

**KAJIAN RESOLUSI CITRA OPTIMUM PADA
METODE REKONSTRUKSI *FILTER BACK PROJECTION*
DAN ITERASI ALJABAR**

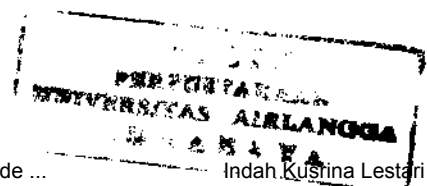
SKRIPSI



**INDAH KUSRINA LESTARI
NIM : 080012244**

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS AIRLANGGA
SURABAYA**

2005



**KAJIAN RESOLUSI CITRA OPTIMUM PADA
METODE REKONSTRUKSI *FILTER BACK PROJECTION*
DAN ITERASI ALJABAR**

SKRIPSI

**Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains
Bidang Fisika pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Airlangga Surabaya**

Oleh :

INDAH KUSRINA LESTARI
NIM. 080012244

Tanggal Lulus : 11 Agustus 2005

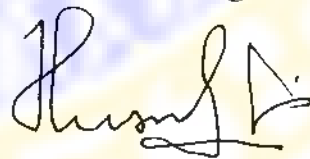
Disetujui Oleh :

Pembimbing I,



Nuril Ukhrowiyah, S.Si., M.Si.
NIP. 132 230 839

Pembimbing II,



Khusnul Ain, ST., M.Si.
NIP. 132 166 487

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

Judul : **KAJIAN RESOLUSI CITRA OPTIMUM PADA METODE REKONSTRUKSI *FILTER BACK PROJECTION* DAN ITERASI ALJABAR.**

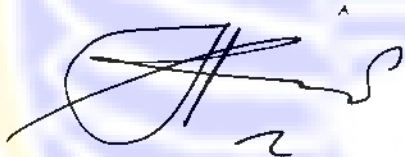
Penyusun : **Indah Kusrina Lestari**

NIM : **080012244**

Tanggal Ujian : **11 Agustus 2005**

Disetujui Oleh :

Pembimbing I,



Nuril Ukhrowiyah, S.Si., M.Si.
NIP. 132 230 839

Pembimbing II,



Khusnul Ain, ST., M.Si.
NIP. 132 166 487

Mengetahui,

Ketua Jurusan Fisika FMIPA

Universitas Airlangga



Drs. Pujiyanto, M.S.
NIP. 131 756 001

PEDOMAN PENGGUNAAN SKRIPSI

Skripsi ini tidak dipublikasikan, namun tersedia di perpustakaan dalam lingkungan Universitas Airlangga. Diperkenankan untuk digunakan sebagai referensi kepustakaan, tetapi pengutipan seijin penulis dan harus menyebutkan sumbernya sesuai dengan kaidah ilmiah.

Dokumen skripsi ini merupakan hak milik Universitas Airlangga.

Indah Kusrina Lestari. 2005. Kajian Resolusi Citra Optimum Pada Metode Rekonstruksi Filter Back Projection Dan Iterasi Aljabar., Skripsi ini dibuat dibawah bimbingan Nuril Ukhrowiyah, S.Si., M.Si dan Khusnul Ain, ST. M.Si., Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Airlangga.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh resolusi citra terhadap kualitas citra yang dihasilkan dengan menggunakan metode rekonstruksi Filter Back Projection (FBP) dan Iterasi Aljabar (ART), serta menentukan ukuran resolusi citra optimum pada masing-masing metode rekonstruksi tersebut. Hasil penelitian inidapat dimanfaatkan sebagai sarana studi penelitian dan pengembangan tomografi lebih lanjut karena telah diperoleh ukuran resolusi citra optimum pada metode rekonstruksi FBP dan ART.

Prosedur penelitian diawali dengan membuat objek sintetik berbentuk Plus dan Segi Tiga dengan ukuran resolusi citra bervariasi, kemudian objek-objek sintetik tersebut *discanning* secara simulasi. Proses *scanning* menggunakan metode sampling pola bujursangkar (square) untuk menghasilkan sinogram. Sinogram-sinogram tersebut kemudian direkonstruksi menggunakan metode rekonstruksi FBP dan ART untuk mendapatkan citra hasil rekonstruksi. Kualitas citra hasil rekonstruksi ditentukan dengan membedakan citra hasil rekonstruksi terhadap objek sintetik yang mempunyai resolusi bersesuaian. Perbedaan dilakukan secara visual dan numeric. Perbedaan secara visual dilakukan dengan melihat citra hasil rekonstruksi secara langsung dan representasi profil garis horizontal masing-masing resolusi citra. Perbedaan secara numerik dilakukan dengan menghitung *rmsd* dan e_{max} .

Hasil analisis menunjukkan kualitas citra-citra hasil rekonstruksi metode FBP dipengaruhi besar resolusi citra, sedangkan untuk metode ART secara relatif tidak dipengaruhi besar resolusi citra. Hasil perbedaan secara visual menunjukkan kualitas citra hasil rekonstruksi metode ART lebih mendekati objek sintetik dibandingkan dengan metode FBP. Profil garis horisontal citra-citra hasil rekonstruksi metode ART lebih berhimpit dengan profil garis horisontal objek sintetik yang mempunyai resolusi bersesuaian, serta memiliki nilai *rmsd* dan e_{max} lebih kecil dibandingkan dengan nilai *rmsd* dan e_{max} citra-citra hasil rekonstruksi metode FBP. Metode rekonstruksi ART memiliki resolusi citra optimum pada ukuran 43 x 43, ukuran tersebut lebih kecil dibandingkan dengan ukuran resolusi citra optimum pada metode rekonstruksi FBP yaitu 75 x 75.

Kata Kunci : Tomografi Komputer, Resolusi Citra Optimum, Filter Back Projection, Algebraic Reconstruction Technique

Indah Kusrina Lestari. 2005. Study of Optimum Image Resolution in Filter Back Projection and Algebraic Reconstruction Technique., Under guidance Nuril Ukhrowiyah, S.Si., M.Si and Khusnul Ain, ST. M.Si., Departement of physics Faculty of Mathematics and natural sciences, Airlangga University.

ABSTRACT

Aim of this research are two analyze influence image resolution to image quality with FBP and ART reconstruction method, and assign size of optimum image resolution between each reconstruction method. This result can be used as research study and more over tomographic development, because have had optimum image resolution in FBP and ART reconstruction method.

Procedure of research started with making synthetic objects curved plus and triangle with variated image resolution size, then scanned with simulation. To getting the sinogram we use square sampling method. The sinograms reconstructed using FBP and ART reconstruction method to getting reconstructed CT Image. Quality of reconstructed CT Image are assigned by differentiate reconstructed images to synthetic objects which had the same resolution. The difference doing with visual and numerical. Differentiate by visual with look the result of reconstruction image direct and horizontal profile representation each image resolution. Differentiate by numerical with accounting $rmsd$ and e_{max} value.

This analyze show that images quality of FBP reconstructed method influence by size of image resolution, and relatively using ART reconstructed method not influence by size of image resolution. The visual difference shows that quality of reconstructed CT Images with ART method are close to synthetic objects than FBP method. This is shown that horizontal profile of reconstructed CT Image with ART are close to horizontal profile of synthetic objects and have $rmsd$ and e_{max} value smaller than FBP. ART reconstruction method have the optimum image resolution at size 43×43 , this size smaller than optimum image resolution of DBP reconstruction method at size 75×75 .

Key word : Computed Tomography, Optimum Image Resolution, Filter Back Projection, Algebraic Reconstruction Technique

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas anugerah kekuatan, kemampuan, petunjuk, dan taufik-Nya sehingga penulisan skripsi dengan judul "*KAJIAN RESOLUSI CITRA OPTIMUM PADA METODE REKONSTRUKSI FILTER BACK PROJECTION DAN ITERASI ALJABAR*" telah terselesaikan.

Penulisan skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains bidang Fisika di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Airlangga.

Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. **Allah SWT** yang senantiasa memberikan rahmat dan karunia yang tak ternilai.
2. **Orang tuaku**, Ayah, Ibu tercinta serta kakak - kakak dan adikku tersayang yang terus memberikan kasih sayang dan semangat untuk menyelesaikan skripsi ini.
3. Ibu **Nuril Ukhrowiyah, S.Si., M.Si** dan Bapak **Khusnul Ain, ST., M.Si**, selaku dosen pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu untuk memberikan saran, bimbingan, dan semangat selama menyelesaikan skripsi ini.
4. Ibu **Prof. Dr. Ir. Suhariningsih**, selaku dosen wali yang selalu memberikan dorongan dan perhatian selama menempuh perkuliahan.
5. Bapak **Drs. Pujiyanto, M.Si**, selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA UNAIR.
6. Bapak **Drs. R. Arief Wibowo, M.Si** dan Bapak **Drs. Muzzaki**, selaku dosen penguji skripsi atas kritik, saran dan masukan demi kesempurnaan skripsi ini.
7. **My Best Friend**, Pu'ah, Sapta, Nia, Nur, Leyli, Lilik, Dian, Yuke, dan semua temanku angkatan 2000..... persahabatan kita tidak akan pernah aku lupakan.

8. **Team Seperjuanganku**, Ida Mar "Pu'ah", mbak Eva, mas Arya "King",
(perjuangan kita tidak sia-sia) buat Leyli, Purnomo, mbak Citra (ayo kalian bisa...)
9. **My Spirt Boy**, Mas "Ilham" semoga cita-cita kita terwujud (Amien....)
10. **Motor dan komputerku** yang setia menemaniku selama menyelesaikan Skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh sebab itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberi manfaat dalam pemberian informasi ilmiah bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Agustus 2005

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	viii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.1 Rumusan Masalah	3
1.2 Batasan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Koefisien Atenuasi Linear	5
2.2 Prinsip Kerja Sistem Tomografi Komputer Generasi Pertama	7
2.3 Metode Rekonstruksi FBP	11
2.4 Metode Rekonstruksi ART	12
BAB III METODE PENELITIAN	15
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	15
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	15
3.2.1 Alat Penelitian	15
3.2.2 Bahan Penelitian	15
3.3 Prosedur Penelitian	16
3.3.1 Pembuatan Objek Sintetik	17
3.3.2 Proses Pemayaran (<i>Scanning</i>)	18
3.3.3 Proses Rekonstruksi	18
3.3.4 Analisis	19

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	21
4.1 Pembuatan Objek Sintetik	21
4.2 Sinogram Hasil Proses Pemayaran (<i>Scanning</i>)	23
4.3 Citra Hasil Proses Rekonstruksi	24
4.4 Analisis Kualitas Citra	29
4.4.1 Objek Plus	29
4.4.2 Objek Segi Tiga	38
4.5 Pembahasan	47
 BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	 49
5.1 Kesimpulan	49
5.2 Saran	50
 DAFTAR PUSTAKA	 51
LAMPIRAN	52

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Proses pelemahan intensitas sinar radiasi oleh bahan dengan ketebalan x	7
Gambar 2.2 Susunan Sistem Tomografi Komputer Generasi Pertama	8
Gambar 2.3 Kisi square hasil dari cara sampling pola square untuk pemayaran sampai 180°	9
Gambar 2.4 Diskritisasi citra menjadi N piksel, lintasan sinar ke- j yang melewati piksel ke- i mempunyai nilai bobot atenuasi sebesar w_{ij}	13
Gambar 3.1 Prosedur penelitian secara simulasi	16
Gambar 3.2 Objek Sintetik	17
Gambar 4.1 a. Obyek Plus dengan resolusi citra bervariasi	22
b. Obyek Segi Tiga dengan resolusi citra bervariasi	22
Gambar 4.2 a. Sinogram hasil proses <i>scanning</i> untuk obyek Plus dengan resolusi citra bervariasi	23
b. Sinogram hasil proses <i>scanning</i> untuk obyek Segi Tiga dengan resolusi citra bervariasi	24
Gambar 4.3 a. Citra Plus hasil rekonstruksi metode FBP dari sinogram gambar 4.2.a	25
b. Citra Segi Tiga hasil rekonstruksi metode FBP dari sinogram gambar 4.2.b	25
Gambar 4.4 a. Citra Plus hasil proses rekonstruksi metode ART ke-50 dari sinogram gambar 4.2.a	26
b. Citra Segi Tiga hasil proses rekonstruksi metode ART ke-50 dari sinogram gambar 4.2.b	27
Gambar 4.5 a. Citra Plus hasil proses rekonstruksi metode ART discrepancy 10^{-2} dari sinogram gambar 4.2.a	28
b. Citra Segi Tiga hasil proses rekonstruksi metode ART discrepancy 10^{-2} dari sinogram gambar 4.2.a	28
Gambar 4.6 Perbandingan profil garis horisontal antara citra hasil rekonstruksi dari sinogram dengan metode FBP dan ART terhadap obyek Plus referensi	29

Gambar 4.7	Plot antara rmsd dengan resolusi citra yang bersesuaian pada metode rekonstruksi FBP dan ART ke-50 untuk obyek Plus	33
Gambar 4.8	Plot antara nilai yang optimum dengan resolusi citra yang bervariasi pada metode rekonstruksi FBP dan ART ke-50 untuk obyek Plus	34
Gambar 4.9	Plot antara rmsd dengan resolusi citra yang bersesuaian pada metode rekonstruksi FBP dan ART discrepancy 10^{-2} untuk obyek Plus	36
Gambar 4.10	Plot antara nilai yang optimum dengan resolusi citra yang bervariasi pada metode rekonstruksi FBP dan ART discrepancy 10^{-2} untuk obyek Plus	37
Gambar 4.11	Perbandingan profil garis horisontal antara citra hasil rekonstruksi dari sinogram dengan metode FBP dan ART terhadap obyek Segi Tiga referensi	39
Gambar 4.12	Plot antara rmsd dengan resolusi citra yang bersesuaian pada metode rekonstruksi FBP dan ART ke-50 untuk obyek Segi Tiga	42
Gambar 4.13	Plot antara nilai yang optimum dengan resolusi citra yang bervariasi pada metode rekonstruksi FBP dan ART ke-50 untuk obyek Segi Tiga	43
Gambar 4.14	Plot antara rmsd dengan resolusi citra yang bersesuaian pada metode rekonstruksi FBP dan ART discrepancy 10^{-2} untuk obyek Segi Tiga	45
Gambar 4.15	Plot antara nilai yang optimum dengan resolusi citra yang bervariasi pada metode rekonstruksi FBP dan ART discrepancy 10^{-2} untuk obyek Segi Tiga	46

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1 Perbedaan secara numerik antara citra hasil rekonstruksi metode FBP dan metode ART ke-50 dengan objek referensi yang resolusinya bersesuaian untuk objek Plus	32
Tabel 4.2 Perbedaan secara numerik antara citra hasil rekonstruksi metode FBP dan metode ART discrepancy 10^{-2} dengan objek referensi yang resolusinya bersesuaian untuk objek Plus	35
Tabel 4.3 Perbedaan secara numerik antara citra hasil rekonstruksi metode FBP dan metode ART ke-50 dengan objek referensi yang resolusinya bersesuaian untuk objek Segi Tiga	41
Tabel 4.4 Perbedaan secara numerik antara citra hasil rekonstruksi metode FBP dan metode ART discrepancy 10^{-2} dengan objek referensi yang resolusinya bersesuaian untuk objek Segi Tiga	44

*Sejak sang waktu
Menganugerahiku kerterjagaan
Rahasia-Mu menjadi obsesiku
Kusadari kehidupan ini amanah dari-Mu
Kupersembahkan hasil karyaku
Untuk mewujudkan janjiku pada-Mu*

*Ku persembahkan skripsi ini untuk :
Ayahanda & Ibunda tercinta,
Semua Keluarga yang senantiasa
memberikan untaian doa dan curahan
kasih sayang yang tak terhingga dalam hidupku*

**Allah akan meninggikan orang-orang yang beriman diantaramu dan orang-orang yang diberi ilmu pengetahuan beberapa derajat
(Al-Mujadilah :11)**

**Barang siapa menempuh jalan untuk menuntut ilmu, maka Allah memudahkan bagi orang itu karena ilmu tersebut juga jalan menuju surga
(HR. Muslim)**

**Barang siapa yang menghendaki bahagia di dunia maka harus dengan ilmu, dan barang siapa menghendaki bahagia di akherat maka harus dengan ilmu, dan barang siapa menghendaki keduanya (dunia & akherat) maka harus dengan ilmu pula
(HR. Muslim)**

**Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan
(An-Nasyrah : 6)**

**Allah menghendaki kemudahan bagimu dan tidak menghendaki kesukaran bagimu. Dan hendaklah kamu mengagungkan Allah atas petunjuk-Nya yang diberikan kepadamu, supaya kamu bersyukur
(Al-Baqarah :185)**

**Barang siapa yang beramal tanpa didasari ilmu, maka unsur merusaknya lebih banyak daripada maslahatnya
(Umar bin Abdul Aziz)**

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Istilah tomografi berasal dari bahasa Yunani, yaitu *tomos* yang berartiampang melintang dan *gramma* yang berarti gambar atau tulisan. Secara bebas tomografi berarti penulisan, penggambaran, pencitraan tampang-lintang benda, sedangkan pengertian teknik tomografi komputer (*computed tomography*, CT) adalah sebuah teknik untuk memperoleh gambaran internal objek tanpa merusak atau membelah objek secara fisik. Dengan demikian teknik ini dapat menggambarkan struktur internal objek secara lebih jelas, baik posisi, dimensi maupun karakteristiknya (Widodo, 2000).

Langkah utama pada sistem tomografi komputer ada dua yaitu proses pengambilan (*akuisisi*) data dan proses rekonstruksi yang keduanya saling berkaitan. Berdasarkan peletakan sumber radiasi saat proses pengambilan data, tomografi komputer dibedakan menjadi dua yaitu tomografi komputer emisi dan transmisi. Pada tomografi komputer emisi sumber radiasi diletakkan di dalam objek yang diteliti, sedangkan pada tomografi komputer transmisi sumber radiasi diletakkan di luar objek yang diteliti (Kouris, dkk, 1982).

Proses rekonstruksi merupakan proses penggambaran dari data menjadi citra. Beberapa metode rekonstruksi yang sampai saat ini terus dikembangkan adalah metode transformasi dan metode iterasi (Mueller, 1998). Salah satu contoh metode transformasi adalah metode rekonstruksi proyeksi balik terfilter (*Filter*

Back Projection = FBP), sedangkan contoh untuk metode iterasi adalah metode rekonstruksi aljabar (*Algebraic Reconstruction Technique* = ART).

Metode rekonstruksi FBP sering diaplikasikan pada tomografi komputer transmisi. Metode tersebut memiliki keunggulan yaitu hasil yang diperoleh akurat dan prosesnya cepat, namun mempunyai aturan cara sampling dan jumlah data proyeksi yang ketat sehingga metode tersebut tidak dapat digunakan pada kondisi jumlah data proyeksi kurang dari yang disyaratkan (Sauer dan Boumann, 1993). Metode rekonstruksi aljabar sering digunakan untuk menyelesaikan permasalahan rekonstruksi pada bentuk geometri (3 Dimensi) dan masalah nonlinier seperti pada tomografi difraksi sinar-X. Metode tersebut masih dapat digunakan meskipun jumlah data proyeksi sangat minim, tidak seragam, jarang atau hilang pada orientasi tertentu (Mueller, 1998), tetapi pada metode tersebut membutuhkan waktu yang lama dalam proses iterasinya.

Penelitian yang telah dilakukan Suparta dan Kusminarto tahun 1989 memperlihatkan bahwa metode rekonstruksi ART sangat potensial menghasilkan citra yang akurat, namun pada waktu itu terdapat kendala pada lama waktu proses rekonstruksi dan besar memori komputer yang diperlukan selama proses rekonstruksi. Dengan berkembangnya teknologi komputer, masalah lama waktu proses iterasi dapat diselesaikan.

Pada penelitian sebelumnya (Huda, 2004) digunakan resolusi citra berukuran 27 x 27 piksel dan diperoleh citra hasil rekonstruksi yang kurang maksimal. Hal ini mungkin disebabkan resolusi citra yang digunakan terlalu kecil yaitu 27 x 27.

Terdapat hubungan antara jumlah data dengan resolusi citra rekonstruksi yang akan diperoleh. Jumlah data ini ditentukan oleh banyak langkah translasi dan rotasi. Baik pada metode rekonstruksi FBP maupun ART apabila digunakan jumlah data yang sedikit maka resolusi citra rekonstruksi yang akan diperoleh rendah. Sebaliknya jika digunakan jumlah data yang banyak maka resolusi citra yang akan diperoleh tinggi, namun jika dilakukan secara eksperimen langkah translasi dan rotasi berhingga atau terbatas (Suparta, 1999). Dengan demikian perlu dilakukan kajian berapa resolusi citra yang optimum pada metode rekonstruksi FBP dan ART.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang ada, maka permasalahan pada penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh resolusi citra terhadap kualitas citra yang dihasilkan dengan menggunakan metode rekonstruksi FBP ?
2. Bagaimana pengaruh resolusi citra terhadap kualitas citra yang dihasilkan dengan menggunakan metode rekonstruksi ART ?
3. Bagaimana kualitas citra hasil rekonstruksi antara metode rekonstruksi FBP dengan metode rekonstruksi ART ?
4. Berapa resolusi citra yang optimum pada masing-masing metode rekonstruksi tersebut untuk memperoleh citra hasil rekonstruksi yang paling akurat dan terbaik ?

