

BAB 2

DASAR TEORI

2.1. KAJIAN PUSTAKA

Penelitian Warsito P. Taruno pada tahun 2013 yang berjudul “*Brain Tumor Detection using Electrical Capacitance Volume Tomography (ECVT)*” meneliti tentang penggunaan teknik ECVT untuk pencitraan real-time dan volumetrik aktivitas otak untuk mendeteksi tumor otak. Sistem sensor ECVT mengukur kapasitansi sinyal listrik di otak dan menghasilkan peta volumetrik aktivitas otak menggunakan algoritma rekonstruksi gambar tomografi. Studi ini menunjukkan kelayakan teknik pencitraan 4D sebagai alternatif non-radiasi untuk deteksi kanker otak dan pencitraan fungsional [15].

Penelitian Arbai Yusuf, et al pada tahun 2014 yang berjudul “*Single Signal Conditioning Multi Electrode for ECVT Data Acquisition System*” meneliti tentang sistem akuisisi data untuk tomografi volume kapasitansi listrik (ECVT) yang menggunakan pengkondisian sinyal tunggal untuk beberapa elektroda. Ini menyederhanakan konstruksi perangkat keras dan mengurangi konsumsi daya. Hasil percobaan menunjukkan bahwa sistem ECVT mampu mencapai pengukuran kapasitansi dengan resolusi 0,42 fF [16].

Penelitian Arbai Yusuf, et al pada tahun 2014 yang berjudul “*Analysis of Single Excitation Signal for High Speed ECVT Data Acquisition System*” meneliti tentang gelombang tunggal sinyal eksitasi disuntikkan ke dalam pasangan elektroda yang akan menghasilkan satu pengukuran kapasitansi. Metode yang diusulkan mencapai kecepatan akuisisi data 138 frame per detik untuk 16 saluran tanpa mengorbankan akurasi dan sensitivitas pengukuran kapasitansi [17].

Penelitian Panji Nursetia, et al pada tahun 2014 yang berjudul “*On the Development of Integrated Real Time Data Acquisition and Volume Data Processing Software for ECVT*” makalah ini menjelaskan Aplikasi ini mengimplementasikan akuisisi data dan pengolahan data dalam satu platform.

Menunjukkan keberhasilan pengembangan aplikasi perangkat lunak terintegrasi untuk ECVT, memungkinkan pengukuran waktu nyata, visualisasi, dan rekonstruksi gambar parallel [18].

Penelitian Nita Handayani, et al pada tahun 2016 yang berjudul “Simulasi Rekonstruksi Citra pada Sensor Brain ECVT (*Electrical Capacitance Volume Tomography*) dengan Metode ILBP (*Iterative Linear Back Projection*)” meneliti tentang mensimulasikan rekonstruksi gambar sensor 32-channel Brain ECVT menggunakan metode ILBP, dan hasilnya menunjukkan bahwa gambar yang direkonstruksi dipengaruhi oleh parameter seperti posisi objek, nilai kerapatan muatan, nilai alfa, dan jumlah iterasi yang dipilih [19].

Penelitian Fianti F. Darmawan, et al tahun 2017 yang berjudul “*Human Brain Auditory Activity Observation Using Electrical Capacitance Volume Tomography*” meneliti tentang aktivitas otak manusia sebagai respons terhadap rangsangan audio. Nilai permitivitas yang diperoleh dari pemrosesan gambar berkorelasi dengan setiap subjek, menunjukkan koefisien korelasi lebih tinggi dari 0,5 di semua kondisi stimulus. Hasilnya menunjukkan bahwa ECVT dapat dianggap sebagai teknik yang menjanjikan untuk mengklasifikasikan area otak yang diaktifkan sebagai respons terhadap rangsangan pendengaran, dengan aplikasi potensial dalam penelitian ilmu saraf [20].

