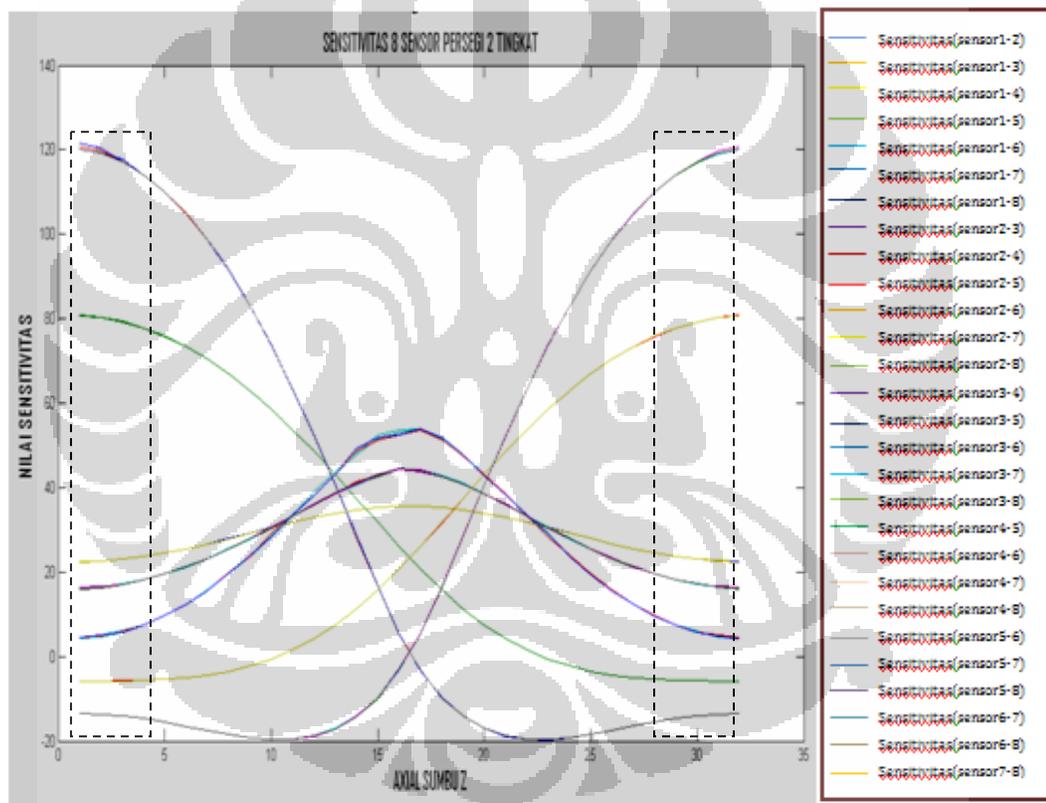
Seragamnya kekuatan sensitivitas pada seluruh daerah sensing sangat penting untuk menghindari artifact atau distorsi image pada hasil rekonstruksi karena adanya ketidakseimbangan dari distribusi sensitivitas. Untuk sensor kotak, hitungan atau besaran yang terbesar pada sensitivitas ditemukan pada pasangan elektroda pada tingkatan yang sama. Besaran kekuatan sensitivitas tidak berpengaruh pada proses rekonstruksi, tapi sangat berhubungan pada SNR (signal to noise ratio) di pengukuran kapasitans.

Kedua sensor menghasilkan resolusi radial yang hampir sama disepanjang tingkat. Pada sub bab 4.1 juga ditampilkan jumlah distribusi sensitivitas untuk ke-28 pasangan elektroda untuk kedua sensor. Kekonvergenan dari proses rekonstruksi iteratif ditentukan dari variasi dan smoothness slop pada distribusi sensitivitas. Semakin variasi dan semakin smooth slopnya, maka akan semakin konvergen.

Dalam bidang pencitraan medis, dibutuhkan desain sensor yang kecil dan dalam jumlah yang banyak. Hal ini untuk mendapatkan jumlah data yang banyak. Contohnya pada sensor 8 chanel didapatkan data $n(n-1)/2$ yaitu 28 data, padahal pixel yang ada adalah 1681. Dan juga karena tubuh manusia memiliki jaringan yang kompleks dan berbeda satu sama lain. Oleh karena itu untuk mendapatkan hasil yang baik dibutuhkan sensor sebanyak mungkin agar didapat data yang banyak.