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan secara simulasi. Resolusi citra $N \times N$ yang digunakan bervariasi dari $N = 11$ sampai dengan $N = 131$, dengan N bilangan ganjil berinterval 8. Intensitas radiasi sebelum memasuki objek diasumsikan konstan. Proses rekonstruksi memanfaatkan program rekonstruksi citra yang sudah ada yaitu program CT Imager 1.0 untuk rekonstruksi metode FBP dan program ART Reconstruction untuk rekonstruksi metode ART.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan sebagai berikut :

1. Menganalisis pengaruh resolusi citra terhadap kualitas citra yang dihasilkan dengan menggunakan metode rekonstruksi FBP.
2. Menganalisis pengaruh resolusi citra terhadap kualitas citra yang dihasilkan dengan menggunakan metode rekonstruksi ART.
3. Menganalisis kualitas citra hasil rekonstruksi antara metode rekonstruksi FBP dengan metode rekonstruksi ART.
4. Menentukan resolusi citra yang optimum pada kedua metode rekonstruksi tersebut untuk memperoleh citra hasil rekonstruksi paling akurat dan terbaik.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk sarana studi penelitian dan pengembangan tomografi lebih lanjut, khususnya di FMIPA jurusan Fisika UNAIR.
2. Diperoleh resolusi citra optimum untuk metode rekonstruksi FBP dan ART.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai koefisien atenuasi linear, prinsip kerja sistem tomografi komputer generasi pertama, metode rekonstruksi FBP dan metode rekonstruksi iterasi aljabar (ART).

2.1 Koefisien Atenuasi Linear

Pengetahuan mengenai interaksi sinar radiasi dengan materi sangat berperan dalam teknik tomografi komputer karena sangat berkaitan dengan hasil citra yang diperoleh suatu objek (Kouris, dkk, 1982). Sinar radiasi tersebut berfungsi sebagai perunut (probe) dalam tomografi komputer, misalnya sinar-X, sinar- γ , neutron dan proton. Sinar radiasi dengan intensitas I_0 akan berinteraksi dengan materi sehingga berkas sinar radiasi mengalami perubahan atau penurunan intensitas menjadi I_1 yang dideteksi oleh detektor. Menurunnya intensitas tersebut memberikan informasi adanya pelemahan radiasi oleh materi yang dinyatakan sebagai koefisien atenuasi linier μ atau koefisien atenuasi massa $\mu_M = \mu / \rho$, dengan ρ adalah rapat jenis massa.

Tingkat pelemahan radiasi oleh materi bergantung pada proses penyerapan dan hamburan foton sinar radiasi dengan atom bahan yaitu melalui peristiwa interaksi fotolistrik, interaksi Compton dan produksi pasangan. Interaksi fotolistrik adalah interaksi antara sinar radiasi dengan elektron yang terikat kuat pada bagian

dalam suatu atom dan energi foton terserap seluruhnya oleh elektron sehingga elektron tersebut terpental dari atomnya. Interaksi Compton terjadi apabila foton berinteraksi dengan elektron bebas atau elektron yang terikat lemah pada atomnya dan energi foton terserap sebagian oleh elektron, sehingga terjadi hamburan foton dan elektron terhadap arah gerak sinar radiasi datang. Interaksi produksi pasangan terjadi apabila sinar radiasi berenergi tinggi melalui medan listrik disekitar inti atom dan energi foton datang terserap seluruhnya oleh inti atom sehingga terbentuk pasangan elektron positron dengan energi kinetik totalnya tepat sama dengan energi foton datang. Bila ketiga peristiwa interaksi tersebut diasumsikan saling bebas, maka koefisien atenuasi linier μ merupakan penjumlahan dari koefisien atenuasi linear dari ketiga proses tersebut dirumuskan dengan persamaan : (Widodo, 2000)

$$\mu_{total} = \mu_{ph} + \mu_{compton} + \mu_{pp} \dots\dots\dots(2.1)$$

dengan μ_{total} = koefisien atenuasi linear total

μ_{ph} = koefisien atenuasi linear fotolistrik

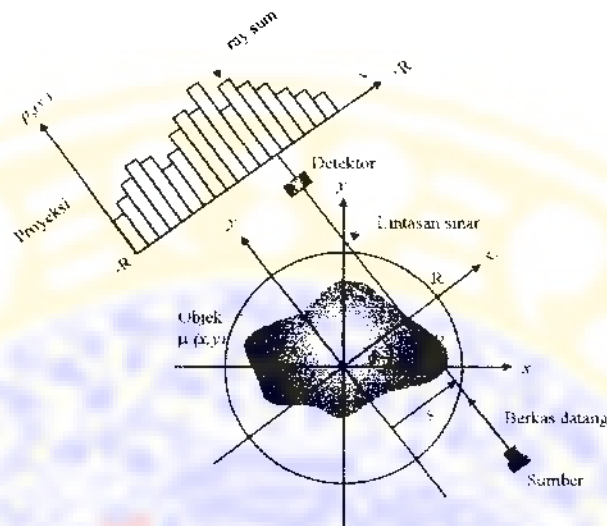
$\mu_{compton}$ = koefisien atenuasi linear hamburan Compton

μ_{pp} = koefisien atenuasi linear produksi pasangan

Bila sinar radiasi berintensitas I melewati suatu materi penyerap yang homogen dengan ketebalan dx , maka intensitas I akan mengalami pelemahan radiasi sebesar dI , dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut : (Widodo, 2000)

$$-dI = \mu I dx \dots\dots\dots(2.2)$$

atau $\frac{dI}{dx} = -\mu I \dots\dots\dots(2.3)$



Gambar 2.2 Susunan sistem tomografi komputer generasi pertama
(Wells, 1994)

Pada tomografi terdapat dua proses yaitu proses pengambilan data dan proses rekonstruksi. Pengambilan data dilakukan melalui proses pemayaran (*Scanning*) objek. Pada tomografi komputer generasi pertama selama proses *scanning* obyek digerakkan secara translasi dan rotasi. Gerak translasi dilakukan dengan interval Δx dengan posisi sumber dan detektor tegak lurus. Pada setiap satu posisi sumber dan detektor akan didapatkan satu data intensitas yang tercacah oleh detektor. Logaritma perbandingan intensitas radiasi sebelum melewati obyek dan sesudah melewati obyek didefinisikan sebagai *ray-sum* dan dinyatakan dengan persamaan :
(Wells, 1994)

$$P_{\phi}(x_r) = \ln \left(\frac{I_0}{I_t} \right) = \int_{-R}^{+R} \mu(x_r, y_r) dy_r \dots \dots \dots (2.5)$$

dengan I_0 = Intensitas sumber radiasi yang ditangkap detektor tanpa objek

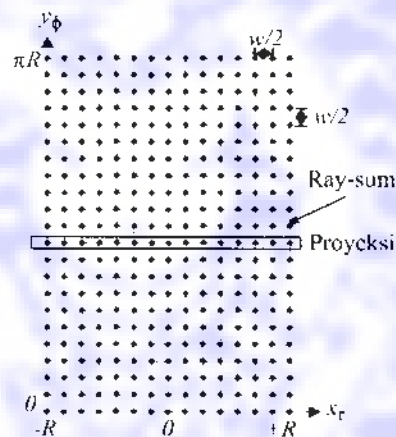
I_t = Intensitas yang ditangkap detektor setelah melewati objek

μ = Koefisien atenuasi linier

x_r = Jarak tegak lurus antara berkas dengan posisi awal

Pengambilan data secara translasi dilakukan sepanjang R sampai $-R$, dengan R adalah jejari lingkaran objek. Sekumpulan ray-sum sepanjang R sampai R pada sudut rotasi yang sama disebut satu proyeksi.

Setelah sebuah proyeksi diperoleh, proyeksi selanjutnya diperoleh dengan cara obyek diputar sejauh $\Delta\phi$. Obyek diputar dengan sudut sejauh $0 \leq \phi \leq 2\pi$. Pengambilan data hanya dilakukan pada interval $0 \leq \phi \leq \pi$, karena proyeksi yang didapat dari interval $\pi \leq \phi \leq 2\pi$ memiliki kesesuaian dengan $0 \leq \phi \leq \pi$. Kumpulan data proyeksi tersebut dapat digambarkan dalam ruang radon sebagai sebuah sinogram, seperti ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Kisi square hasil sampling pola square untuk pemayaran sampai 180°
(Suparta, 1999)

Sebuah proyeksi merupakan kumpulan dari beberapa ray-sum. Jumlah N ray-sum ditentukan oleh besarnya Δx_r sepanjang arah x_r , yang dirumuskan oleh (Suparta, 1999) :

$$N = \frac{2R}{\Delta x_r} \dots\dots\dots(2.6)$$

dengan $\Delta x_r \leq w/2$ dan $w =$ lebar kolimator atau sumber, maka

$$N = \frac{4R}{w} \dots\dots\dots(2.7)$$

Satu sinogram terdiri dari sejumlah proyeksi atau dimisalkan memiliki M proyeksi.

Jumlah M proyeksi dengan interval rotasi $\Delta\phi$ dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$M = \frac{\pi}{\Delta\phi} \dots\dots\dots(2.8)$$

dengan mengingat resolusi sudut didefinisikan $\Delta y_\phi = R\Delta\phi$, maka

$$M = \frac{\pi R}{\Delta y_\phi} \dots\dots\dots(2.9)$$

Proses pengambilan data yang umum dilakukan adalah dengan menggunakan metode sampling pola square. Metode tersebut mensyaratkan $\Delta x_r = \Delta y_\phi$. Dengan demikian persamaan 2.9 menjadi :

$$M = \frac{2\pi R}{w} \dots\dots\dots(2.10)$$

Jumlah M dapat pula dinyatakan dalam N , yaitu:

$$M = \frac{\pi N}{2} \dots\dots\dots(2.11)$$

dengan demikian proses sampling pola square memerlukan jumlah total data dari proses *scanning* (N_{sqr}) sebesar :

$$N_{sqr} = M \times N = \frac{8\pi R^2}{w^2} \dots\dots\dots(2.12)$$

Data sinogram yang diperoleh dari proses pengambilan data direkonstruksi untuk menghasilkan citra.

2.3 Metode Rekonstruksi FBP

Pada dasarnya proses rekonstruksi merupakan sebuah proses inversi (secara khusus disebut proyeksi balik) dari ruang sinogram (ruang radon) ke ruang citra (ruang kartesian) (Suparta dkk, 2000).

Sampai saat ini ada dua metode rekonstruksi yang menjanjikan untuk terus dikembangkan, yaitu metode yang berdasarkan pada metode transformasi dan metode iterasi (Meuller, 1998). Contoh metode transformasi adalah proyeksi balik terfilter (*Filter Back Projection = FBP*). Rekonstruksi ini diperoleh melalui dua tahap, yaitu proses balik (inversi) dari ruang sinogram (radon) ke ruang citra (kartesian) dan proses konvolusi oleh filter terhadap proyeksi yang dilangsungkan sebelumnya. Secara analisis proses rekonstruksi FBP dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\mu(x, y) = \int_0^{\pi} p'(\phi, x_r) d\phi \dots\dots\dots(2.13)$$

dengan

$$p'(x_r, \phi) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(x'_r, \phi) h(x_r - x'_r) dx'_r = p(x'_r, \phi) * h(x_r - x'_r) \dots\dots\dots(2.14)$$

dengan $h(x_r)$ adalah filter pengkonvolusi. Bentuk diskrit komputasional persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai :

$$\mu[i, j] = \Delta\phi \sum_{m=0}^{m-M-1} p' [i \cos(m \Delta\phi) + j \sin(m \Delta\phi), m] \dots\dots\dots(2.15)$$

$$p' [n, m] = \Delta x_r \sum_{n'=-N}^{n'+N} p [n', m] h [n - n'] \dots\dots\dots(2.16)$$

Citra hasil rekonstruksi dapat dipresentasikan dalam bentuk skala kontras warna berdasarkan perbedaan distribusi koefisien atenuasi μ . Kontras warna ini dipresentasikan dalam skala keabuan (*gray level*), dimana nilai $\mu[i,j]$ akan menentukan tingkat warna pada piksel $[i,j]$. Nilai μ maksimum dalam citra akan direpresentasikan dengan warna putih sedang nilai μ minimum akan direpresentasikan dengan warna hitam (Sutopo, 2004).

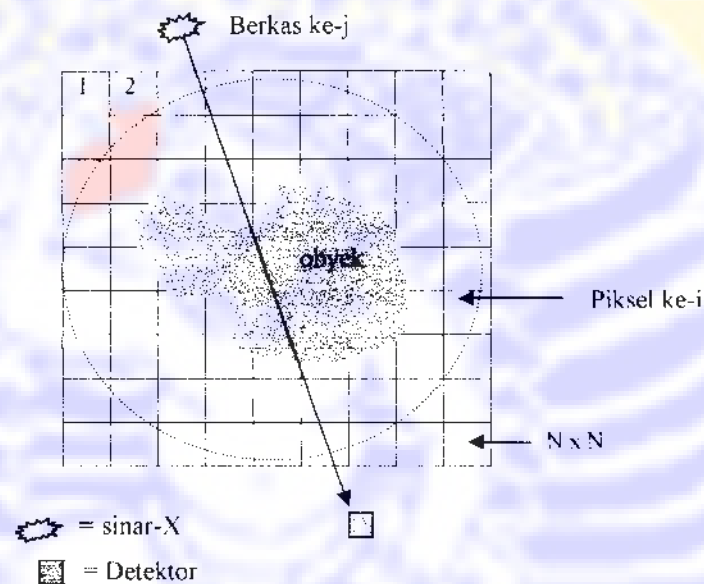
2.4 Metode Rekonstruksi Iterasi Aljabar (ART)

Proses rekonstruksi iterasi dimulai dengan memberikan nilai sembarang pada citra rekonstruksi sebagai dugaan awal. Citra dugaan awal tersebut digunakan untuk menghitung nilai-nilai proyeksi semu untuk dibandingkan dengan proyeksi terukur. Jika ada perbedaan, maka suatu faktor koreksi untuk mengoreksi citra dugaan awal tersebut ditentukan berdasarkan selisih proyeksi terukur dan proyeksi semu. Langkah tersebut diulangi untuk proyeksi lainnya. Apabila seluruh data proyeksi telah digunakan, maka satu kali iterasi dikatakan telah dilalui. Kemudian langkah-langkah iterasi tersebut terus diulang hingga tercapai ketelitian tertentu.

Proses pengambilan data pada metode rekonstruksi aljabar dengan cara menggunakan model diskritisasi seperti pada gambar 2.4, dimana integral garis merupakan jumlahan berhingga dari koefisien pelemahan linier sepanjang lintasan garis ray-sum. Jumlahan tersebut adalah sebuah sistem persamaan linier yang dapat dituliskan dalam persamaan :

$$p_j \approx \sum_{i=1}^{N \times N} w_{ij} \mu_i \quad \text{dengan } j = 1, 2, 3, \dots, N \times M \dots \dots \dots (2.17)$$

Ray-sum berkas ke- j dinotasikan dengan p_j , yang merupakan integral garis dari fungsi koefisien pelemahan linier (μ_i) sepanjang berkas ke- j . Sedangkan w_{ij} adalah nilai bobot luasan piksel ke- i yang terpapar berkas ray-sum ke- j . Sehingga untuk menghitung sebuah ray-sum, diperlukan perhitungan sebanyak $N \times N$ kali yang merupakan resolusi objek tersebut (Ukhrowiyah dan Ain, 2004)



Gambar 2.4 Diskritisasi citra menjadi N piksel, lintasan sinar ke- j yang melewati piksel ke- i mempunyai nilai bobot atenuasi sebesar w_{ij} .

Metode rekonstruksi aljabar didasari oleh persamaan 2.17, yang pertama kali diusulkan oleh Kaczmarz. Pada tahun 1973 Herman, Lent dan Rowland menurunkan persamaan tersebut yang dikenal sebagai metode ART, dengan persamaan sebagai berikut :

$$\mu_i^{(k+1)} = \mu_i^{(k)} - \frac{(p_j - q_j)}{N \times N} w_{ij} \dots \dots \dots (2.18)$$

$$\sum_{i=1}^N w_{ij}^2$$

dengan :

$\mu_i^{(k+1)}$ = citra setelah iterasi ke- $k+1$.

$\mu_i^{(k)}$ = citra sebelumnya (iterasi ke- k).

w_{ij} = nilai bobot luasan piksel ke- i yang terpapar berkas ray-sum ke- j .
(nilainya antara 0 hingga 1)

p_j = ray-sum berkas ke- j yang diperoleh dari simulasi atau eksperimen.

q_j = ray-sum semu ke- j yang diperoleh dari citra hasil rekonstruksi.

untuk nilai q_j dapat dihitung dengan persamaan :

$$q_j = \sum_{i=1}^{N \times N} \mu_i^{(k)} w_{ij} \dots \dots \dots (2.19)$$

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama 6 bulan yaitu mulai Pebruari sampai dengan Juli 2005 di Laboratorium Radiasi Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Airlangga.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Alat Penelitian

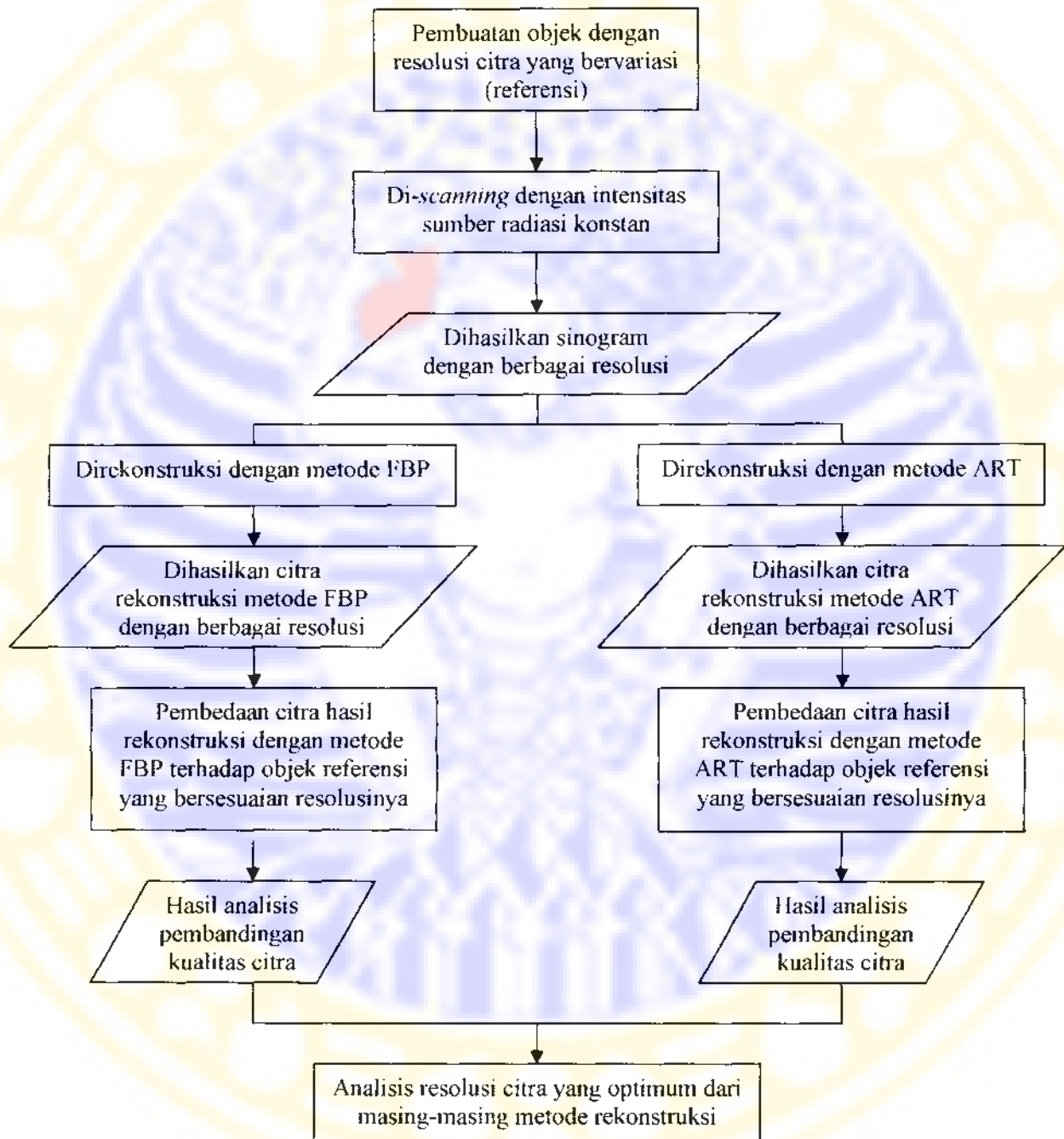
Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah seperangkat komputer yang mempunyai spesifikasi Pentium III dengan RAM 128 MB, sedangkan software yang digunakan adalah Mikrossoft Excel untuk pembuatan obyek sintetik, program CT Imager 1.0 untuk memperoleh citra rekonstruksi dengan metode FBP, program ART Reconstruction untuk memperoleh citra rekonstruksi dengan metode ART dan program Image Comparator untuk membedakan dua buah citra hasil rekonstruksi.

3.2.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah objek sintetik berbentuk Plus dan Segi Tiga, objek tersebut berupa data numerik dengan resolusi citra $N \times N$, dengan $N = 11$ sampai dengan $N = 131$.