Penelitian Marlin R Baidillah dan Masahiro Takei pada tahun 2017 yang berjudul “*Exponential Model Normalization for Electrical Capacitance Tomography with External Electrodes Under Gap Permittivity Conditions*” dalam penelitian ini, penulis membandingkan normalisasi model eksponensial dengan model normalisasi lainnya seperti model Paralel, Seri, Maxwell, dan Böttcher untuk ECT dengan elektroda eksternal di bawah kondisi permitivitas celah. Perbandingan dilakukan berdasarkan hasil rekonstruksi gambar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model eksponensial yang diusulkan dapat diandalkan dalam memprediksi normalisasi nonlinier kapasitansi terukur untuk distribusi dielektrik kontras rendah dan tinggi [12].

Penelitian Rizky Maharani, et al pada tahun 2020 dengan penelitiannya yang berjudul “*Average Subtraction Method for Image Reconstruction of Brain using ECVT for Tumor Detection*” membahas tentang metode pengurangan rata-rata

untuk rekonstruksi gambar otak menggunakan ECVT. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan resolusi gambar yang direkonstruksi dan memberikan wawasan yang lebih baik tentang aktivitas listrik intrakranial otak, terutama dalam kasus perkembangan tumor di dalam otak sehingga dapat membantu dalam deteksi dan lokalisasi tumor otak dengan lebih baik [11].

Penelitian Rizki Edmi Edison, et al pada tahun 2021 yang berjudul “*Design of Brain Activity Measurement for Brain ECVT Data Acquisition System*” meneliti tentang dua saluran, yaitu sensor kapasitansi sebagai pembanding, sensor EEG digunakan untuk mengukur aktivitas otak secara bersamaan dengan ECVT otak. Hasil analisis sinyal menunjukkan bahwa pengukuran antara EEG dan ECVT menunjukkan aktivitas yang sama dari kedua modalitas tersebut [21].

2.2. DASAR TEORI

2.2.1. Brain Tumor

Pertumbuhan abnormal sel-sel otak yang jinak (non-kanker) atau ganas (kanker) disebut tumor otak. Metastasis intrakranial dari kanker sistemik, meningioma, dan glioma, terutama glioblastoma adalah jenis tumor otak yang paling umum. Metastasis intrakranial adalah tumor otak yang berasal dari kanker di bagian lain tubuh dan menyebar ke otak. Meninges atau selaput pelindung yang mengelilingi otak dan sumsum tulang belakang, memiliki tumor yang berkembang disebut meningioma. Glioblastoma merupakan tumor otak primer yang paling umum dan agresif, memiliki respons terbatas terhadap kemoradiasi dan perawatan konvensional. Untuk membuat "diagnosis terpadu" yang lebih baik untuk menangkap prognosis, glioblastoma yang termasuk klasifikasi glioma, sekarang menggabungkan karakteristik molekuler dan histologi [25].

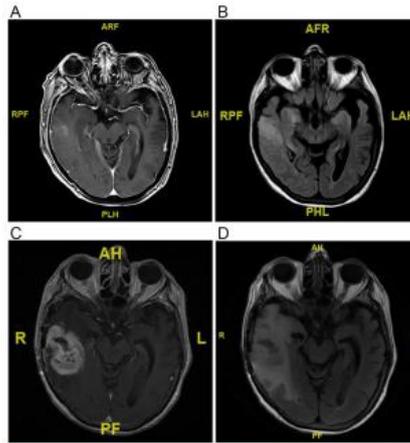


Figure 4 A 73-year-old woman presented following her first seizure. (A) T1 post-contrast and (B) fluid-attenuated inversion recovery sequences reveal a small enhancing lesion with surrounding edema in the right temporal lobe. She underwent resection and pathology demonstrated an isocitrate dehydrogenase-wildtype, O⁶-methylguanine-DNA methyltransferase unmethylated glioblastoma. She received radiation and temozolomide, but subsequently progressed as demonstrated by increasing enhancement (C) and surrounding edema (D). Ultimately, patient succumbed to her disease 14 months after initial diagnosis.