4.3 Dead Zone

Dead zone adalah suatu daerah pada sensitivitas map yang mengakibatkan citra yang dihasilkan mengalami distorsi. Daerah yang apabila benda diletakkan ditempat tersebut, tidak akan mempengaruhi pengukuran kapasitans. Hal ini dikarenakan daerah tersebut tidak memiliki variasi sensitivitas.. Dalam rekonstruksi algoritma hal ini akan di reduksi sekecil mungkin sehingga citra yang dihasilkan lebih optimal.

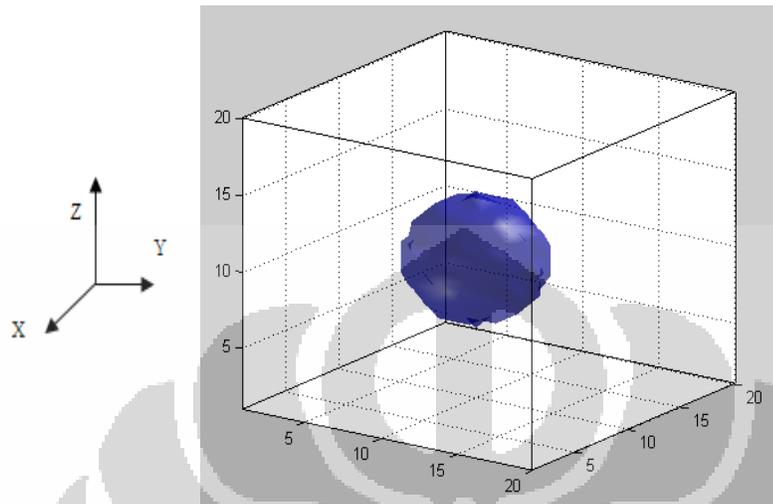


Gambar 4.18 Daerah dead zone berada di dalam kotak

4.4 Hasil Rekonstruksi

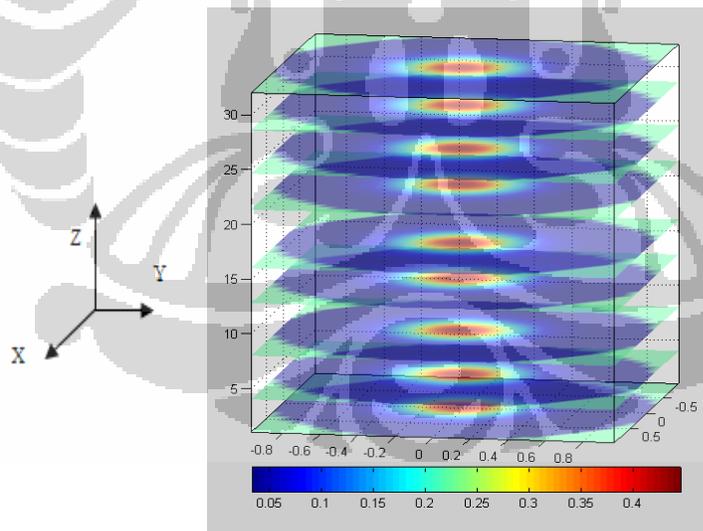
1. Hasil rekonstruksi komputasi.

Pada bagian ini digunakan bola sebagai objek dasar untuk melihat gambar yang dihasilkan dari sensitivitas masing-masing model.



Gambar 4.19 Phantom bola

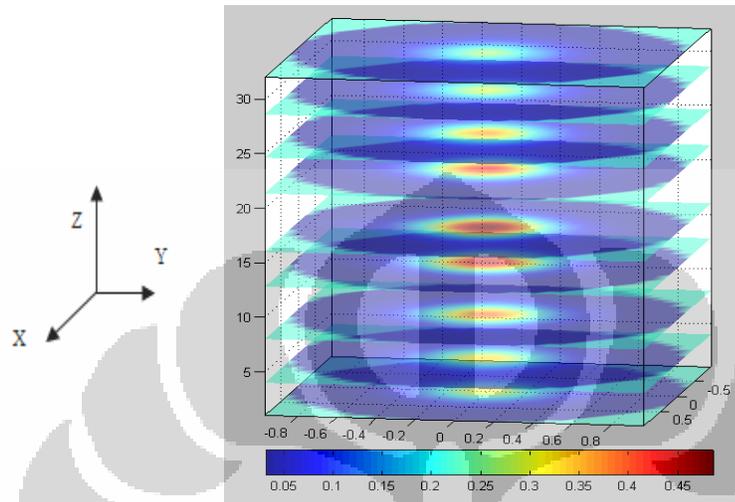
- 8 Sensor persegi satu tingkat.