3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan secara simulasi. Prosedur pada penelitian ini dapat digambarkan dalam blok diagram gambar 3.1 :



Gambar 3.1 Prosedur penelitian secara simulasi

3.3.1 Pembuatan Objek Sintetik

Pada penelitian ini digunakan objek sintetik berbentuk Plus dan Segi Tiga yang dibuat dengan menggunakan program Microsoft Excel. Objek ini berupa data numerik dalam bentuk matriks dengan resolusi citra $N \times N$, yang berarti terdapat $N \times N$ piksel penyusun objek. Nilai matriks tersebut merepresentasikan nilai koefisien atenuasi linear objek μ yang nilainya selalu positif. Sedangkan piksel didefinisikan sebagai elemen terkecil penyusun citra berbentuk luasan bujur sangkar (Herman dkk., 1987), dengan ukuran lebar sisi Δx . Selanjutnya nilai Δx dianggap sebagai unit terkecil satu satuan. Objek sintetik direpresentasikan sebagai citra dengan skala keabuan, warna paling terang (putih) menunjukkan nilai μ maksimum dan warna paling gelap (hitam) menunjukkan nilai μ minimum. Objek sintetik tersebut disimpan dengan nama file plus.dat dan file segi tiga.dat yang ditampilkan dalam gambar 3.2 :



Gambar 3.2 Objek sintetik :

a. Plus.dat

b. Segi Tiga.dat

3.3.2 Proses *Scanning* (Pemayaran)

Objek sintetik Plus.dat dan Segi Tiga.dat di-*scan* untuk menghasilkan sinogram. Proses *scanning* menggunakan metode sampling pola square dengan intensitas sumber radiasi datang konstan. Proses *scanning* dilakukan secara simulasi dengan menggunakan program Square Sinogram Simulation (Sutopo, 2004).

3.3.3 Proses Rekonstruksi

Sinogram-sinogram hasil proses *scanning* direkonstruksi untuk menghasilkan citra. Proses rekonstruksi citra pada penelitian ini menggunakan dua metode rekonstruksi, yaitu metode rekonstruksi FBP dan metode rekonstruksi ART. Proses rekonstruksi dengan metode rekonstruksi FBP digunakan program CT Imager 1.0 (Suparta, 1999) sedangkan proses rekonstruksi dengan metode rekonstruksi ART digunakan program ART Reconstruction (Ukhrowiyah dan Ain, 2004). Kedua program metode rekonstruksi tersebut sudah tersedia di Laboratorium Fisika Radiasi Universitas Airlangga.

3.3.4 Analisis

Citra-citra hasil rekonstruksi dianalisis kualitasnya. Analisis citra dilakukan dengan cara membedakan citra-citra hasil rekonstruksi terhadap objek referensi yang bersesuaian resolusinya. Pembedaan citra-citra hasil rekonstruksi tersebut dilakukan secara visual dan secara numerik. Pembedaan secara visual dilakukan dengan melihat citra hasil rekonstruksi secara langsung dan representasi profil garis horisontal, dari masing-masing resolusi citranya. Pembedaan secara numerik dilakukan dengan menghitung *root mean square difference (rmsd)*, yang

mengukur kesamaan distribusi μ antar citra dan *error maksimum* (e_{\max}), yang mengukur perbedaan terbesar nilai-nilai koefisien atenuasi linier antar citra. Dengan menghitung *rmsd* dan e_{\max} dapat ditentukan citra rekonstruksi yang terbaik, semakin dekat (mirip) citra rekonstruksinya dengan citra objek numerik aslinya maka nilai *rmsd* dan e_{\max} -nya semakin kecil. Perumusan *rmsd* dan e_{\max} secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$rmsd = \frac{1}{\mu_{\max}} \left[\sqrt{\frac{\sum_i \sum_j (\mu_{cit}[i, j] - \mu_{ref}[i, j])^2}{N'}} \right] \times 100\% \quad (3.1)$$

$$e_{\max} = \frac{\max |\mu_{cit}[i, j] - \mu_{ref}[i, j]|}{\mu_{\max}} \times 100\% \quad (3.2)$$

dengan

$\mu_{cit}[i, j]$ adalah piksel citra pada koordinat $[i, j]$

$\mu_{ref}[i, j]$ adalah objek referensi pada koordinat $[i, j]$

Koordinat dibatasi sampai N' piksel yang terletak dalam objek atau lingkaran citra (Herman, 1980; Suparta, 1999). Kedua persamaan analisis citra secara numerik tersebut telah diimplementasikan dalam program Image Comparator (Nugroho, 2002) yang didapat dari Laboratorium Fisika Citra UGM dan sekarang sudah tersedia di Laboratorium Fisika Radiasi Universitas Airlangga.

Untuk mendapatkan ukuran resolusi citra yang optimum dari metode rekonstruksi FBP dan ART, dilakukan dengan cara mengurangi nilai *rmsd* antar ukuran resolusi yang berdekatan kemudian dibagi dengan ukuran resolusi citra yang berdekatan tersebut.

Secara matematis dapat dirumuskan dengan persamaan :

$$\text{Resolusi Citra Optimum} = \frac{(rmsd \text{ citra})_{N+1} - (rmsd \text{ citra})_N}{(\text{resolusi citra})_{N+1} - (\text{resolusi citra})_N} \dots\dots\dots (3.3)$$

Resolusi citra optimum akan didapat jika nilai optimasi sudah mencapai nilai konstan dan kecil.

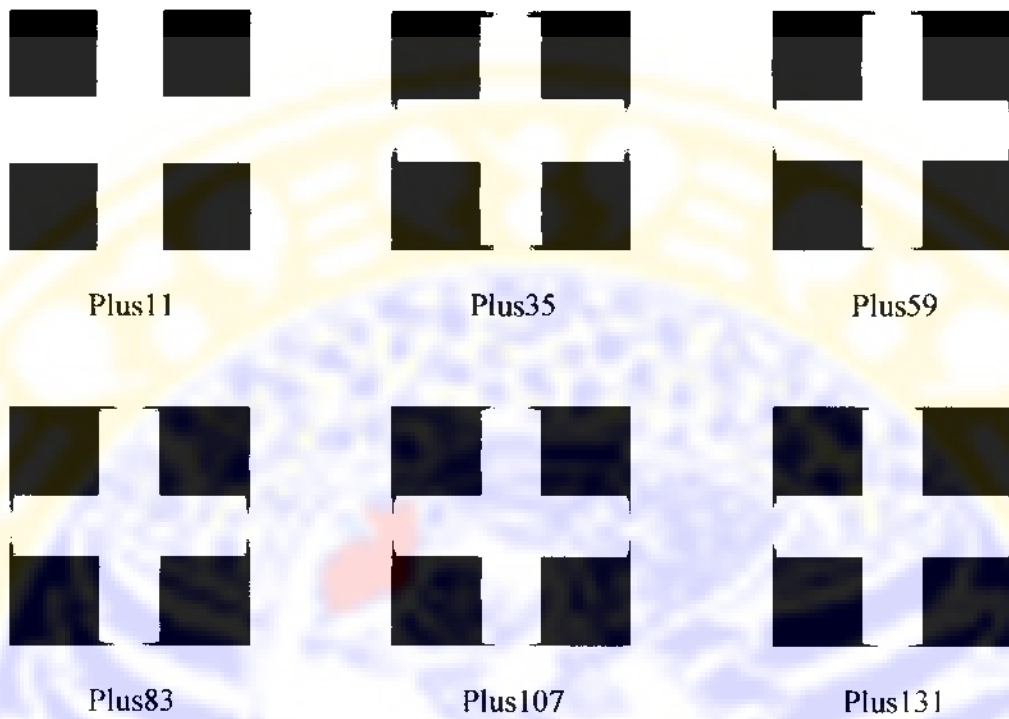
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

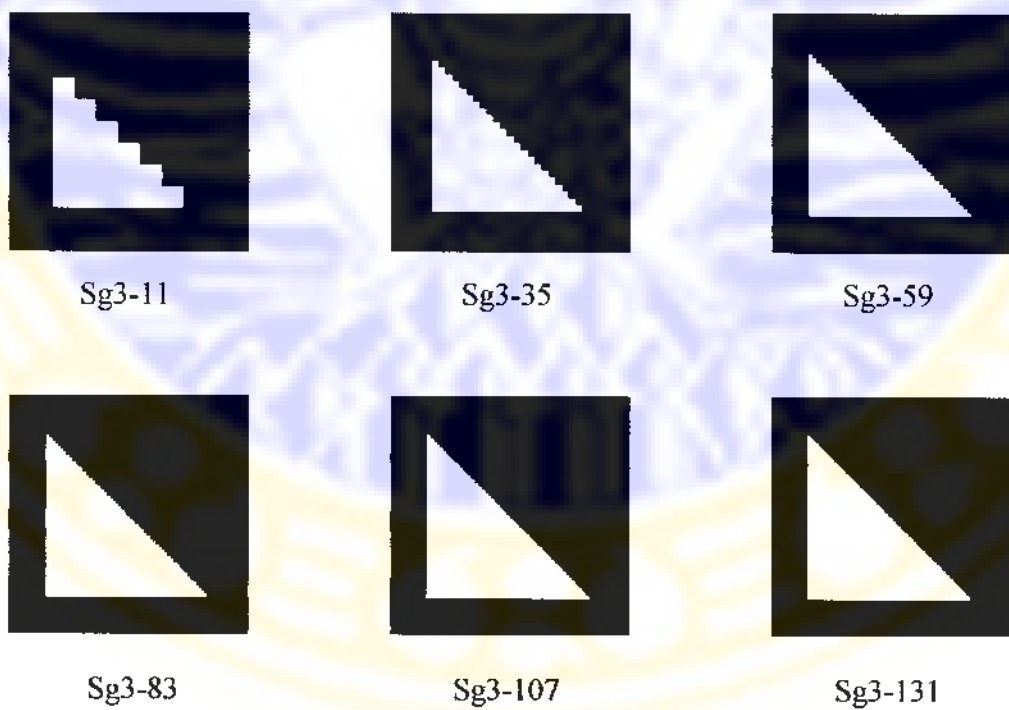
Pada bab ini akan ditunjukkan hasil-hasil penelitian secara simulasi yang meliputi pembuatan objek sintetik, sinogram hasil proses *scanning*, citra hasil proses rekonstruksi dengan menggunakan metode rekonstruksi FBP dan ART serta analisis kualitas citra.

4.1 Pembuatan Objek Sintetik

Objek sintetik berbentuk Plus dan Segi Tiga dibuat dengan menggunakan program Microsoft Excel. Objek tersebut data numerik dalam bentuk matriks dengan resolusi citra $N \times N$. Nilai matriks tersebut merepresentasikan nilai koefisien atenuasi linear objek μ . Pada penelitian ini digunakan nilai μ minimumnya adalah 0 dan nilai μ maksimumnya adalah 10, dengan satuan seperpanjang. Objek sintetik Plus dan Segi Tiga dengan resolusi citra yang bervariasi tersebut secara lengkap diperlihatkan pada lampiran 1. Pada gambar 4.1 diperlihatkan contoh sebagian dari objek sintetik Plus dan Segi Tiga. Pemberian nama objek sintetik Plus untuk resolusi citra yang berbeda adalah Plus x dengan x adalah resolusi citra, sedangkan untuk objek sintetik Segi Tiga adalah Sg3- x .



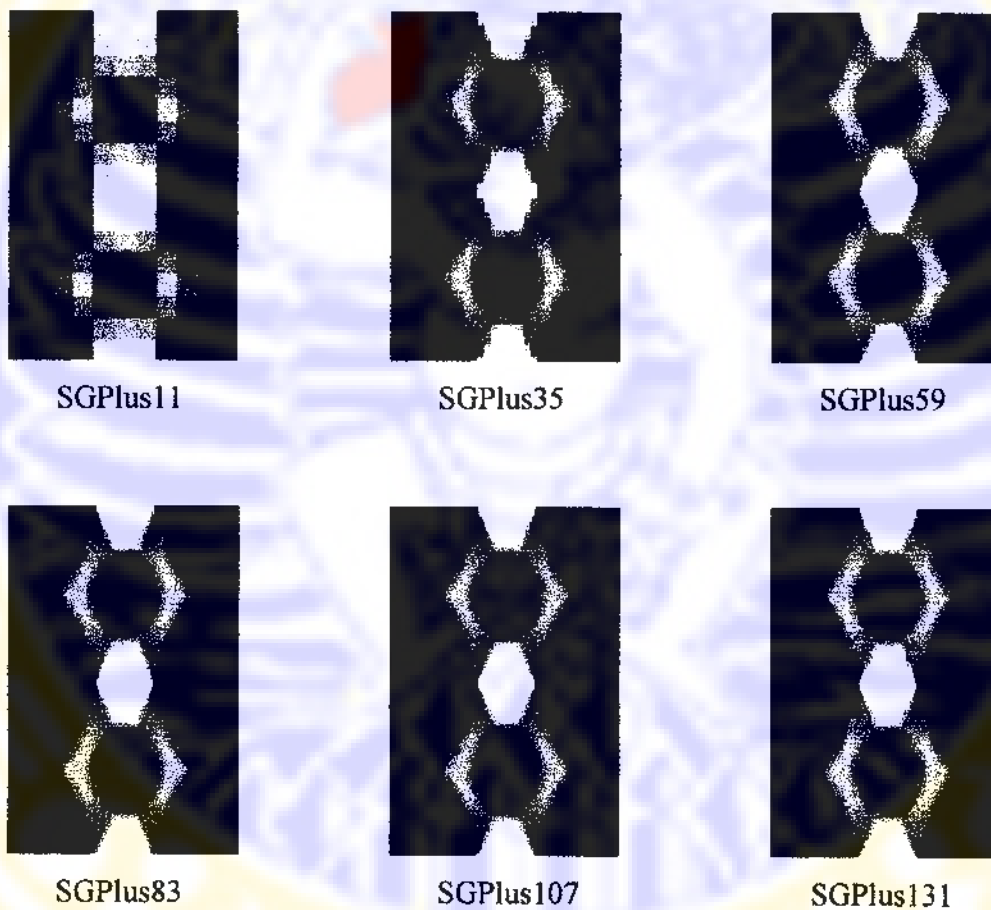
Gambar 4.1. a. Obyek PLUS dengan resolusi citra bervariasi



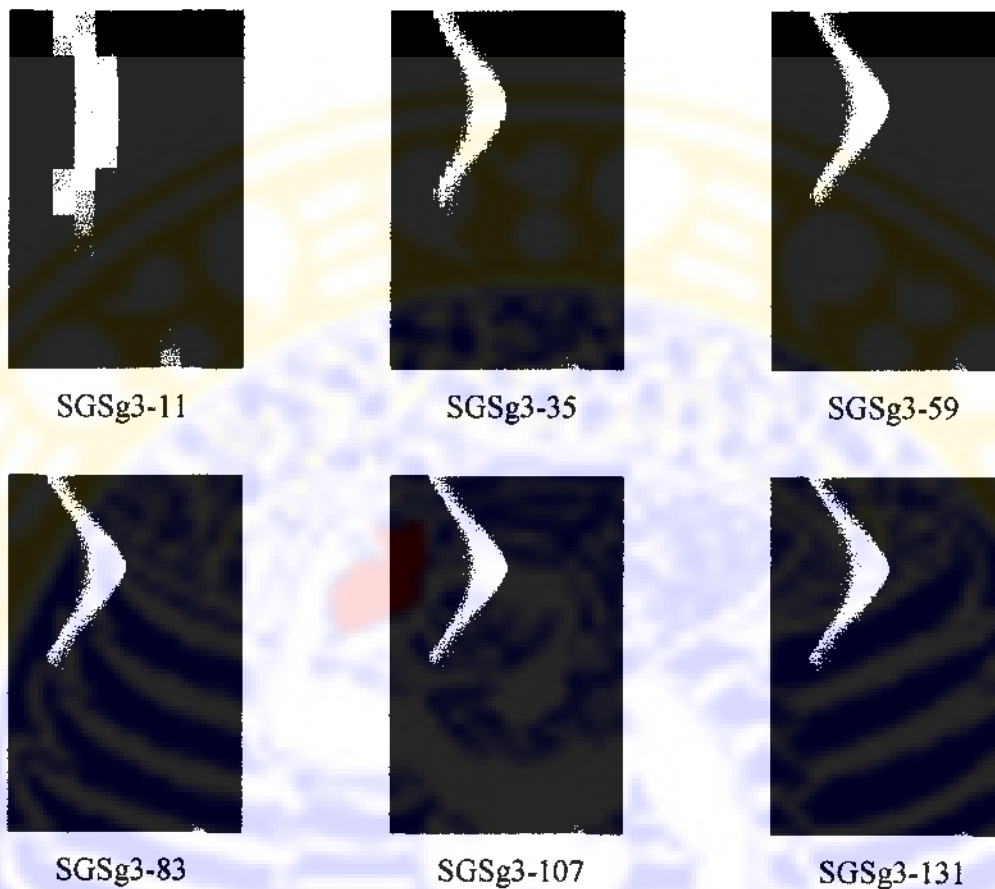
Gambar 4.1. b. Obyek Segi Tiga dengan resolusi citra bervariasi

4.2 Sinogram Hasil Proses *Scanning* (Pemayaran)

Obyek sintetik Plus dan Segi Tiga dengan resolusi yang bervariasi di-*scan* untuk menghasilkan sinogram. Sinogram-sinogram hasil pemayaran tersebut secara lengkap diperlihatkan pada lampiran 2. Pada gambar 4.2 diperlihatkan contoh sebagian dari sinogram obyek Plus dan Segi Tiga. Pemberian nama sinogram untuk obyek Plus adalah SGPlusx dengan x adalah resolusi citra, sedangkan sinogram untuk obyek Segi Tiga adalah SGSg3-x.



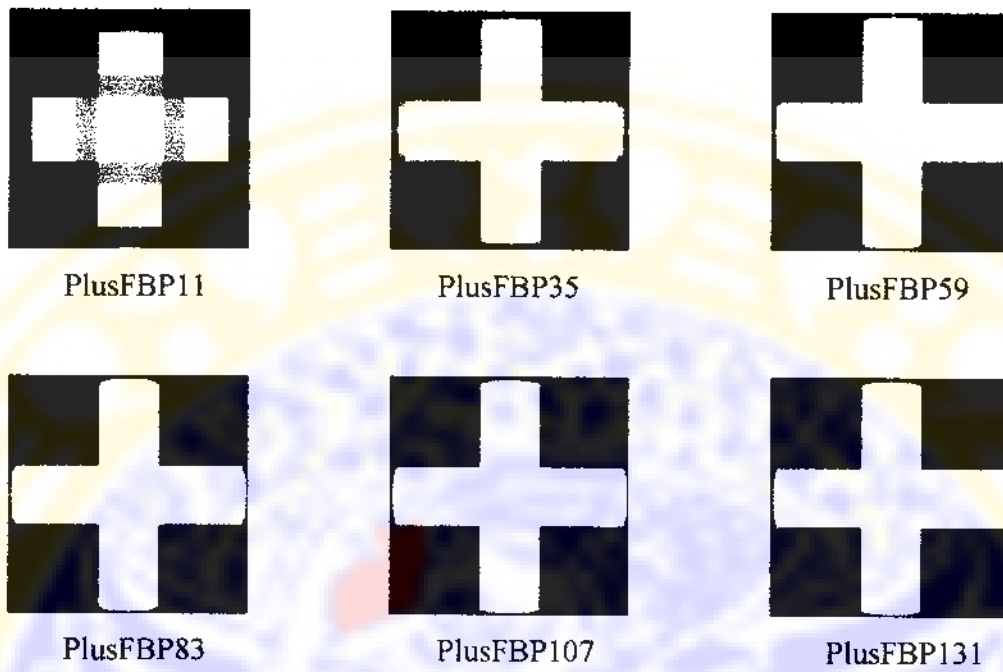
Gambar 4.2.a. Sinogram hasil proses scanning untuk obyek PLUS dengan resolusi citra bervariasi



Gambar 4.2.b. Sinogram hasil proses scanning untuk obyek Segi Tiga dengan resolusi citra bervariasi

4.3 Citra Hasil Proses Rekonstruksi

Sinogram-sinogram hasil proses *scanning* direkonstruksi untuk menghasilkan citra. Proses rekonstruksi citra pada penelitian ini menggunakan dua metode, yaitu metode rekonstruksi FBP dan metode rekonstruksi ART. Contoh citra-citra hasil rekonstruksi sinogram-sinogram gambar 4.2 dengan metode rekonstruksi FBP ditunjukkan pada gambar 4.3, sedangkan citra-citra hasil rekonstruksi tersebut secara lengkap terdapat pada lampiran 3. Pemberian nama citra-citra hasil rekonstruksi dengan metode FBP untuk obyek Plus adalah PlusFBPx dengan x adalah resolusi citra, sedangkan untuk obyek Segi Tiga adalah Sg3FBPx.