Gambar 2. 1 Contoh Kasus Glioblastoma [25]

Dibandingkan dengan kanker lain, tumor otak dapat menyebabkan kematian yang lebih tinggi. Paparan radiasi pengan adalah faktor risiko lingkungan yang mapan untuk tumor otak, dengan paparan radiasi meningkatkan risiko mengembangkan tumor yang diinduksi radiasi, seperti meningioma, glioma, dan schwannoma. Risiko tumor yang diinduksi radiasi paling tinggi pada bayi dan menurun seiring dengan meningkatnya usia saat paparan radiasi [26].

Gelombang otak juga dikenal sebagai "gelombang otak" diciptakan oleh sebagian besar tegangan listrik lemah yang dihasilkan oleh jutaan sel saraf atau neuron di otak manusia [27]. Secara umum, otak manusia menghasilkan lima jenis gelombang otak (*brainwave*): Gamma, Beta, Alpha, Tetha, dan Delta. Frekuensi gelombang otak ini berkisar antara 0 dan 30 Hz [28].

Tabel 2. 1 Analisis Distribusi Medan Listrik [29]

Material	Relative Permittivity		Conductivity (S/m)	
	100 kHz	200 kHz	100 kHz	200 kHz
Air	1	1	0	0
Copper	1	1	5.99×10^7	5.99×10^7
Brain	2107.6	1288.6	0.081845	0.086765
Cancer	2860.9	2459.1	0.53605	0.54

Tabel 2.2 memberikan informasi tentang sifat listrik dari bahan yang berbeda, yang dapat berguna dalam memahami perilakunya dalam analisis distribusi medan listrik. Permittivitas relatif menunjukkan kemampuan suatu bahan untuk menyimpan energi listrik dalam medan listrik, sedangkan konduktivitas menunjukkan kemampuan suatu bahan untuk menghantarkan arus listrik. Otak dan Kanker memiliki permittivitas relatif lebih tinggi dibandingkan dengan Udara dan Tembaga, menunjukkan bahwa mereka dapat menyimpan lebih banyak energi listrik di medan listrik dan konduktivitas yang lebih rendah dibandingkan dengan tembaga, menunjukkan bahwa mereka kurang konduktif terhadap arus listrik. Perbedaan permittivitas relatif dan konduktivitas antara Otak dan Kanker pada frekuensi yang berbeda menunjukkan bahwa sifat listriknya dapat bervariasi tergantung pada frekuensi medan listrik [29].

Sel-sel hidup menggunakan medan listrik yang terkait dengan fungsi sel. Intensitas medan listrik di dalam sel kurang dari 10 V/cm, tetapi di dalam membran sel dapat mencapai 105 V/cm, dan sel kanker memiliki seluler yang lebih tinggi potensial seluler yang lebih tinggi daripada sel normal. Medan listrik homogen mengorientasikan molekul polar di sepanjang garis gaya mereka, sedangkan yang tidak homogen medan listrik mengarahkan molekul kutub ke arah intensitas medan yang lebih tinggi, menunjukkan dielektroforesis. Medan listrik dari arus bolak-balik (ac) memaksa molekul polar untuk berosilasi dan efeknya berkurang ketika frekuensi mereka meningkat, kecuali untuk pemanasan. Oleh karena itu, medan ac 100 kHz atau lebih tinggi diketahui tidak memiliki efek biologis yang signifikan efek biologis yang signifikan, meskipun beberapa beberapa efek yang tidak signifikan telah dilaporkan [30].