Gambar 4.20 Hasil rekonstruksi 8 sensor persegi satu tingkat

Pada sensor jenis ini tidak dapat menghasilkan citra tiga dimensi sebagaimana yang terlihat pada gambar diatas. penyebabnya sudah dijelaskan pada sub bab 4.1. warna merah adalah permitivitas maksimal sedangkan warna biru adalah permitivitas minimal.

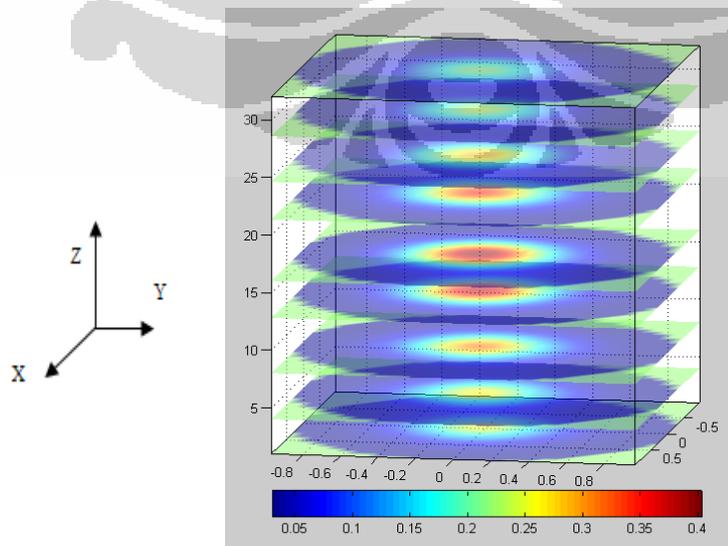
- 8 Sensor persegi dua tingkat.



Gambar 4.21 Hasil rekonstruksi 8 sensor persegi dua tingkat

Dalam gambar ini mulai terlihat objek yang berbeda dan terlihat lonjong. Hal ini dikarenakan sensitivitas yang dihasilkan, nilai intensitas medan listriknya lebih besar pada daerah atas dan bawah sehingga gambar tertarik pada kedua sisi atas dan bawah.

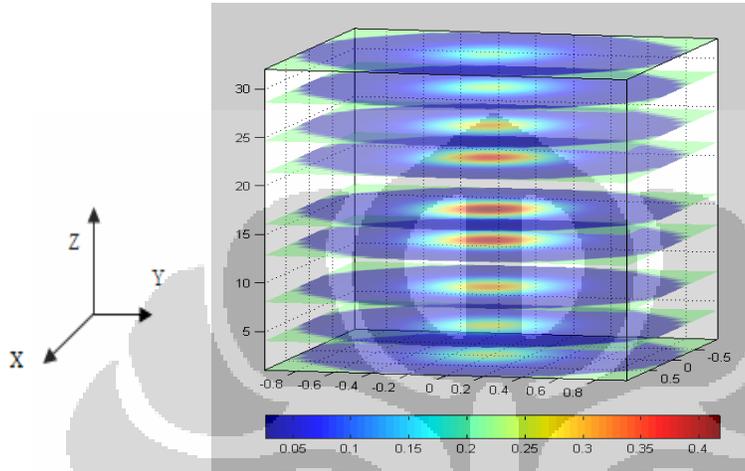
- 8 Sensor persegi dua tingkat dengan tingkat kedua diputar 45 derajat.



Gambar 4.22 Hasil rekonstruksi 8 sensor persegi dua tingkat dengan tingkat kedua diputar 45 derajat

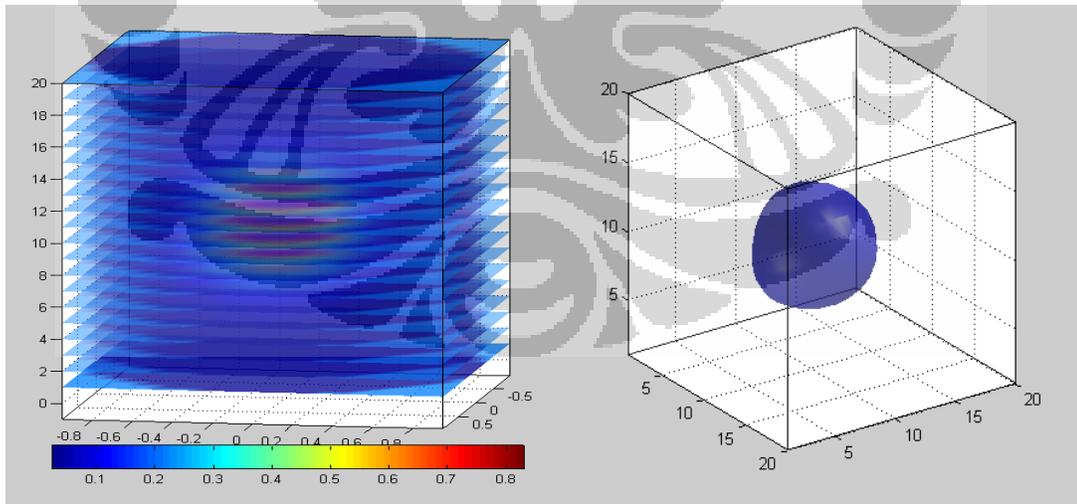
Pada Gambar ini, wujud bola semakin jelas terlihat walaupun masih berbentuk lonjong.