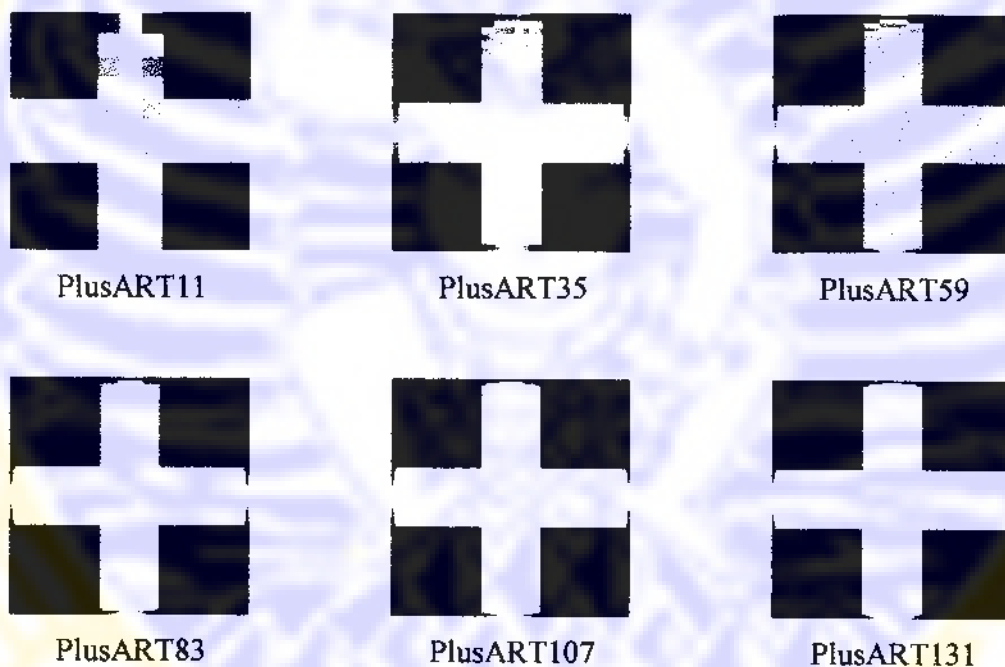


Gambar 4.3.a. Citra PLUS hasil proses rekonstruksi metode FBP dari sinogram gambar 4.2.a



Gambar 4.3.b. Citra Segi Tiga hasil proses rekonstruksi metode FBP dari sinogram gambar 4.2.b

Pada proses rekonstruksi dengan metode rekonstruksi ART dapat dilakukan dengan dua cara yaitu penghentian proses iterasi dengan membatasi jumlah iterasinya dan membatasi nilai discrepansinya. Pada penelitian ini jumlah iterasinya dibatasi sampai iterasi ke-50, sedangkan nilai discrepansinya dibatasi sampai bernilai 10^{-2} (Ukhrowiyah dan Ain, 2004). Contoh citra-citra hasil rekonstruksi metode ART dengan jumlah iterasi 50 ditunjukkan pada gambar 4.4 sedangkan citra-citra lengkapnya terdapat pada lampiran 4. Pemberian nama citra-citra hasil rekonstruksi metode ART dengan jumlah iterasi 50 untuk obyek Plus adalah PlusARTx dengan x adalah resolusi citra, sedangkan untuk obyek Segi Tiga adalah Sg3ARTx.

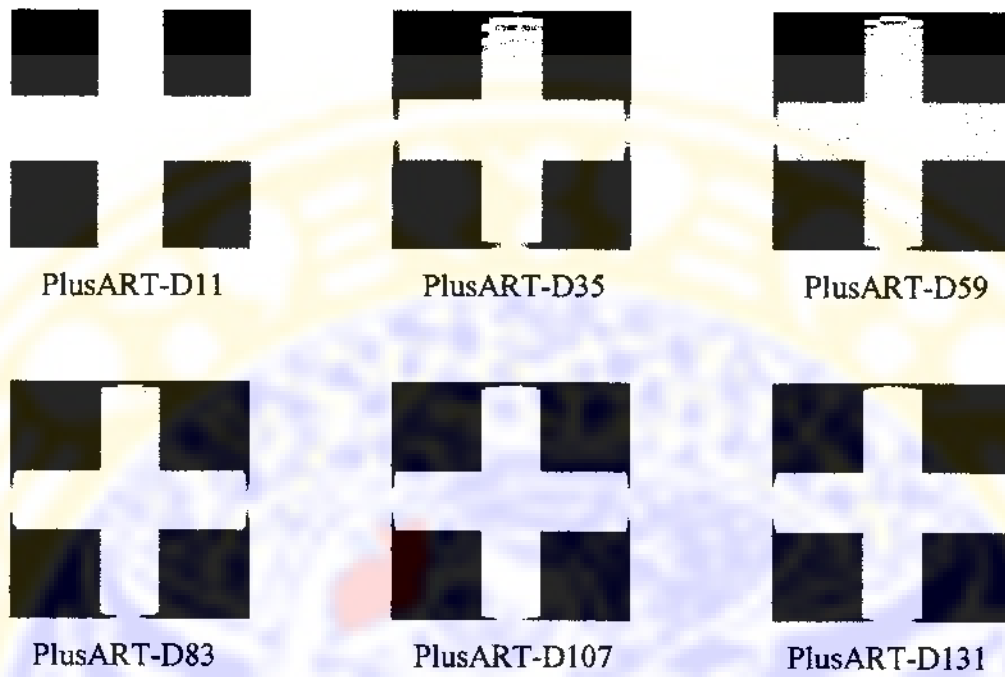


Gambar 4.4.a. Citra PLUS hasil proses rekonstruksi metode ART yang ke-50 dari sinogram gambar 4.2.a



Gambar 4.4. b. Citra Segi Tiga hasil proses rekonstruksi metode ART yang ke-50 dari sinogram gambar 4.2.b

Contoh citra-citra hasil rekonstruksi metode ART dengan nilai discrepancy 10^{-2} ditunjukkan pada gambar 4.5 dan secara lengkap terdapat pada lampiran 5. Pemberian nama citra-citra hasil rekonstruksi metode ART dengan nilai discrepancy 10^{-2} untuk obyek Plus adalah PlusART-Dx dengan x adalah resolusi citra, sedangkan untuk obyek Segi Tiga adalah Sg3ART-Dx.



Gambar 4.5.a. Citra PLUS hasil proses rekonstruksi metode ART dengan nilai Discrepancy 10^{-2} dari sinogram gambar 4.2.a



Gambar 4.5.b. Citra Segi Tiga hasil proses rekonstruksi metode ART dengan nilai Discrepancy 10^{-2} dari sinogram gambar 4.2.b

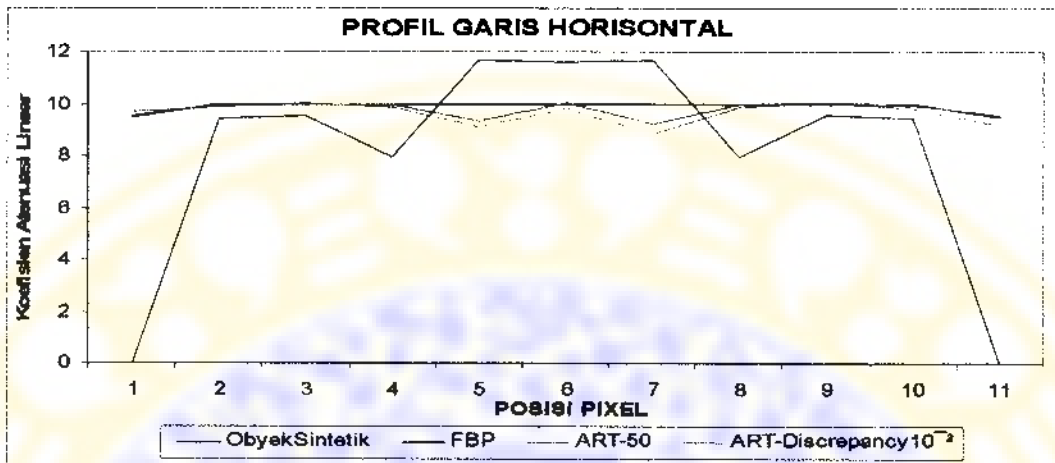
4.4 Analisis Kualitas Citra

4.4.1 Objek Plus

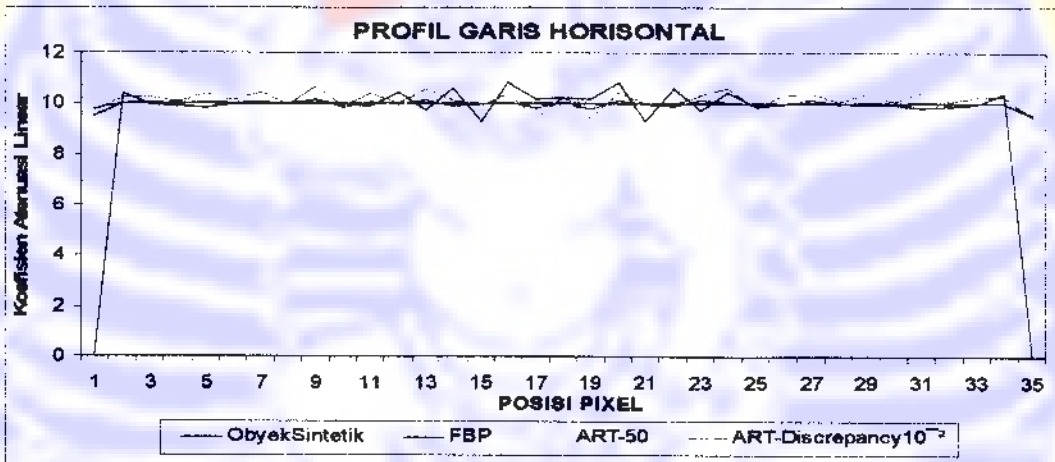
Kualitas citra-citra yang dihasilkan dianalisis dengan cara membedakan antara citra-citra yang dihasilkan dari proses rekonstruksi dengan metode FBP dan ART terhadap objek Plus referensi yang mempunyai resolusi bersesuaian. Perbedaan dilakukan secara visual dan numerik

Pembedaan secara visual dilakukan dengan melihat secara langsung citra-citra hasil rekonstruksi (gambar 4.3.a ; 4.4.a dan 4.5.a) dan profil garis horisontal (gambar 4.6). Dari hasil pembedaan secara visual dapat dilihat bahwa citra-citra hasil rekonstruksi dengan metode ART paling mendekati objek Plus referensi yang mempunyai resolusi bersesuaian.

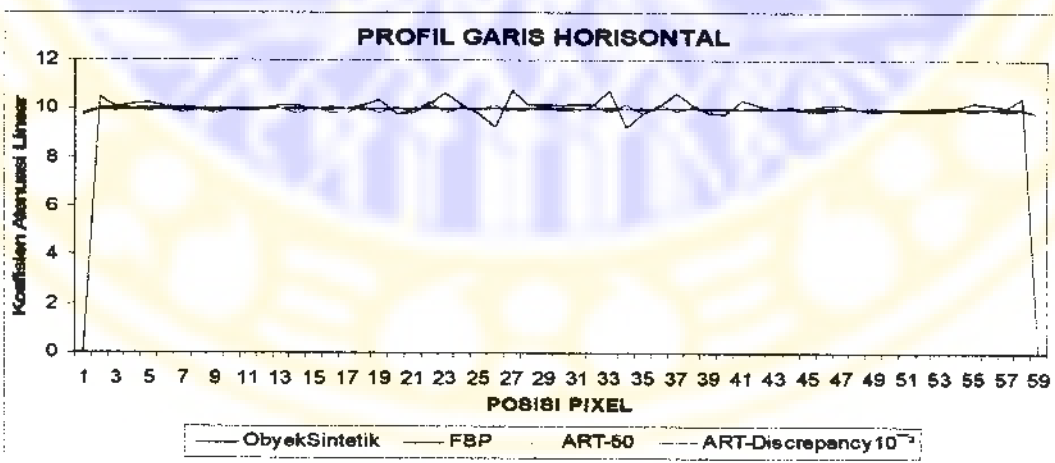
Profil garis horisontal untuk objek Plus diperlihatkan pada gambar 4.6.a sampai 4.6.f. Hasil pembedaan secara visual dengan melihat profil garis horisontal pada gambar 4.6.a sampai 4.6.f terlihat bahwa profil garis horisontal citra-citra hasil rekonstruksi dengan metode ART lebih berhimpit dengan profil garis horisontal objek referensi yang mempunyai resolusi bersesuaian, dibandingkan dengan profil garis horisontal citra-citra hasil rekonstruksi dengan metode FBP.



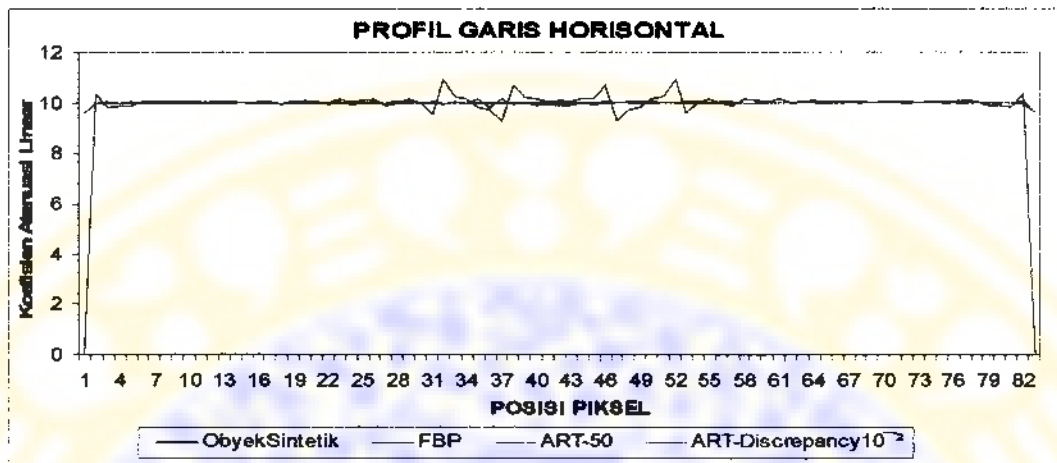
Gambar 4.6.a. Perbandingan profil garis horizontal antara citra hasil rekonstruksi dari sinogram dengan metode FBP dan ART terhadap obyek Plus referensi dengan resolusi 11 x 11



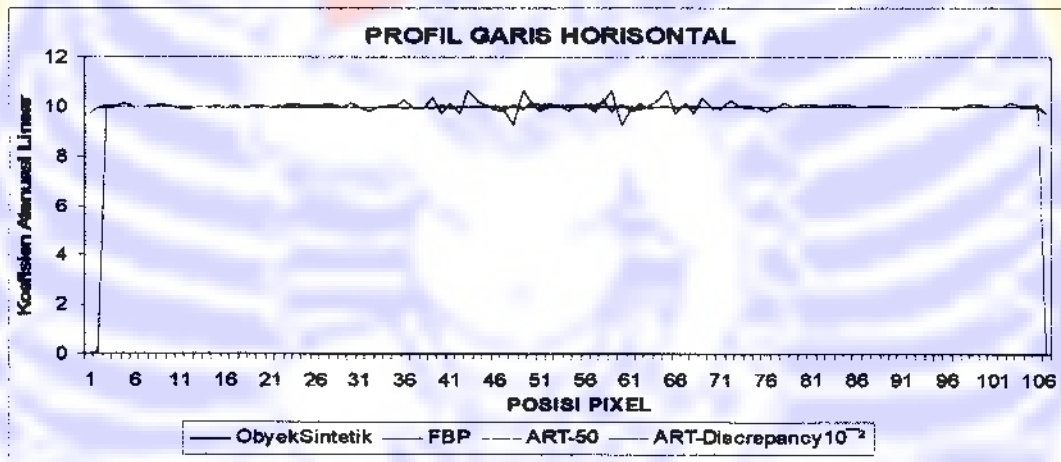
Gambar 4.6.b. Perbandingan profil garis horizontal antara citra hasil rekonstruksi dari sinogram dengan metode FBP dan ART terhadap obyek Plus referensi dengan resolusi 35 x 35



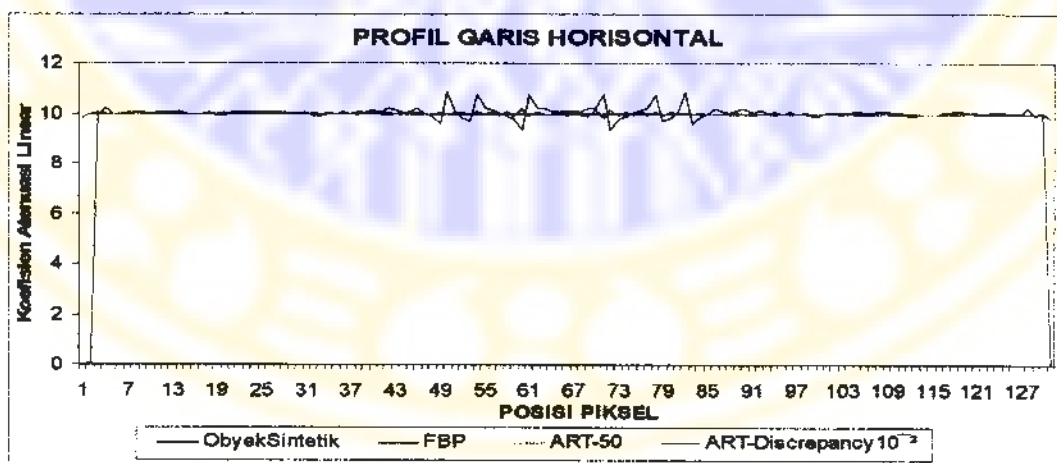
Gambar 4.6.c. Perbandingan profil garis horizontal antara citra hasil rekonstruksi dari sinogram dengan metode FBP dan ART terhadap obyek Plus referensi dengan resolusi 59 x 59



Gambar 4.6.d. Perbandingan profil garis horizontal antara citra hasil rekonstruksi dari sinogram dengan metode FBP dan ART terhadap obyek Plus referensi dengan resolusi 83 x 83



Gambar 4.6.e. Perbandingan profil garis horizontal antara citra hasil rekonstruksi dari sinogram dengan metode FBP dan ART terhadap obyek Plus referensi dengan resolusi 107 x 107



Gambar 4.6.f. Perbandingan profil garis horizontal antara citra hasil rekonstruksi dari sinogram dengan metode FBP dan ART terhadap obyek Plus referensi dengan resolusi 131 x 131

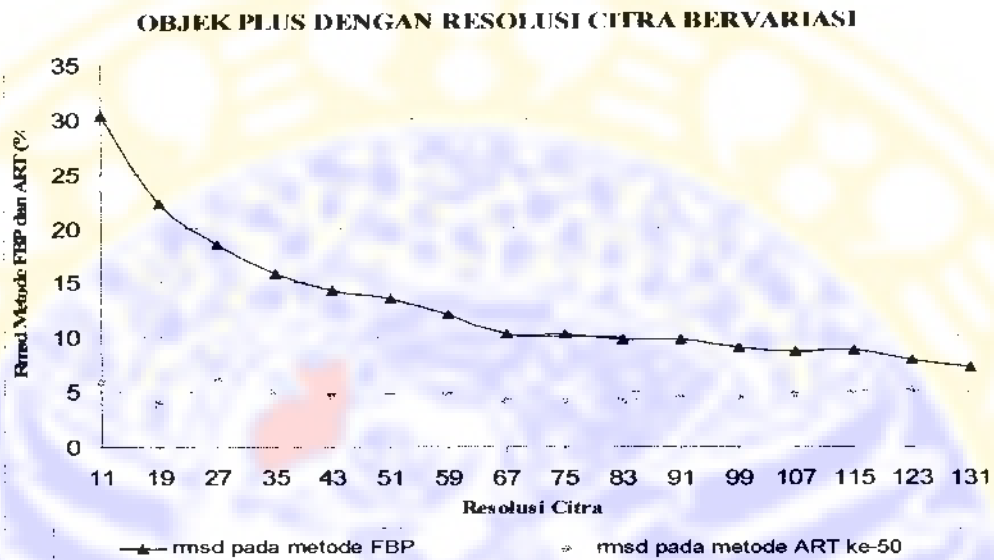
Pembedaan secara numerik dilakukan dengan melihat nilai $rmsd$ dan e_{max} antara citra-citra hasil rekonstruksi pada masing-masing metode rekonstruksi terhadap objek referensi yang mempunyai resolusi bersesuaian.

Hasil pembedaan secara numerik antara citra-citra hasil rekonstruksi dengan metode FBP dan metode ART dengan iterasi sebanyak 50 kali terhadap objek referensi untuk objek Plus yang mempunyai resolusi bersesuaian diperlihatkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1. Pembedaan secara numerik antara citra hasil rekonstruksi metode FBP dan metode ART yang ke-50 dengan objek referensi yang mempunyai resolusi bersesuaian untuk objek Plus.

No	Objek Plus dengan Resolusi Citra N	Citra hasil rekonstruksi dengan metode FBP		Citra hasil rekonstruksi dengan metode ART ke-50	
		$rmsd$ (%)	e_{max} (%)	$rmsd$ (%)	e_{max} (%)
1	11	30,335	95	5,849	22,7
2	19	22,233	95	3,872	22,2
3	27	18,531	95	6,177	70
4	35	15,793	95	4,91	55
5	43	14,219	95	4,666	70
6	51	13,451	98	4,777	71,1
7	59	12,158	98	4,837	73,7
8	67	10,336	97	4,234	65
9	75	10,33	98	4,282	70
10	83	9,736	98	4,283	68,9
11	91	9,817	98	4,526	72,6
12	99	9,067	95	4,543	80
13	107	8,612	97	4,785	84,5
14	115	8,72	97	4,953	90,5
15	123	7,866	98	5,21	97,1
16	131	7,264	98	4,793	97,1

Nilai *rmsd* untuk ukuran resolusi citra yang bervariasi pada tabel 4.1 dapat diplot grafik antara resolusi citra terhadap nilai *rmsd* yang diperlihatkan pada gambar 4.7.