2.2.2. Tomografi

Tomografi adalah suatu teknik pencitraan atau pengambilan gambar yang digunakan untuk memvisualisasikan struktur internal dari suatu objek secara potongan atau lintasan. Tujuan utama tomografi adalah untuk mendapatkan informasi tentang distribusi materi atau sifat fisik objek yang diuji tanpa perlu menghancurkan atau mengganggu objek tersebut [31]. Tomografi merupakan istilah umum untuk modalitas pencitraan ini, yang dapat dikategorikan menjadi dua

jenis dasar: tomografi lapangan keras dan tomografi bidang lunak. Tomografi medan keras mencakup teknik seperti Tomografi Sinar-X, Pencitraan Resonansi Magnetik (MRI), dan Tomografi Emisi Positron (PET), sedangkan tomografi medan lunak mencakup teknik seperti Tomografi Kapasitansi Listrik (ECT), Tomografi Impedansi Listrik (EIT), dan Tomografi Induksi Magnetik (MIT). ECT adalah modalitas tomografi proses mapan yang sangat cocok untuk mengukur proses aliran tiga fase dengan sifat listrik yang bervariasi. Pengembangan teknik ECT berbasis multi-frekuensi baru yang memanfaatkan efek *Maxwell's-Wagner-Sillars* (MWS) telah diusulkan untuk meningkatkan kualitas pencitraan aliran multifase yang didominasi air [32].

Dalam konteks *Electrical Capacitance Volume Tomography* (ECVT), toward imaging dapat mengindikasikan upaya untuk meningkatkan kemampuan pencitraan sistem ECVT. ECVT adalah teknologi pencitraan 3D non-invasif yang terutWMA digunakan untuk mencitrakan aliran multifase dalam berbagai aplikasi industri. Ini melibatkan rekonstruksi distribusi permitivitas 3D secara langsung dari kapasitansi yang diukur, dan menawarkan pencitraan non-intrusif karena operasi tanpa kontak. ECVT telah menunjukkan potensi untuk visualisasi 3D dan sedang diteliti secara aktif untuk meningkatkan resolusi spasialnya dan mengatasi masalah rekonstruksi yang sangat nonlinier. ECVT bertujuan untuk meningkatkan resolusi dengan meningkatkan jumlah sensor dan mengembangkan algoritma rekonstruksi yang kuat [33].

2.2.3. Electrical Capacitance Volume Tomography

ECVT (*Electrical Capacitance Volume Tomography*) adalah teknik yang digunakan untuk pencitraan real-time dan volumetrik aktivitas otak, khusus untuk mendeteksi keberadaan tumor otak. ECVT adalah bentuk lain dari ECT yang telah dimodifikasi agar dapat mencitrakan objek secara volumetric [34]. Ini mengukur kapasitansi sinyal listrik di otak di korteks dan menghasilkan peta volumetrik aktivitas otak. Desain sensor ECVT telah dioptimalkan untuk mendeteksi tumor otak di berbagai daerah sensitivitas otak. Dengan memeriksa kelainan fungsional otak, ECVT dapat mendeteksi tumor otak karena mereka menghalangi penyebaran

sinyal saraf dan menyebabkan kelainan pada citra aktivitas otak. Perbandingan dengan hasil CT dan MRI telah menunjukkan kelayakan ECVT sebagai alternatif non-radiasi untuk deteksi kanker otak dan pencitraan fungsional [35].

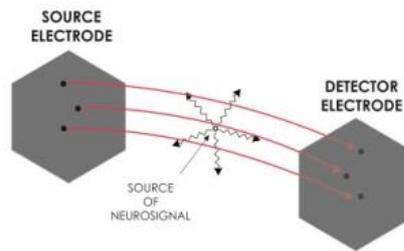


Gambar 2. 2 Brain ECVT System [36]

ECVT mengukur data kapasitansi sebagai hasil dari perubahan distribusi permitivitas antara sepasang elektroda kapasitansi. Perubahan potensial listrik otak dimasukkan ke dalam data kapasitansi yang diukur oleh ECVT. Dengan teknik rekonstruksi yang tepat, perubahan potensial listrik otak dapat dipetakan ke dalam gambar aktivitas otak yang sesuai dan ditampilkan dalam 3D real-time [37].