- 8 Sensor segitiga dua tingkat.



Gambar 4.23 Hasil rekonstruksi 8 sensor segitiga dua tingkat

Dalam gambar ini lebar bola semakin kecil dan bentuknya tetap lonjong. Dalam hal ini Sensitivitas persegi lebih baik dari pada sensitivitas segitiga.

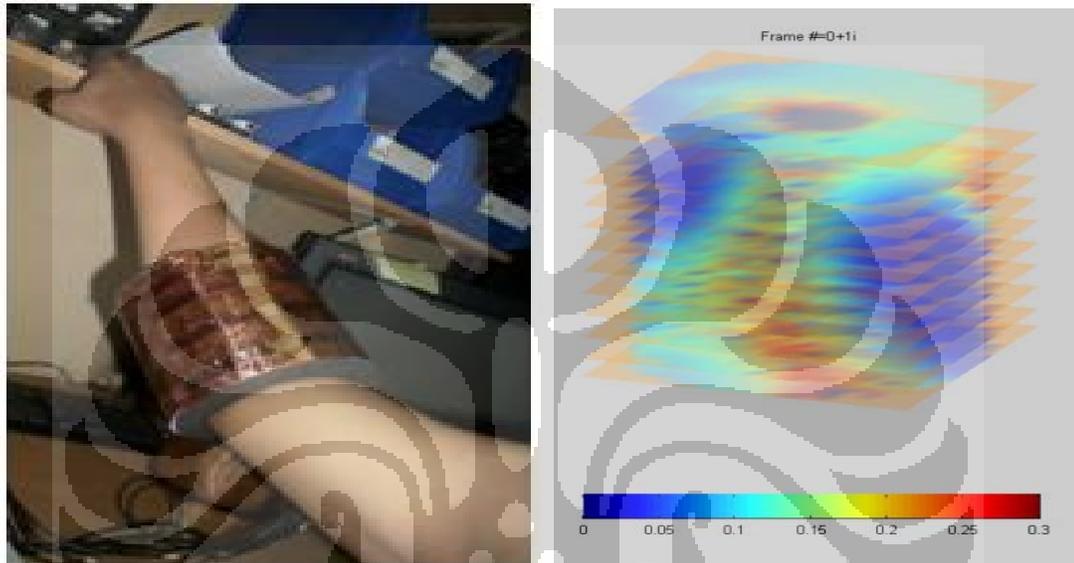


Gambar 4.24 Hasil rekonstruksi 12 sensor persegi tiga tingkat

Pada gambar ini terlihat phantom bola dengan jelas sekali. Hal ini dikarenakan bola berada dalam distribusi sensitivitas 12 sensor persegi tiga tingkat

yang memiliki banyak variasi. Dengan demikian model sensor inilah yang paling baik untuk kasus ini.

2. Hasil Rekonstruksi Eksperimen



Gambar 4.25 Korelasi distribusi sensitivitas dengan citra yang dihasilkan

Gambar 4.25 Menampilkan gambar yang dihasilkan dari hasil sensitivitas yang telah disimulasikan dan sensor yang telah dibuat. Pada pojok kanan bawah terdapat *color bar* dengan skala 0 sampai 0.3. skala nol mewakili permitivitas udara yang nilainya sama dengan satu. Sedangkan skala 0.3 mewakili permitivitas air yang nilainya sama dengan 80 pada suhu ruang. Dengan demikian alat ini hanya mampu mendeteksi benda yang memiliki permitivitas antara 1 sampai 80. Gambar pojok kanan bawah menampilkan gambar lengan pada bagian siku. Jelas terlihat bahwa warna yang membentuk oleh tangan di dominasi oleh warna pada skala 0.225 pada *color bar*. Hal ini karena lengan manusia katakanlah didominasi oleh unsur lemak yang memiliki permitivitas 60 dengan demikian $60/80 = 3/4$, pada skala *color bar* nilainya adalah 0.225.