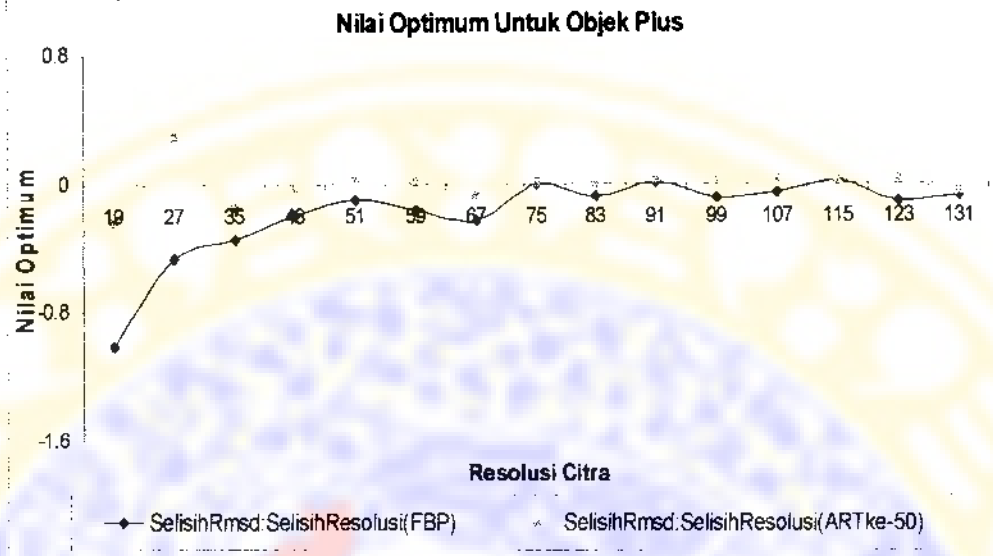


Gambar 4.7. Plot antara *rmsd* dengan resolusi citra yang bersesuaian pada metode rekonstruksi FBP dan ART yang ke-50 untuk objek Plus

Pada tabel 4.1 dan gambar 4.7 dapat dilihat bahwa citra-citra hasil rekonstruksi metode FBP memiliki nilai *rmsd* lebih besar dibandingkan dengan nilai *rmsd* untuk citra-citra hasil rekonstruksi dengan metode ART.

Pada gambar 4.7 dapat dilihat juga bahwa dengan metode rekonstruksi FBP nilai *rmsd* objek Plus cenderung menurun seiring dengan bertambahnya ukuran resolusi citra, sedangkan untuk metode ART dengan iterasi sebanyak 50 kali nilai *rmsd* cenderung konstan dan kecil meskipun ukuran resolusi citra bertambah.

Ukuran resolusi citra yang optimum didapatkan dengan cara mengurangi nilai *rmsd* citra antar ukuran resolusi yang berdekatan kemudian dibagi dengan ukuran resolusi citra yang berdekatan, yang dinyatakan dalam persamaan 3.3. Hasil perhitungan dengan persamaan 3.3 dapat ditampilkan pada gambar 4.8.



Gambar 4.8. Plot antara nilai yang optimum dengan resolusi citra yang bervariasi pada metode rekonstruksi FBP dan ART yang ke-50 untuk objek Plus

Pada gambar 4.8 dapat dilihat bahwa pada metode rekonstruksi FBP untuk objek Plus ukuran resolusi citra mulai terlihat optimum atau mencapai sumbu $x \approx 0$ pada ukuran resolusi citra 75×75 , sehingga ukuran resolusi citra tersebut diambil sebagai ukuran resolusi citra yang optimum. Ukuran resolusi citra diatas 75×75 terlihat semakin optimum, dengan demikian ukuran resolusi citra diatas 75×75 juga dianggap optimum.

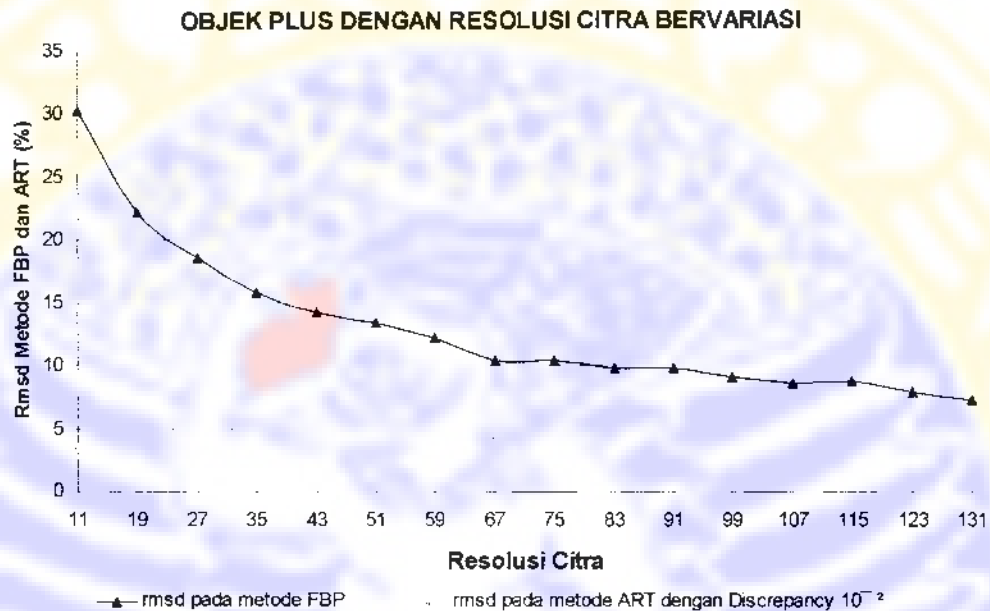
Pada gambar 4.8 dapat dilihat juga bahwa pada metode rekonstruksi ART dengan iterasi sebanyak 50 untuk objek Plus ukuran resolusi citra mulai terlihat optimum atau mencapai sumbu $x \approx 0$ pada ukuran resolusi citra 43×43 , sehingga ukuran ini diambil sebagai ukuran resolusi citra yang optimum. Ukuran resolusi citra diatas 43×43 terlihat semakin optimum, dengan demikian ukuran resolusi citra diatas 43×43 juga dianggap optimum.

Hasil perbedaan secara numerik antara citra-citra hasil rekonstruksi dengan metode FBP dan metode ART dengan Discrepancy 10^{-2} terhadap objek referensi untuk objek Plus yang mempunyai resolusi bersesuaian dapat diperlihatkan pada tabel 4.2.

Tabel 4.2. Perbedaan secara numerik antara citra hasil rekonstruksi metode FBP dan metode ART pada Discrepancy 10^{-2} dengan objek referensi yang mempunyai resolusi bersesuaian untuk objek Plus.

No	Objek Plus dengan Resolusi Citra N	Citra hasil rekonstruksi dengan metode FBP		Citra hasil rekonstruksi dengan metode ART pada Discrepancy 10^{-2}	
		rmsd (%)	e_{\max} (%)	rmsd (%)	e_{\max} (%)
1	11	30,335	95	3,488	12,7
2	19	22,233	95	3,734	22,7
3	27	18,531	95	5,823	70
4	35	15,793	95	4,317	55
5	43	14,219	95	4,54	70
6	51	13,451	98	4,257	54,7
7	59	12,158	98	4,613	65
8	67	10,336	97	4,236	65
9	75	10,33	98	4,289	70
10	83	9,736	98	4,29	68,9
11	91	9,817	98	4,395	72,6
12	99	9,067	95	4,548	80
13	107	8,612	97	4,802	84,5
14	115	8,72	97	4,972	90,5
15	123	7,866	98	5,226	97,1
16	131	7,264	98	4,805	97,1

Nilai *rmsd* untuk ukuran resolusi citra yang bervariasi pada tabel 4.2 dapat diplot grafik antara resolusi citra terhadap nilai *rmsd* yang diperlihatkan pada gambar 4.9.

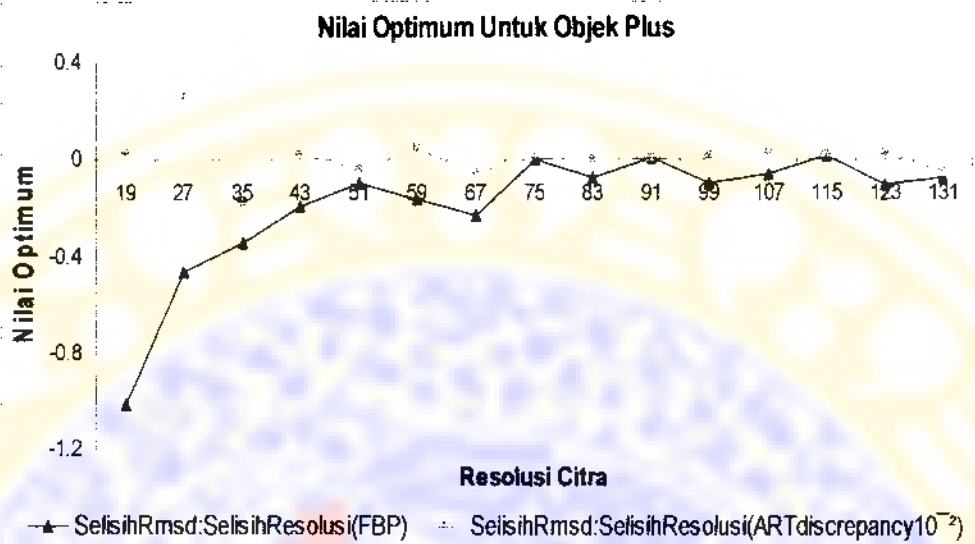


Gambar 4.9. Plot antara *rmsd* dengan resolusi citra yang bersesuaian pada metode rekonstruksi FBP dan ART dengan discrepancy 10^{-2} untuk objek Plus

Pada tabel 4.2 dan gambar 4.9 dapat dilihat bahwa citra-citra hasil rekonstruksi metode FBP memiliki nilai *rmsd* lebih besar dibandingkan dengan nilai *rmsd* untuk citra-citra hasil rekonstruksi dengan metode ART.

Pada gambar 4.9 dapat dilihat juga dengan metode rekonstruksi FBP nilai *rmsd* objek Plus cenderung menurun seiring dengan bertambahnya ukuran resolusi citra, sedangkan untuk metode ART dengan Discrepancy 10^{-2} nilai *rmsd* cenderung konstan dan kecil meskipun ukuran resolusi citra bertambah.

Hasil perhitungan untuk mendapatkan ukuran resolusi citra yang optimum dengan menggunakan persamaan 3.3 dapat ditampilkan pada gambar 4.10.



Gambar 4.10. Plot antara nilai yang optimum dengan resolusi citra yang bervariasi pada metode rekonstruksi FBP dan ART dengan discrepancy 10^{-2} untuk objek Plus

Pada gambar 4.10 dapat dilihat bahwa pada metode rekonstruksi FBP untuk objek Plus ukuran resolusi citra mulai terlihat optimum atau mencapai sumbu $x \approx 0$ pada ukuran resolusi citra 75×75 , sehingga ukuran resolusi citra tersebut diambil sebagai ukuran resolusi citra yang optimum. Ukuran resolusi citra diatas 75×75 terlihat semakin optimum, dengan demikian ukuran resolusi citra diatas 75×75 juga dianggap optimum.

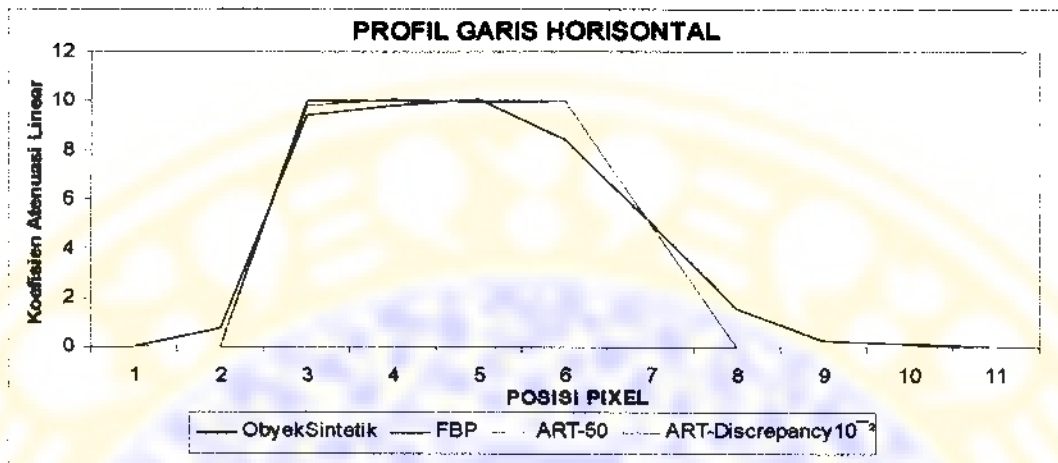
Pada gambar 4.10 dapat dilihat juga bahwa pada metode rekonstruksi ART dengan Discrepancy 10^{-2} untuk objek Plus ukuran resolusi citra mulai terlihat optimum atau mencapai sumbu $x \approx 0$ pada ukuran resolusi citra 43×43 . sehingga ukuran ini diambil sebagai ukuran resolusi citra yang optimum. Ukuran resolusi citra diatas 43×43 terlihat semakin optimum, dengan demikian ukuran resolusi citra diatas 43×43 juga dianggap optimum.

4.4.2 Objek Segitiga

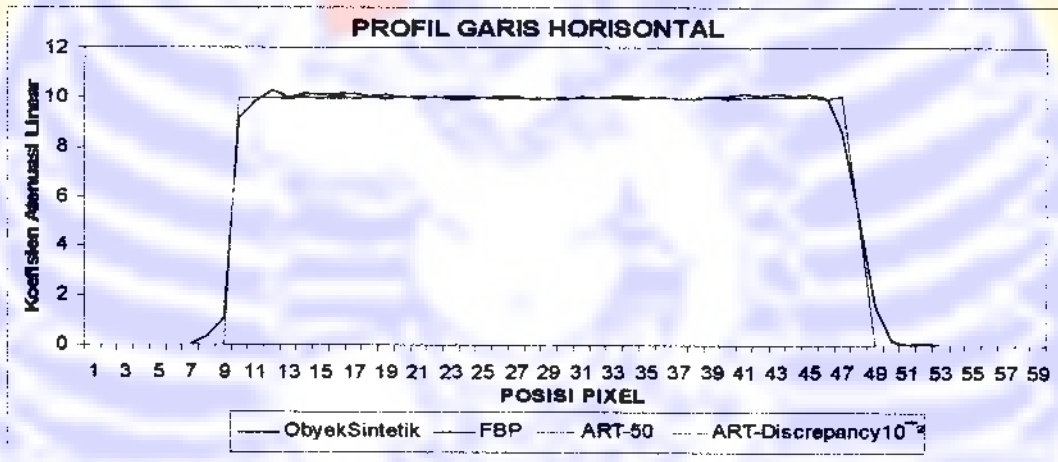
Sebagai pembanding hasil-hasil yang diperoleh pada objek Plus maka dilakukan juga penelitian untuk objek berbentuk Segi Tiga. Kualitas citra yang dihasilkan dianalisis dengan cara membedakan antara citra-citra yang dihasilkan dari proses rekonstruksi metode FBP dan ART terhadap objek Segi Tiga referensi yang mempunyai resolusi bersesuaian. Pembedaan dilakukan secara visual dan numerik

Pembedaan secara visual dilakukan dengan melihat secara langsung citra-citra hasil rekonstruksi (gambar 4.3.b; 4.4.b dan 4.5.b) dan profil garis horisontal (gambar 4.11). Dari hasil pembedaan secara visual menunjukkan bahwa citra-citra hasil rekonstruksi dengan metode ART paling mendekati objek Segi Tiga referensi yang mempunyai resolusi bersesuaian.

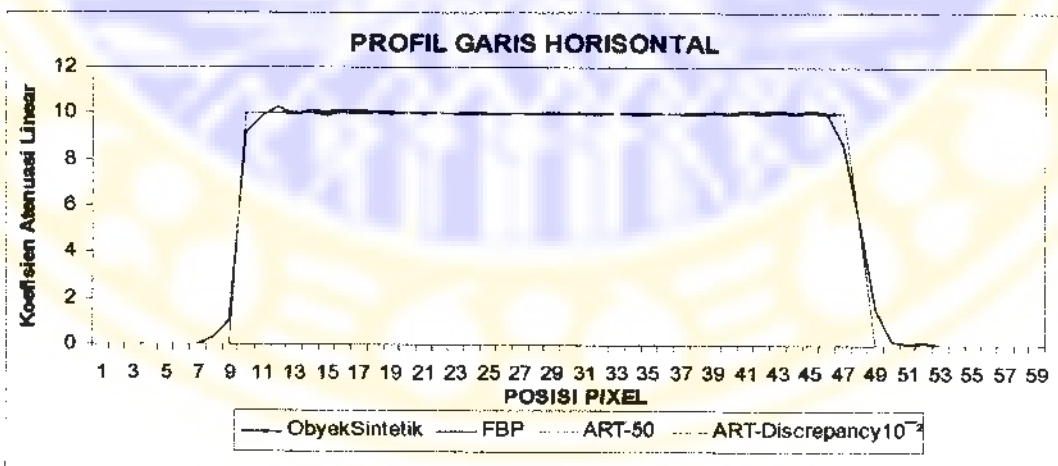
Profil garis horisontal untuk objek Segi Tiga diperlihatkan pada gambar 4.11.a sampai 4.11.f. Hasil pembedaan secara visual dengan melihat profil garis horisontal pada gambar 4.11.a sampai 4.11.f terlihat bahwa profil garis horisontal citra-citra hasil rekonstruksi dengan metode ART lebih berhimpit dengan profil garis horisontal objek referensi yang mempunyai resolusi bersesuaian, dibandingkan dengan profil garis horisontal citra-citra hasil rekonstruksi dengan metode FBP.



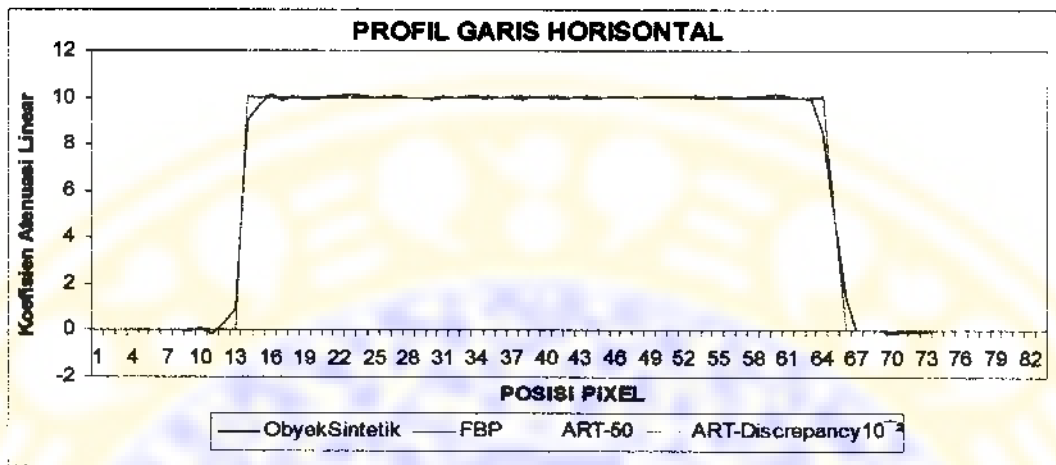
Gambar 4.11.a. Perbandingan profil garis horisontal antara citra hasil rekonstruksi dari sinogram dengan metode FBP dan ART terhadap obyek Segi Tiga referensi dengan resolusi 11×11



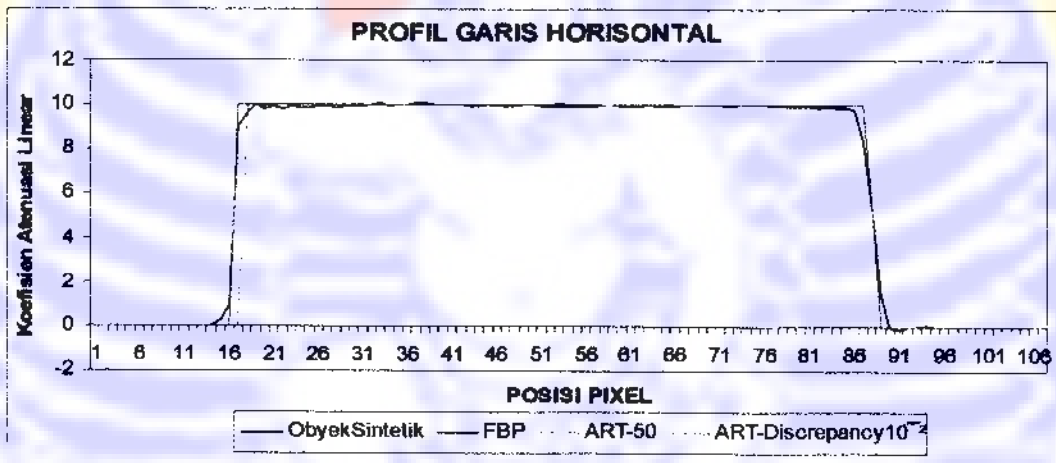
Gambar 4.11.b. Perbandingan profil garis horisontal antara citra hasil rekonstruksi dari sinogram dengan metode FBP dan ART terhadap obyek Segi Tiga referensi dengan resolusi 35×35