2.2.3.1. Prinsip ECVT

Prinsip ECVT (*Electrical Capacitance Volume Tomography*) otak melibatkan pengukuran aktivitas otak non-invasif dan rekonstruksi gambar volumetrik sinyal otak secara real time. ECVT didasarkan pada prinsip rekonstruksi distribusi permitivitas di dalam wilayah pencitraan [15]. Sensor ECVT dirancang dengan beberapa pelat konduktif yang disusun di sekitar permukaan yang akan dicitrakan, dan setiap pasangan pelat terdiri dari satu pelat eksitasi dan satu pelat penerima [22]. ECVT adalah teknik untuk mencitrakan struktur objek yang memanfaatkan prinsip kapasitor pelat paralel.



Gambar 2. 3 Prinsip Pengukuran Kapasitansi Sinyal Otak [15]

Rumus untuk prinsip ECVT melibatkan jarak antara dua pelat (d) dan permitivitas bahan di antara pelat (ϵ). Rumus untuk kapasitansi (C) kapasitor pelat paralel diberikan oleh:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (1)$$

Dimana :

- $C = \text{Capacitance}$
- $\epsilon = \text{Permitivitas bahan di antara pelat}$
- $A = \text{Luas pelat}$
- $d = \text{Jarak antara pelat}$

Sistem ECVT mengumpulkan data kapasitansi dari elektroda yang ditempatkan di sekitar atau di dekat otak, dan data ini digunakan untuk rekonstruksi gambar aktivitas otak [22]. Pengukuran aktivitas otak yang dihasilkan diproses menggunakan metode penyaringan dan *Power Spectral Density* (PSD) [21]. *Brain ECVT* telah dikembangkan sebagai metode pencitraan otak *non-invasif* alternatif dan dikenal karena sifatnya yang non-radiatif dan *non-invasif* [22]. ECVT tidak bersentuhan dan tidak mengganggu, dan memerlukan prosedur kalibrasi dan normalisasi sebelum pengukuran aktual untuk menghilangkan efek kapasitansi liar dan dinding isolasi apa pun antara elektroda dan wilayah yang akan dicitrakan. Teknologi ini telah digunakan untuk mengukur sinyal listrik yang

dihasilkan dari aktivitas otak manusia dan merekonstruksi gambar volumetrik dari sinyal otak secara real time [38].

2.2.3.2. Sensor pada ECVT

Dalam sistem akuisisi data ECVT otak, sensor EEG digunakan untuk mengukur aktivitas otak secara bersamaan dengan ECVT otak [21]. Sensor kapasitansi mengukur perubahan tegangan pada sisi penerima sensor dengan menggunakan sinyal AC. Ini diposisikan sejajar dengan elektroda dan dikelilingi oleh pelindung untuk memastikan pengukuran yang akurat. Dimensi dan desain sensor kapasitansi sangat penting untuk fungsinya, termasuk jarak antara elektroda, jarak antara elektroda dan tanah, dan ukuran dan ketebalan elektroda. Sensor kapasitansi terhubung ke generator sinyal dan osiloskop USB, yang memungkinkan tegangan yang diterima pada sensor untuk dibaca dan disimpan di komputer. Sensor kapasitansi, bersama dengan sensor EEG, digunakan secara bersamaan untuk mengukur aktivitas otak dan mendapatkan hasil yang sebanding [21].

2.2.3.3. Forward Problem

Forward problem pada ECVT merujuk pada permasalahan dalam menghitung kapasitansi dari distribusi permitivitas yang diinputkan untuk mendapatkan gambaran yang diinginkan. *Forward problem* merupakan salah satu tantangan utama dalam ECVT, dan melibatkan proses pengukuran dan pemodelan data kapasitansi yang dikumpulkan dari elektroda atau pelat yang ditempatkan di sekitar atau dekat dengan daerah yang diminati. *Forward problem* dalam ECVT dapat diselesaikan menggunakan berbagai metode, termasuk metode elemen hingga, jaringan saraf tiruan, dan metode numerik lainnya. Pemecahan *forward problem* ini penting untuk rekonstruksi gambar 3D dalam ECVT [39].

$$C_i = - \frac{1}{\Delta V_i} \oint_{A_i} \varepsilon(x, y, z) \nabla \phi(x, y, z) dA \quad (2)$$

Dimana ΔV_i adalah perbedaan tegangan antara pasangan elektroda, A_i adalah luas permukaan yang melingkupi elektroda detektor. Persamaan ini menghubungkan konstanta dielektrik (permitivitas) *distribution*, $\varepsilon(x, y, z)$, dengan kapasitansi yang diukur C_i .