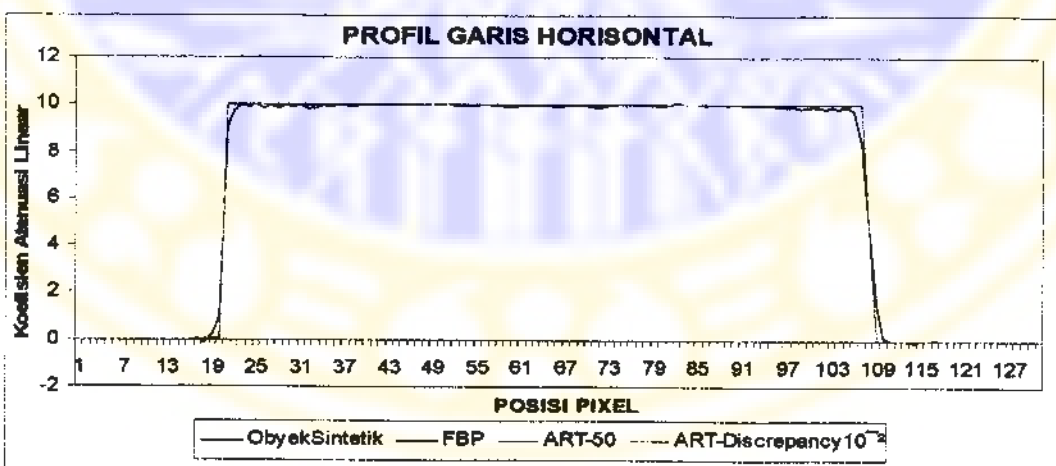
Gambar 4.11.c. Perbandingan profil garis horisontal antara citra hasil rekonstruksi dari sinogram dengan metode FBP dan ART terhadap obyek Segi Tiga referensi dengan resolusi 59×59



Gambar 4.11.d. Perbandingan profil garis horisontal antara citra hasil rekonstruksi dari sinogram dengan metode FBP dan ART terhadap obyek Segi Tiga referensi dengan resolusi 83 x 83



Gambar 4.11.e. Perbandingan profil garis horisontal antara citra hasil rekonstruksi dari sinogram dengan metode FBP dan ART terhadap obyek Segi Tiga referensi dengan resolusi 107 x 107



Gambar 4.11.f. Perbandingan profil garis horisontal antara citra hasil rekonstruksi dari sinogram dengan metode FBP dan ART terhadap obyek Segi Tiga referensi dengan resolusi 131 x 131

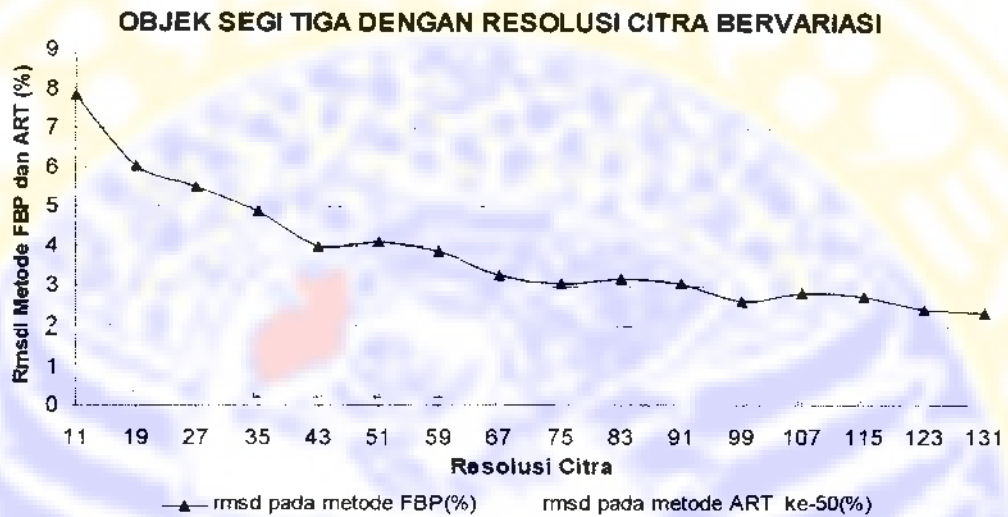
Pembedaan secara numerik dilakukan dengan melihat nilai $rmsd$ dan e_{max} antara citra-citra hasil rekonstruksi pada masing-masing metode rekonstruksi terhadap objek referensi yang mempunyai resolusi bersesuaian.

Hasil pembedaan secara numerik antara citra-citra hasil rekonstruksi dengan metode FBP dan metode ART dengan iterasi sebanyak 50 kali terhadap objek referensi untuk objek Segi Tiga yang mempunyai resolusi bersesuaian dapat diperlihatkan pada tabel 4.3.

Tabel 4.3. Pembedaan secara numerik antara citra hasil rekonstruksi metode FBP dan metode ART yang ke-50 dengan objek referensi yang mempunyai resolusi bersesuaian untuk objek Segi Tiga.

No	Objek Segi Tiga dengan Resolusi Citra N	Citra hasil rekonstruksi dengan metode FBP		Citra hasil rekonstruksi dengan metode ART ke-50	
		$rmsd$ (%)	e_{max} (%)	$rmsd$ (%)	e_{max} (%)
1	11	7,799	24,13	0,917	4,5
2	19	6,033	24,65	0,356	1,7
3	27	5,503	30,67	0,382	4,7
4	35	4,895	30,6	0,241	1,4
5	43	4,009	24,1	0,29	2,4
6	51	4,117	29,21	0,259	2,9
7	59	3,851	29,7	0,263	8,6
8	67	3,293	25,6	0,0998	1,8
9	75	3,11	25,38	0,0623	1,3
10	83	3,226	30,41	0,055	0,9
11	91	3,088	30,54	0,0364	0,8
12	99	2,658	24,52	0,0489	2,2
13	107	2,851	29,66	0,0684	6,1
14	115	2,757	29,98	0,0461	4,5
15	123	2,439	25,26	0,0611	5,9
16	131	2,355	24,38	0,0149	0,5

Nilai *rmsd* untuk ukuran resolusi citra yang bervariasi pada tabel 4.3 dapat diplot grafik antara resolusi citra terhadap nilai *rmsd* yang diperlihatkan pada gambar 4.12.

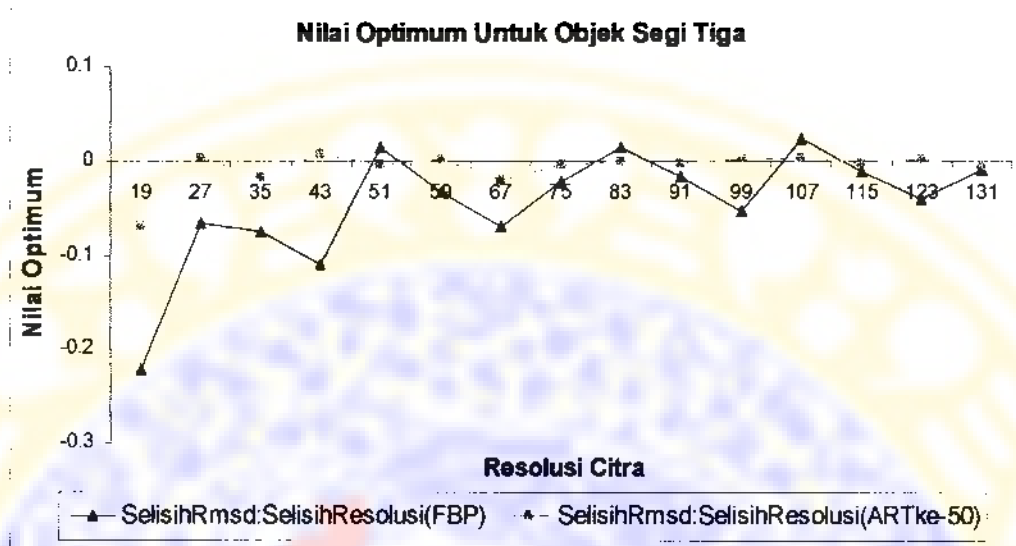


Gambar 4.12. Plot antara *rmsd* dengan resolusi citra yang bersesuaian pada metode rekonstruksi FBP dan ART yang ke-50 untuk objek Segi Tiga

Pada tabel 4.3 dan gambar 4.12 dapat dilihat bahwa citra-citra hasil rekonstruksi metode FBP memiliki nilai *rmsd* lebih besar dibandingkan dengan nilai *rmsd* untuk citra-citra hasil rekonstruksi dengan metode ART.

Pada Gambar 4.12 dapat dilihat juga bahwa dengan metode rekonstruksi FBP nilai *rmsd* objek Segi Tiga cenderung menurun seiring dengan bertambahnya ukuran resolusi citra, sedangkan untuk metode ART dengan iterasi sebanyak 50 kali nilai *rmsd* cenderung konstan dan kecil meskipun ukuran resolusi citra bertambah.

Ukuran resolusi citra yang optimum didapatkan dengan cara mengurangi nilai *rmsd* citra antar ukuran resolusi yang berdekatan kemudian dibagi dengan ukuran resolusi citra yang berdekatan, yang dinyatakan dalam persamaan 3.3. Hasil perhitungan dengan persamaan 3.3 dapat ditampilkan pada gambar 4.13.



Gambar 4.13. Plot antara nilai yang optimum dengan resolusi citra yang bervariasi pada metode rekonstruksi FBP dan ART yang ke-50 untuk objek Segi Tiga

Pada gambar 4.13 dapat dilihat bahwa pada metode rekonstruksi FBP untuk objek Segi Tiga ukuran resolusi citra mulai terlihat optimum atau mencapai sumbu $x \approx 0$ pada ukuran resolusi citra 51 x 51, sehingga ukuran resolusi citra tersebut diambil sebagai ukuran resolusi citra yang optimum. Ukuran resolusi citra diatas 51 x 51 terlihat semakin optimum, dengan demikian ukuran resolusi citra diatas 51 x 51 juga dianggap optimum.

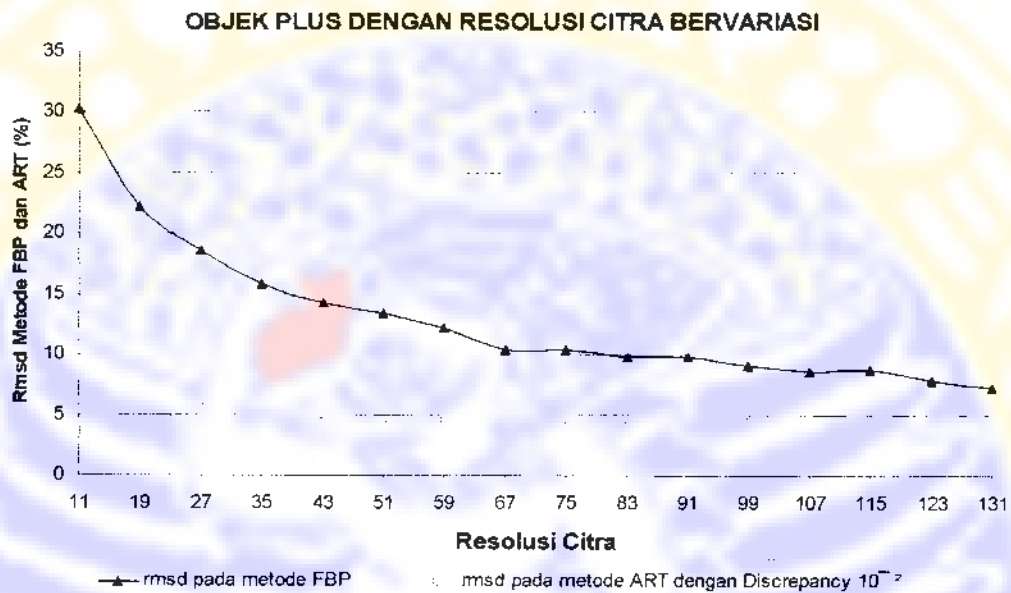
Pada gambar 4.13 dapat dilihat juga bahwa pada metode rekonstruksi ART dengan iterasi sebanyak 50 untuk objek Segi Tiga ukuran resolusi citra mulai terlihat optimum atau mencapai sumbu $x \approx 0$ pada ukuran resolusi citra 27 x 27, sehingga ukuran resolusi citra tersebut diambil sebagai ukuran resolusi citra yang optimum. Ukuran resolusi citra diatas 27 x 27 terlihat semakin optimum, dengan demikian ukuran resolusi citra diatas 27 x 27 juga dianggap optimum.

Hasil perbedaan secara numerik antara citra-citra hasil rekonstruksi dengan metode FBP dan metode ART dengan Discrepancy 10^{-2} terhadap objek referensi untuk objek Segi Tiga yang mempunyai resolusi bersesuaian dapat diperlihatkan pada tabel 4.4.

Tabel 4.4. Perbedaan secara numerik antara citra hasil rekonstruksi metode FBP dan metode ART pada Discrepancy 10^{-2} dengan objek referensi yang mempunyai resolusi bersesuaian untuk objek Segi Tiga.

No	Objek Segi Tiga dengan Resolusi Citra N	Citra hasil rekonstruksi dengan metode FBP		Citra hasil rekonstruksi dengan metode ART pada Discrepancy 10^{-2}	
		rmsd (%)	e_{\max} (%)	rmsd (%)	e_{\max} (%)
1	11	7,799	24,13	0,88	4,3
2	19	6,033	24,65	0,483	2,2
3	27	5,503	30,67	0,487	5,1
4	35	4,895	30,6	0,397	2,3
5	43	4,009	24,1	0,445	3,5
6	51	4,117	29,21	0,405	4,1
7	59	3,851	29,7	0,423	8,9
8	67	3,293	25,6	0,349	5,3
9	75	3,11	25,38	0,303	4,7
10	83	3,226	30,41	0,311	4,7
11	91	3,088	30,54	0,277	5
12	99	2,658	24,52	0,262	5,1
13	107	2,851	29,66	0,262	6,6
14	115	2,757	29,98	0,274	5,4
15	123	2,439	25,26	0,329	6,9
16	131	2,355	24,38	0,262	5,8

Nilai *rmsd* untuk ukuran resolusi citra yang bervariasi pada tabel 4.4 dapat diplot grafik antara resolusi citra terhadap nilai *rmsd* yang diperlihatkan pada gambar 4.14.

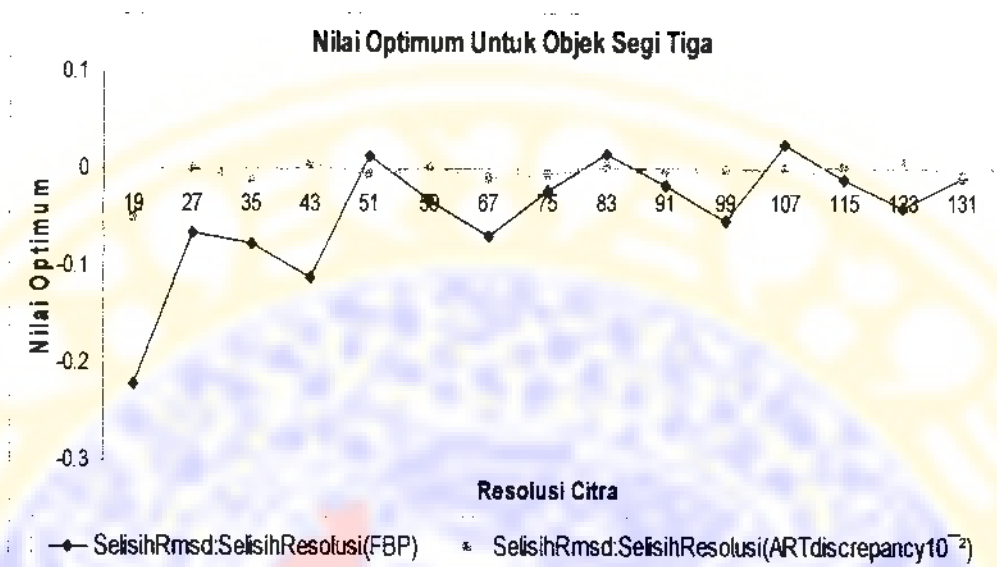


Gambar 4.14. Plot antara *rmsd* dengan resolusi citra yang bersesuaian pada metode rekonstruksi FBP dan ART dengan discrepancy 10^{-2} untuk objek Segi Tiga

Pada tabel 4.4 dan gambar 4.14 dapat dilihat bahwa citra-citra hasil rekonstruksi metode FBP memiliki nilai *rmsd* lebih besar dibandingkan dengan nilai *rmsd* untuk citra-citra hasil rekonstruksi dengan metode ART.

Gambar 4.14 tampak bahwa dengan metode rekonstruksi FBP nilai *rmsd* objek Segi Tiga cenderung menurun seiring dengan bertambahnya ukuran resolusi citra. Untuk metode ART dengan Discrepancy 10^{-2} nilai *rmsd* cenderung konstan dan kecil meskipun ukuran resolusi citra bertambah.

Hasil perhitungan untuk mendapatkan ukuran resolusi citra yang optimum dengan menggunakan persamaan 3.3 dapat ditampilkan pada gambar 4.15.



Gambar 4.15. Plot antara nilai yang optimum dengan resolusi citra yang bervariasi pada metode rekonstruksi FBP dan ART dengan discrepancy 10^{-2} untuk objek Segi Tiga

Pada gambar 4.15 dapat dilihat bahwa pada metode rekonstruksi FBP untuk objek Segi Tiga ukuran resolusi citra mulai terlihat optimum atau mencapai sumbu $x \approx 0$ pada ukuran resolusi citra 51×51 , sehingga ukuran resolusi citra tersebut diambil sebagai ukuran resolusi citra yang optimum. Ukuran resolusi citra diatas 51×51 terlihat semakin optimum, dengan demikian ukuran resolusi citra diatas 51×51 juga dianggap optimum.

Pada gambar 4.15 dapat dilihat juga bahwa pada metode rekonstruksi ART dengan Discrepancy 10^{-2} untuk objek Segi Tiga ukuran resolusi citra mulai terlihat optimum atau mencapai sumbu $x \approx 0$ pada ukuran resolusi citra 27×27 , sehingga ukuran resolusi citra tersebut diambil sebagai ukuran resolusi citra yang optimum. Ukuran resolusi citra diatas 27×27 terlihat semakin optimum, dengan demikian ukuran resolusi citra diatas 27×27 juga dianggap optimum.

4.5. Pembahasan

Hasil perbedaan kualitas citra hasil rekonstruksi dengan metode FBP dan metode ART dibandingkan terhadap objek referensi yang mempunyai resolusi bersesuaian untuk objek Plus dan Segi Tiga menunjukkan bahwa, metode ART mempunyai kualitas citra lebih mendekati objek referensi dibandingkan kualitas citra hasil rekonstruksi dengan metode FBP meskipun resolusi citra yang digunakan sedikit. Hal ini ditunjukkan dengan nilai *rmsd* citra-citra hasil rekonstruksi metode ART lebih kecil bila dibandingkan dengan nilai *rmsd* citra-citra hasil rekonstruksi metode FBP. Hal ini juga didukung oleh profil garis horisontal citra hasil rekonstruksi metode rekonstruksi ART lebih berhimpit dengan profil garis horisontal objek referensi yang mempunyai resolusi bersesuaian (gambar 4.6 dan 4.11).

Dari hasil perbedaan kualitas citra hasil rekonstruksi dengan metode rekonstruksi FBP untuk ukuran resolusi citra yang bervariasi, diperoleh nilai-nilai *rmsd* yang cenderung menurun seiring dengan penambahan resolusi citra. Hal ini menunjukkan bahwa pada metode rekonstruksi FBP besar resolusi citra mempengaruhi kualitas citra yang dihasilkan. Sedangkan dari hasil perbedaan kualitas citra hasil rekonstruksi dengan metode rekonstruksi ART untuk ukuran resolusi citra yang bervariasi, diperoleh nilai-nilai *rmsd* yang cenderung konstan jika resolusi citra bertambah besar. Hal ini menunjukkan bahwa pada metode rekonstruksi ART besar resolusi citra tidak mempengaruhi kualitas citra yang dihasilkan.

Ukuran resolusi citra optimum metode rekonstruksi FBP untuk objek Plus terletak pada ukuran resolusi citra 75 x 75, sedangkan untuk objek Segi Tiga pada

ukuran resolusi citra 51 x 51. Ukuran resolusi citra optimum metode rekonstruksi ART untuk objek Plus terletak pada ukuran resolusi citra 43 x 43, sedangkan untuk objek Segi Tiga pada ukuran resolusi citra 27 x 27. Dari hasil perhitungan untuk mendapatkan ukuran resolusi citra optimum menunjukkan bahwa ukuran resolusi citra optimum objek Plus lebih besar dibandingkan dengan ukuran resolusi citra optimum objek Segi Tiga untuk metode rekonstruksi FBP dan ART, sehingga pada penelitian ini digunakan ukuran resolusi citra optimum pada objek Plus karena objek Plus mempunyai koefisien atenuasi linear μ yang lebih heterogen dibandingkan dengan koefisien atenuasi linear μ pada objek Segi Tiga.

Pada gambar 4.7 sampai 4.15 menunjukkan bahwa pada metode rekonstruksi ART dengan cara membatasi jumlah iterasi sampai iterasi ke-50 maupun dengan cara membatasi nilai discrepancy sampai discrepancy 10^{-2} secara numerik mempunyai nilai *rmsd* yang hampir sama dan ukuran resolusi citra optimum yang sama.

ukuran resolusi citra 51 x 51. Ukuran resolusi citra optimum metode rekonstruksi ART untuk objek Plus terletak pada ukuran resolusi citra 43 x 43, sedangkan untuk objek Segi Tiga pada ukuran resolusi citra 27 x 27. Dari hasil perhitungan untuk mendapatkan ukuran resolusi citra optimum menunjukkan bahwa ukuran resolusi citra optimum objek Plus lebih besar dibandingkan dengan ukuran resolusi citra optimum objek Segi Tiga untuk metode rekonstruksi FBP dan ART, sehingga pada penelitian ini digunakan ukuran resolusi citra optimum pada objek Plus karena objek Plus mempunyai koefisien atenuasi linear μ yang lebih heterogen dibandingkan dengan koefisien atenuasi linear μ pada objek Segi Tiga.

Pada gambar 4.7 sampai 4.15 menunjukkan bahwa pada metode rekonstruksi ART dengan cara membatasi jumlah iterasi sampai iterasi ke-50 maupun dengan cara membatasi nilai discrepancy sampai discrepancy 10^{-2} secara numerik mempunyai nilai *rmsd* yang hampir sama dan ukuran resolusi citra optimum yang sama.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pada hasil penelitian yang sudah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Kualitas citra hasil rekonstruksi dengan menggunakan metode rekonstruksi FBP dipengaruhi oleh besar resolusi citra. Semakin besar resolusi citra maka kualitas citra yang dihasilkan semakin mendekati kualitas citra objek referensi yang mempunyai resolusi bersesuaian.
2. Kualitas citra hasil rekonstruksi dengan menggunakan metode rekonstruksi ART tidak dipengaruhi oleh besar resolusi citra. Berapapun ukuran resolusi citra yang digunakan akan mempunyai nilai *rmsd* yang kecil sehingga kualitas citra yang dihasilkan paling mendekati kualitas citra objek referensi yang mempunyai resolusi bersesuaian.
3. Metode rekonstruksi ART lebih akurat dibanding dengan metode rekonstruksi FBP karena untuk resolusi citra berapapun akan mempunyai nilai *rmsd* dan e_{\max} yang kecil, hal ini ditunjukkan dari hasil perbedaan secara visual dan numerik.
4. Pada penelitian ini dengan menggunakan objek Plus dan Segi Tiga diperoleh ukuran resolusi citra optimum untuk metode rekonstruksi FBP adalah 75×75 , ukuran tersebut lebih besar dibandingkan dengan ukuran resolusi citra optimum metode rekonstruksi ART yang terletak pada ukuran resolusi citra 43×43 .

5.2. Saran

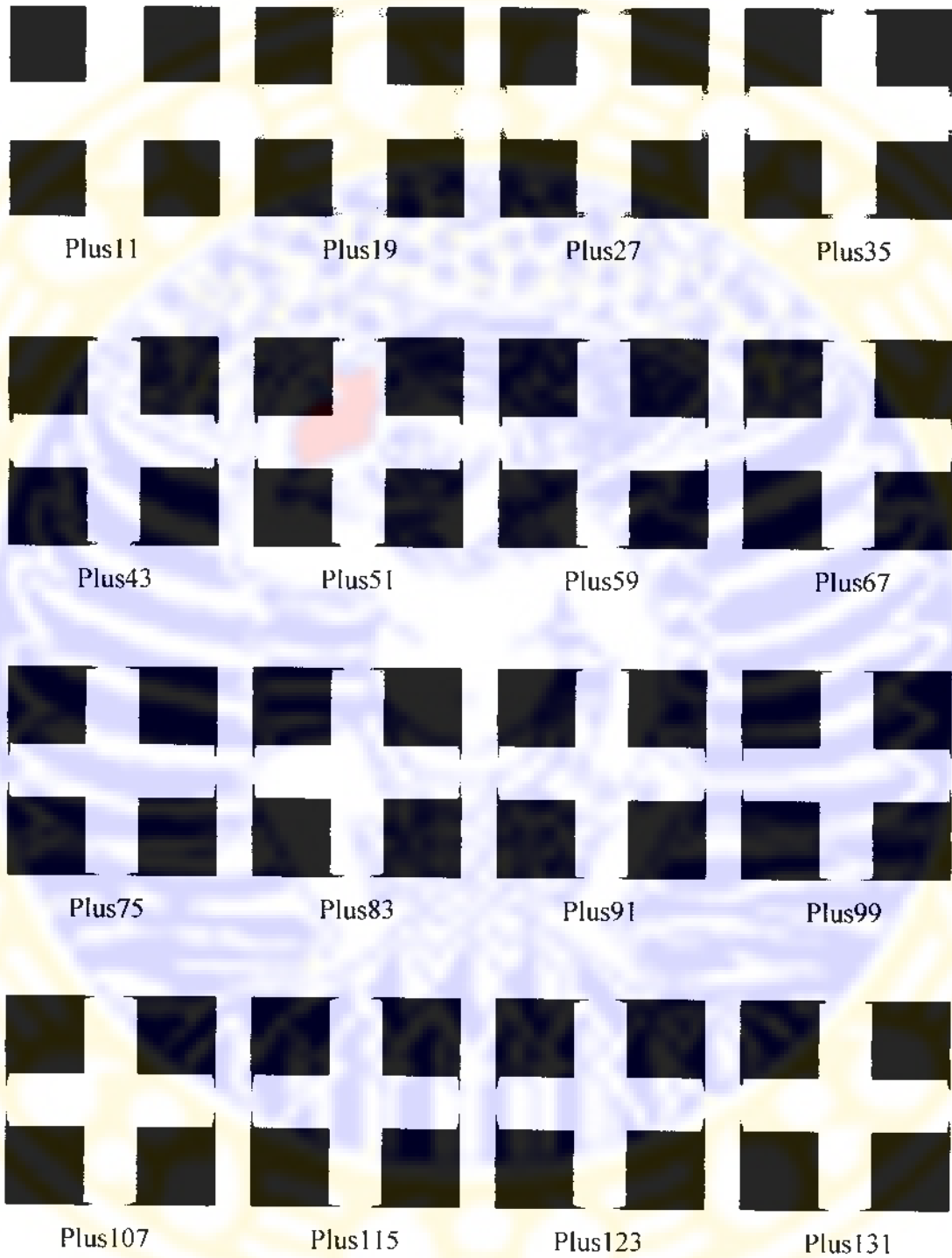
Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut secara eksperimen apakah resolusi citra juga berpengaruh terhadap kualitas citra yang dihasilkan dengan menggunakan perbedaan secara visual dan numerik pada metode rekonstruksi FBP dan ART dengan bentuk objek dan ukuran resolusi citra yang berbeda-beda.

DAFTAR PUSTAKA

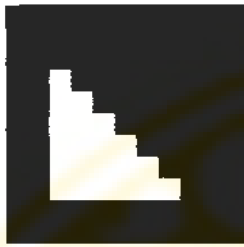
- Ain, K. dan Nuril, U., 2004, *Algebraic Iteration As Accurate Reconstruction Method In Computer Tomography system*, Prosiding SFN XX HFI, Yogyakarta.
- Huda, N., 2004, *Pemetaan Koefisien Absorpsi Suatu Bahan dengan Memanfaatkan Sistem Tomografi*, Skripsi S-1 Universitas Airlangga, Surabaya.
- Herman, G.T., 1980, *Image Reconstruction from Projection: The Fundamentals of Computed Tomography*, Academic Press, New York.
- Kouris, K., N.M. Spyrou and D.F. Jackson, 1982, *Imaging With Ionizing Radiations*, Surrey University Press, Guildford, UK.
- Mueller, K., 1998, *Fast and Accurate three-Dimensional Reconstruction From Cone-Beam Projection Data using Algebraic Methods*. PhD. Thesis, Ohio State University.
- Nugroho, W. dan Suparta G.B., 2002, *Perangkat Lunak Aplikasi Pembanding Citra Tomografi Komputer*, Berkala Ilmiah MIPA, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
- Sauer, K. and C. Boumann, 1993, *A Local Up Date Strategy For Iterative Reconstruction From Projections*, IEEE Trans. On Sig. Proc.41 (2).
- Suparta, G.B., 1999, *Focussing Computed Tomography Scanner*, Thesis Submitted for The Degree of Doctor of Philosophy, Department of Physics Monash University, Australia.
- Suparta, G.B. dan Kusminarto, 1989, *Teknik Rekonstruksi Citra Tomografi Secara Aljabar*, Prosiding SFN XII HFI, Yogyakarta, 4-5 Januari, 1989.
- Suparta, G.B., Kusminarto dan W. Nugroho 2000. *Tomografi Komputer untuk Laboratorium*. Prosiding Simposium Fisika Nasional XVIII. Himpunan Fisika Indonesia, Serpong 25-27 April 2000.
- Sutopo, L., 2004, *Pembuatan Simulator Sistem Tomografi Komputer Generasi Pertama dengan Intensitas Sumber Radiasi Datang Konstan dan Berfluktuasi*, Skripsi S-1 Universitas Airlangga, Surabaya.
- Wells, P., J. Davis and M. Morgan 1994. *Computed Tomography. Material Forum*. Vol. 18, pp. 111-113.
- Wells, P., Smith R. and GB. Suparta, 1997, *Sampling the Sinogram in Computed Tomography*, *Material Evaluation*, 55(7), 772-776.
- Widodo, C.S., 2000, *Metode Pengukuran Sensitivitas Perangkat Tomografi Komputer Transmisi*, Tesis S-2 Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.

Lampiran 1

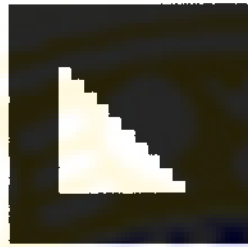
❖ Obyek Sintetik Plus Dengan Resolusi Citra Bervariasi



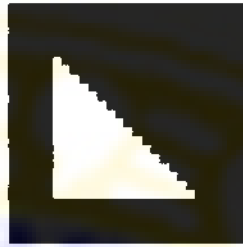
❖ Obyek Sintetik Segi Tiga Dengan Resolusi Citra bervariasi



Sg3-11



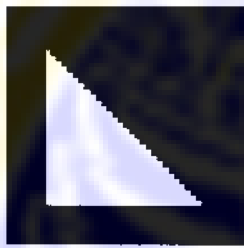
Sg3-19



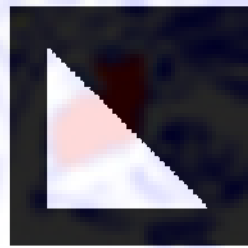
Sg3-27



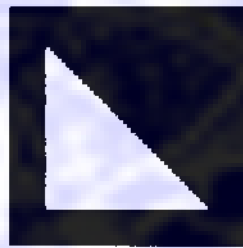
Sg3-35



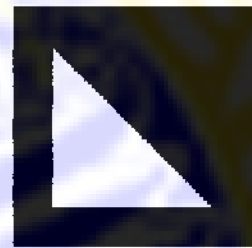
Sg3-43



Sg3-51



Sg3-59



Sg3-67



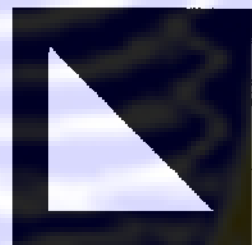
Sg3-75



Sg3-83



Sg3-91



Sg3-99



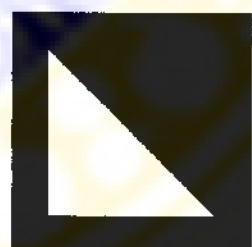
Sg3-75



Sg3-83



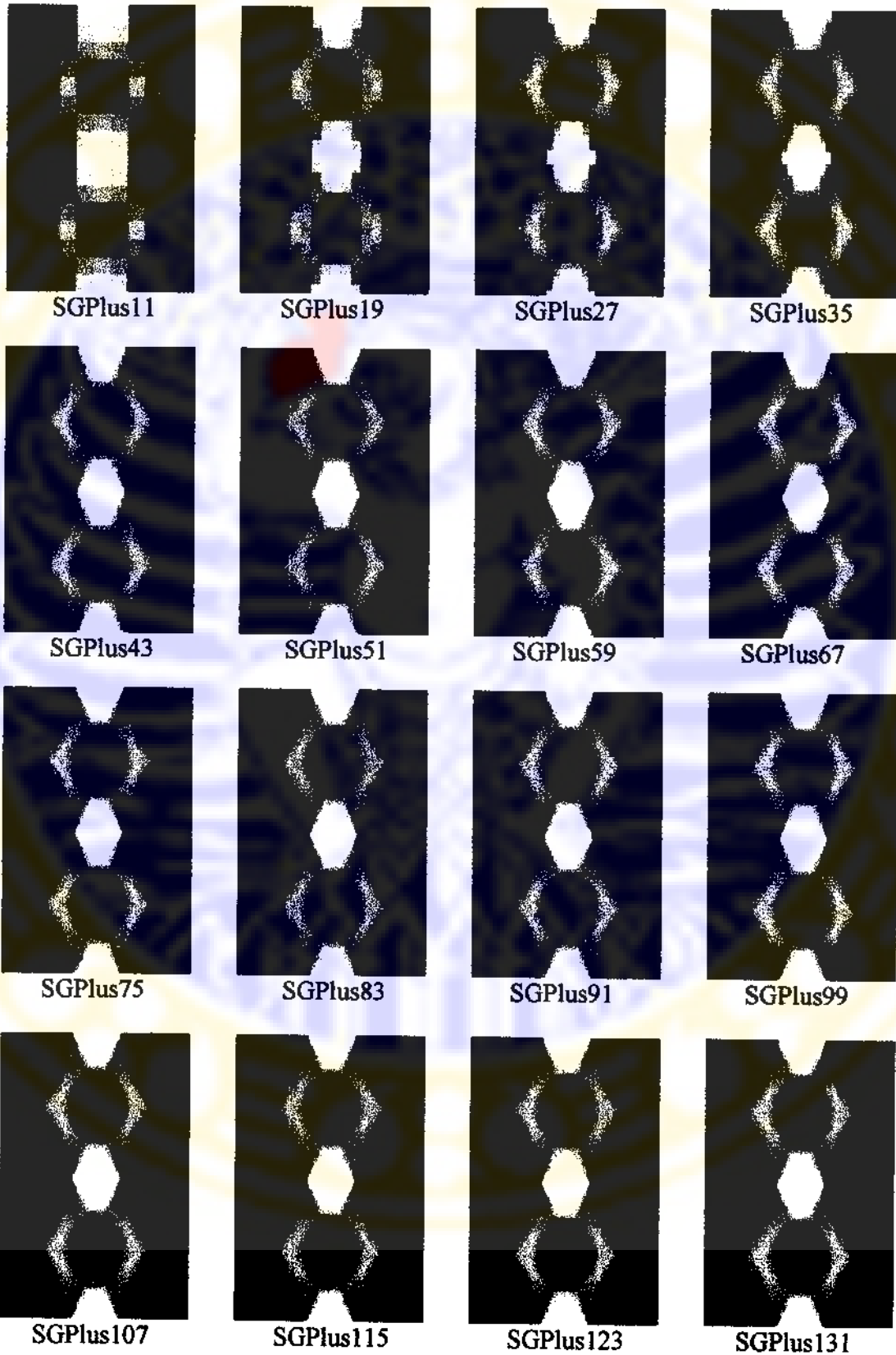
Sg3-91



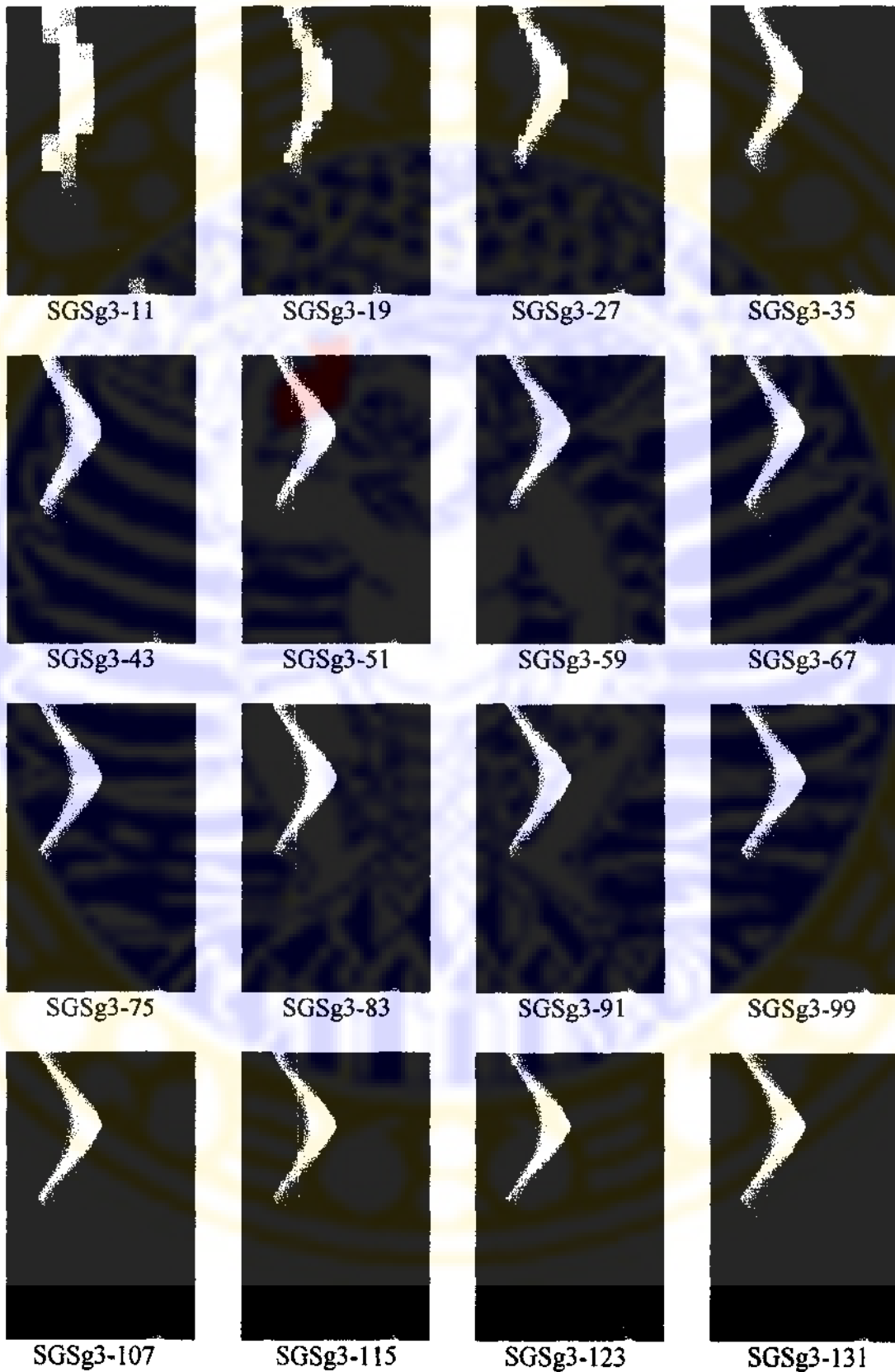
Sg3-99

Lampiran 2

❖ Sinogram Hasil Scanning Untuk Objek Plus Dengan Resolusi Citra bervariasi

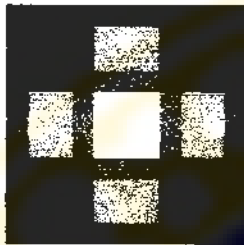


❖ Sinogram Hasil Scanning Objek Segi Tiga Dengan Resolusi Citra bervariasi

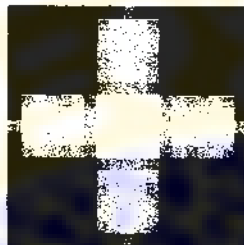


Lampiran 3

❖ Citra Plus Hasil Rekonstruksi Metode FBP Dari Sinogram Lampiran 2



PlusFBP11



PlusFBP19



PlusFBP27



PlusFBP35



PlusFBP43



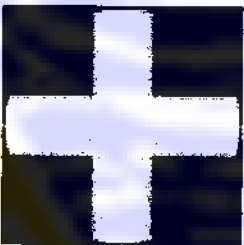
PlusFBP51



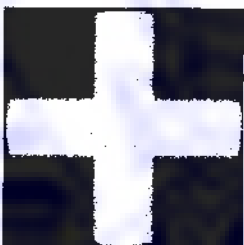
PlusFBP59



PlusFBP67



PlusFBP 75



PlusFBP83



PlusFBP91



PlusFBP99



PlusFBP107



PlusFBP115



PlusFBP123

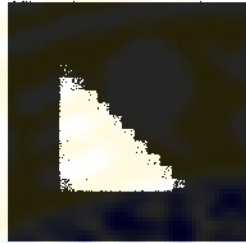


PlusFBP131

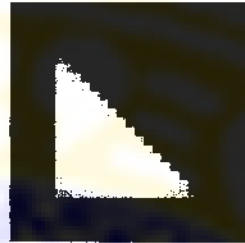
❖ Citra Segi Tiga Hasil Rekonstruksi Metode FBP Dari Sinogram Lampiran 2



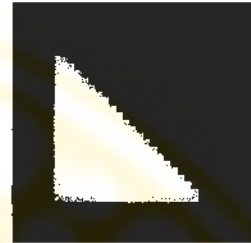
Sg3FBP11



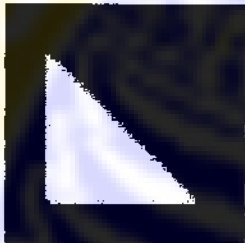
Sg3FBP19



Sg3FBP27



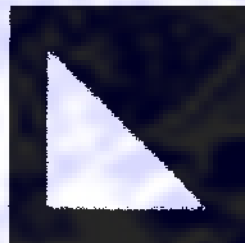
Sg3FBP35



Sg3FBP43



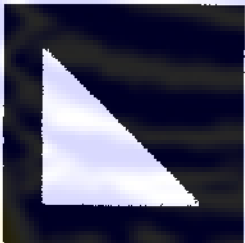
Sg3FBP51



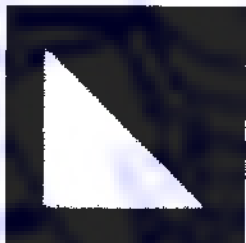
Sg3FBP59



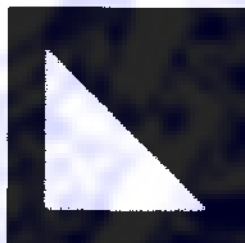
Sg3FBP67



Sg3FBP75



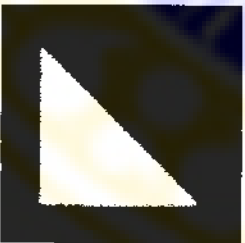
Sg3FBP83



Sg3FBP91



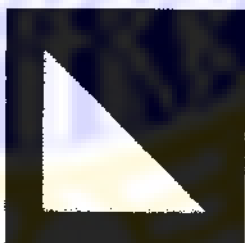
Sg3FBP99



Sg3FBP107



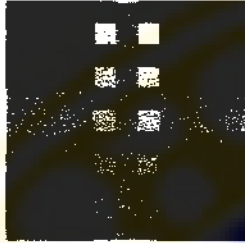
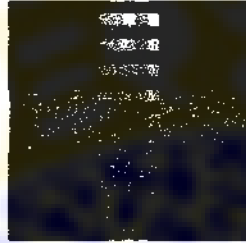
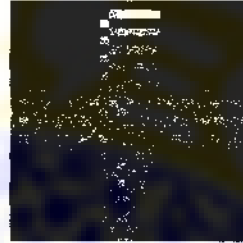
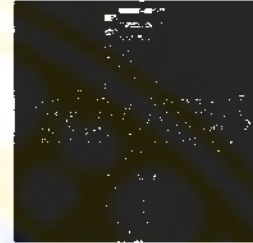
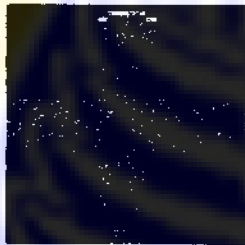
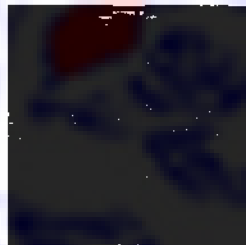
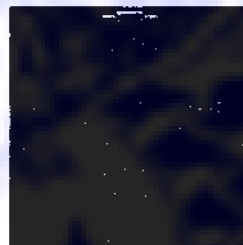
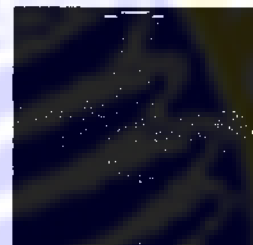
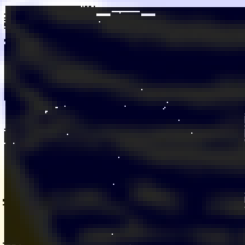
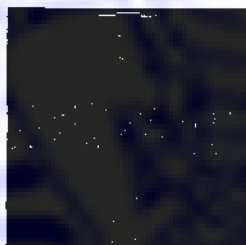
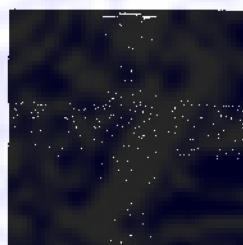
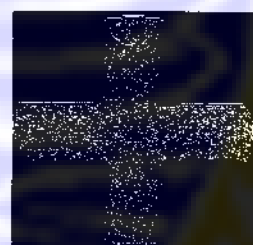
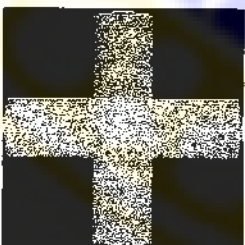
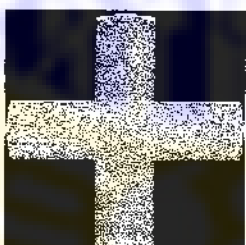
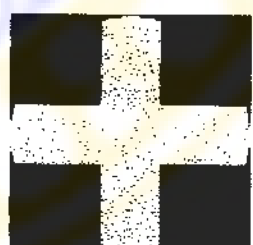
Sg3FBP115



Sg3FBP123



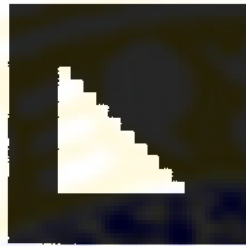
Sg3FBP131

Lampiran 4**❖ Citra Plus Hasil Rekonstruksi Metode ART ke-50 Dari Sinogram Lampiran 2****PLUSART11****PLUSART19****PLUSART27****PLUSART35****PLUSART43****PLUSART51****PLUSART59****PLUSART67****PLUSART75****PLUSART83****PLUSART591****PLUSART99****PLUSART107****PLUSART115****PLUSART123****PLUSART131**

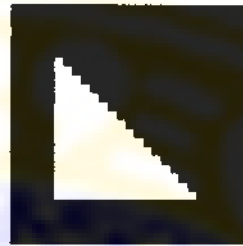
❖ Citra Segi Tiga Hasil Rekonstruksi Metode ART ke-50 Dari Sinogram Lampiran 2



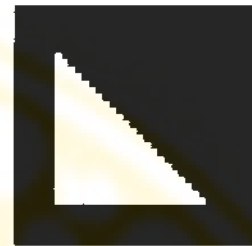
Sg3ART11



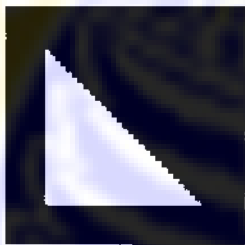
Sg3ART19



Sg3ART27



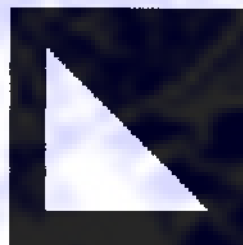
Sg3ART35



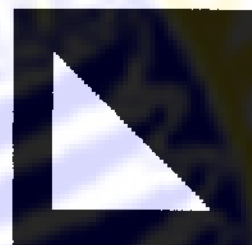
Sg3ART43



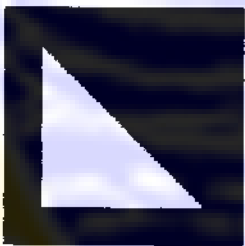
Sg3ART51



Sg3ART59



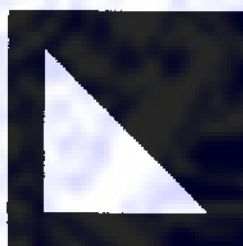
Sg3ART67



Sg3ART75



Sg3ART83



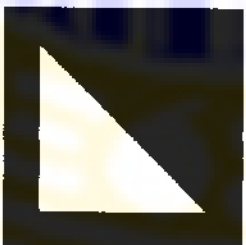
Sg3ART91



Sg3ART99



Sg3ART107



Sg3ART115



Sg3ART123



Sg3ART131

Lampiran 5

❖ Citra Plus Hasil Rekonstruksi Metode ART Discrepancy 10^2 Dari Sinogram

Lampiran 2

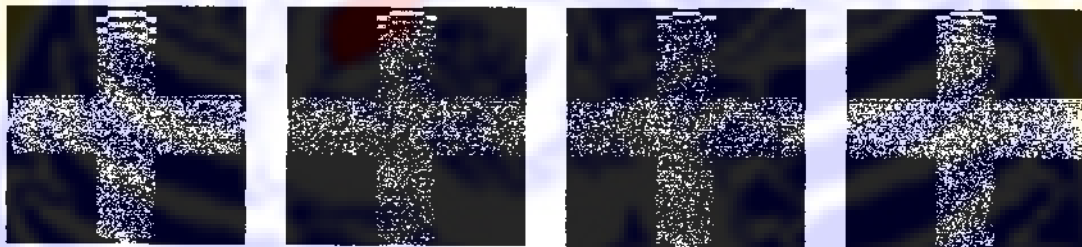


PlusART-D11

PlusART-D19

PlusART-D27

PlusART-D35

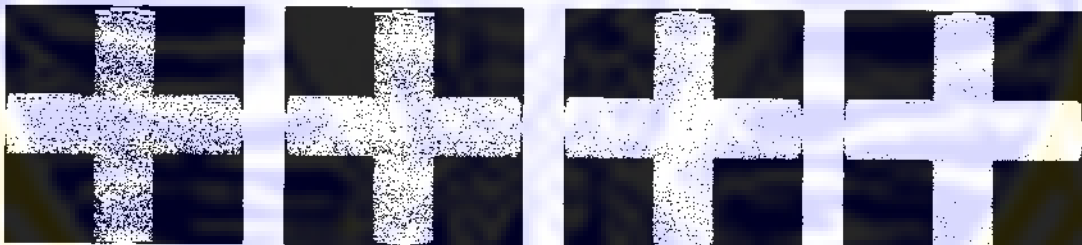


PlusART-D43

PlusART-D51

PlusART-D59

PlusART-D67

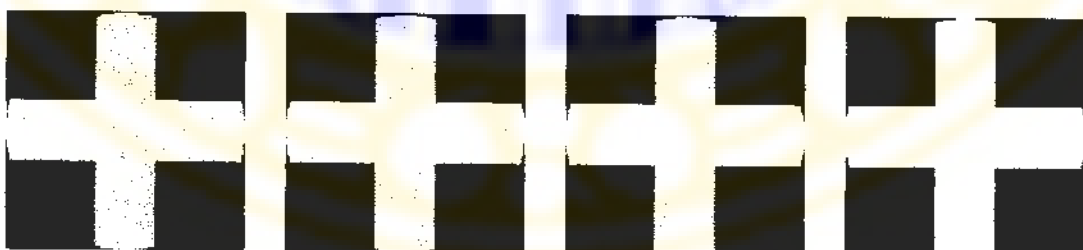


PlusART-D75

PlusART-D83

PlusART-D91

PlusART-D99



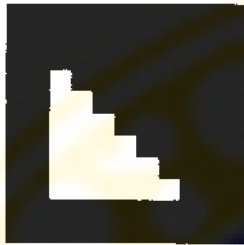
PlusART-D107

PlusART-D115

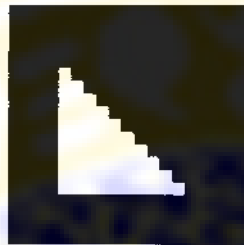
PlusART-D123

PlusART-D131

❖ Citra Segi Tiga Hasil Rekonstruksi Metode ART Discrepancy 10^{-2} Dari Sinogram
Lampiran 2



Sg3ART-D11



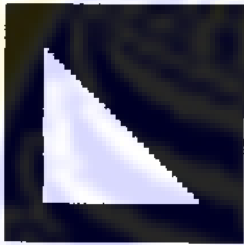
Sg3ART-D19



Sg3ART-D27



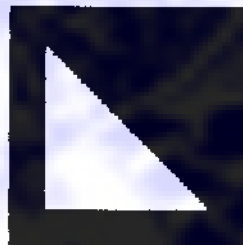
Sg3ART-D35



Sg3ART-D43



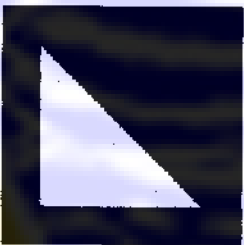
Sg3ART-D51



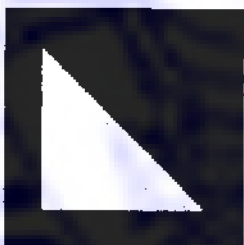
Sg3ART-D59



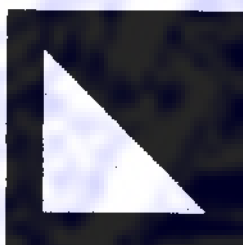
Sg3ART-D67



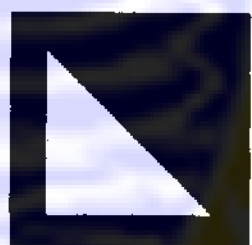
Sg3ART-D75



Sg3ART-D83



Sg3ART-D91



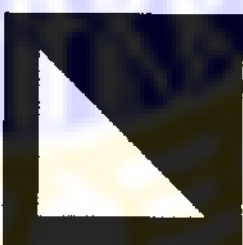
Sg3ART-D99



Sg3ART-D107



Sg3ART-D115



Sg3ART-D123



Sg3ART-D131

Lampiran 6**Perhitungan Resolusi Citra Optimum Objek Plus Menggunakan Persamaan 3.3**

❖ Pada Metode Rekonstruksi FBP :

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-1} = \frac{22,233 - 30,335}{19 - 11} = -1,01275$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-2} = \frac{18,531 - 22,233}{27 - 19} = -0,46275$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-3} = \frac{15,793 - 18,531}{35 - 27} = -0,34225$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-4} = \frac{14,219 - 15,793}{43 - 35} = -0,19675$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-5} = \frac{13,451 - 14,219}{51 - 43} = -0,096$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-6} = \frac{12,158 - 13,451}{59 - 51} = -0,161625$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-7} = \frac{10,336 - 12,158}{67 - 59} = -0,22775$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-8} = \frac{10,33 - 10,336}{75 - 67} = -0,00075$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-9} = \frac{9,736 - 10,33}{83 - 75} = -0,07425$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-10} = \frac{9,817 - 9,736}{91 - 83} = 0,010125$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-11} = \frac{9,067 - 9,817}{99 - 91} = -0,09375$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-12} = \frac{8,612 - 9,067}{107 - 99} = -0,056875$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-13} = \frac{8,72 - 8,612}{115 - 107} = 0,0135$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-14} = \frac{7,866 - 8,72}{123 - 115} = -0,10675$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-15} = \frac{7,264 - 7,866}{131 - 123} = -0,07529$$

❖ Pada Metode Rekonstruksi ART dengan jumlah iterasi sebanyak 50:

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-1} = \frac{3,872}{19} - \frac{5,849}{11} = -0,24713$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-2} = \frac{6,177}{28} - \frac{3,872}{19} = 0,288125$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-3} = \frac{4,91}{36} - \frac{6,177}{27} = -0,158375$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-4} = \frac{4,666}{44} - \frac{4,91}{35} = -0,0305$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-5} = \frac{4,777}{51} - \frac{4,666}{43} = 0,013875$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-6} = \frac{4,837}{59} - \frac{4,777}{51} = 0,0075$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-7} = \frac{4,234}{68} - \frac{4,837}{59} = -0,075375$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-8} = \frac{4,282}{76} - \frac{4,234}{67} = 0,006$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-9} = \frac{4,283}{84} - \frac{4,282}{75} = 0,000125$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-10} = \frac{4,526}{92} - \frac{4,283}{83} = 0,030375$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-11} = \frac{4,543}{100} - \frac{4,526}{91} = 0,002125$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-12} = \frac{4,785}{108} - \frac{4,543}{99} = 0,03025$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-13} = \frac{4,953}{115} - \frac{4,785}{107} = 0,021$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-14} = \frac{5,21}{124} - \frac{4,953}{115} = -0,032125$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-15} = \frac{4,793}{131} - \frac{5,21}{123} = -0,05213$$

❖ Pada Metode Rekonstruksi ART dengan nilai discrepancy 10^{-2} :

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-1} = \frac{3,734}{19} - \frac{3,488}{11} = 0,03075$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-2} = \frac{5,823}{29} - \frac{3,734}{19} = 0,261125$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-3} = \frac{4,317}{37} - \frac{5,823}{27} = -0,18825$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-4} = \frac{4,54}{45} - \frac{4,317}{35} = 0,027875$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-5} = \frac{4,257}{51} - \frac{4,54}{43} = -0,035375$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-6} = \frac{4,613}{59} - \frac{4,257}{51} = 0,0445$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-7} = \frac{4,236}{69} - \frac{4,613}{59} = -0,047125$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-8} = \frac{4,289}{77} - \frac{4,236}{67} = 0,006625$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-9} = \frac{4,29}{85} - \frac{4,289}{75} = 0,000125$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-10} = \frac{4,395}{93} - \frac{4,29}{83} = 0,013125$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-11} = \frac{4,548}{101} - \frac{4,395}{91} = 0,019125$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-12} = \frac{4,802}{109} - \frac{4,548}{99} = 0,03175$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-13} = \frac{4,972}{115} - \frac{4,802}{107} = 0,02125$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-14} = \frac{5,226}{125} - \frac{4,972}{115} = 0,03175$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-15} = \frac{4,805}{131} - \frac{5,226}{123} = -0,052625$$

Lampiran 7**Perhitungan Resolusi Citra Optimum Objek Segitiga Menggunakan Persamaan 3.3**

❖ Pada Metode Rekonstruksi FBP :

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-1} = \frac{6,033}{19} - \frac{7,799}{11} = -0,22075$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-2} = \frac{5,503}{30} - \frac{6,033}{19} = -0,06625$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-3} = \frac{4,895}{38} - \frac{5,503}{27} = -0,076$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-4} = \frac{4,009}{46} - \frac{4,895}{35} = -0,11075$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-5} = \frac{4,117}{51} - \frac{4,009}{43} = 0,0135$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-6} = \frac{3,851}{59} - \frac{4,117}{51} = -0,03325$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-7} = \frac{3,293}{70} - \frac{3,851}{59} = -0,06975$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-8} = \frac{3,11}{78} - \frac{3,293}{67} = -0,022875$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-9} = \frac{3,226}{86} - \frac{3,11}{75} = 0,0145$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-10} = \frac{3,088}{94} - \frac{3,226}{83} = -0,01725$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-11} = \frac{2,658}{102} - \frac{3,088}{91} = -0,05375$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-12} = \frac{2,851}{110} - \frac{2,658}{99} = 0,024125$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-13} = \frac{2,757}{115} - \frac{2,851}{107} = -0,01175$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-14} = \frac{2,439}{126} - \frac{2,757}{115} = -0,03975$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-15} = \frac{2,355}{131} - \frac{2,439}{123} = -0,0105$$

❖ Pada Metode Rekonstruksi ART dengan nilai discrepancy 10^{-2} :

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-1} = \frac{0,483 - 0,88}{19 - 11} = -0,049625$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-2} = \frac{0,487 - 0,483}{32 - 19} = 0,0005$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-3} = \frac{0,397 - 0,487}{40 - 27} = -0,01125$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-4} = \frac{0,445 - 0,397}{48 - 35} = 0,006$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-5} = \frac{0,405 - 0,445}{51 - 43} = -0,005$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-6} = \frac{0,423 - 0,405}{59 - 51} = 0,00225$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-7} = \frac{0,349 - 0,423}{72 - 59} = -0,00925$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-8} = \frac{0,303 - 0,349}{80 - 67} = -0,00575$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-9} = \frac{0,311 - 0,303}{88 - 75} = 0,001$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-10} = \frac{0,277 - 0,311}{96 - 83} = -0,00425$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-11} = \frac{0,262 - 0,277}{104 - 91} = -0,001875$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-12} = \frac{0,262 - 0,262}{112 - 99} = 0$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-13} = \frac{0,274 - 0,262}{115 - 107} = 0,0015$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-14} = \frac{0,329 - 0,274}{128 - 115} = 0,006875$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-15} = \frac{0,262 - 0,329}{131 - 123} = -0,008375$$

❖ Pada Metode Rekonstruksi ART dengan jumlah iterasi sebanyak 50:

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-1} = \frac{0,356 - 0,917}{19 - 11} = -0,070125$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-2} = \frac{0,382 - 0,356}{31 - 19} = 0,00325$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-3} = \frac{0,241 - 0,382}{39 - 27} = -0,017625$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-4} = \frac{0,29 - 0,241}{47 - 35} = 0,006125$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-5} = \frac{0,259 - 0,29}{51 - 43} = -0,003875$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-6} = \frac{0,263 - 0,259}{59 - 51} = 0,0005$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-7} = \frac{0,0998 - 0,263}{71 - 59} = -0,0204$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-8} = \frac{0,0623 - 0,0998}{79 - 67} = -0,0046875$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-9} = \frac{0,055 - 0,0623}{87 - 75} = -0,0009125$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-10} = \frac{0,0364 - 0,055}{95 - 83} = -0,002325$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-11} = \frac{0,0489 - 0,0364}{103 - 91} = 0,0015625$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-12} = \frac{0,0684 - 0,0489}{111 - 99} = 0,0024375$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-13} = \frac{0,0461 - 0,0684}{115 - 107} = -0,027875$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-14} = \frac{0,0611 - 0,0461}{127 - 115} = 0,001875$$

$$\text{Resolusi Citra Optimum ke-15} = \frac{0,0149 - 0,0611}{131 - 123} = -0,005775$$