Kapasitansi diukur melalui elektroda atau pelat yang ditempatkan di sekitar atau dekat dengan daerah yang diminati. Data kapasitansi yang diukur kemudian diolah untuk menghasilkan gambaran 3D dari distribusi permitivitas yang sebenarnya dari objek yang diamati. Normalisasi kapasitansi dapat dilakukan untuk memperbaiki akurasi pengukuran kapasitansi dan menghilangkan efek kapasitansi yang tidak diinginkan pada pengukuran. Normalisasi kapasitansi dapat dilakukan dengan menggunakan metode kalibrasi atau metode pemodelan numerik [39].

2.2.3.4. Invers Problem

Invers problem pada brain ECVT merujuk pada tantangan dalam merekonstruksi citra yaitu proses pengolahan data yang bertujuan untuk menghasilkan citra tiga dimensi (3D) dari distribusi permittivitas relatif atau konduktivitas bahan di dalam suatu objek atau sistem. Teknik ini menggunakan prinsip bahwa perubahan kapasitansi antara elektroda-elektroda yang berada di sekitar objek dapat digunakan untuk memperkirakan distribusi permittivitas atau konduktivitas bahan di dalamnya. Proses *invers* ini melibatkan pengembangan metode yang akurat dan efisien untuk menghasilkan gambaran yang sesuai dengan distribusi permitivitas yang sebenarnya dari otak yang diamati. Proses *invers* ini memiliki aplikasi yang luas, termasuk dalam bidang deteksi tumor otak dan pemantauan aktivitas kelistrikan otak secara *non-invasif* [22]. Rekonstruksi citra pada brain ECVT (*Electrical Capacitance Volume Tomography*) melibatkan pengolahan data kapasitansi yang diukur oleh sensor ECVT untuk merekonstruksi gambaran 3D dari distribusi permitivitas otak yang sebenarnya. Beberapa metode yang digunakan untuk merekonstruksi citra pada brain ECVT antara lain *Iterative Linear Back Projection* (ILBP) dan neural network [40]. Proses *invers* pada brain ECVT merupakan bagian penting dalam pengembangan metode pencitraan otak

yang *non-invasif* dan dapat memberikan kontribusi dalam pemahaman dan deteksi berbagai kondisi otak [21].

$$G = S^T C \quad (3)$$

Dimana G adalah vektor gambar, S^T adalah sensitivitas faktor penalti, C adalah vektor data kapasitansi. Dalam banyak kasus, terutama tomografi listrik, masalahnya tidak jelas, yaitu ada lebih sedikit pengukuran independen daripada voxel yang tidak diketahui yang tidak diketahui, sehingga matriks kebalikan dari tidak ada. Cara paling sederhana untuk memperkirakan vektor gambar adalah dengan menggunakan teknik proyeksi balik [34]. Pada penelitian ini rekonstruksi citra akan dilakukan dengan Matlab Eiders.

2.2.4. Konstanta Dielektrik

Konstanta dielektrik, juga dikenal sebagai permitivitas listrik relatif, menunjukkan rapatnya fluks elektrostatis dalam suatu bahan ketika diberi potensial listrik. Dengan demikian, konstanta ini menunjukkan perbandingan energi listrik yang tersimpan pada bahan jika diberi potensial relatif terhadap vakum, atau ruang hampa[41]. Dalam kapasitor, bahan dielektrik menghambat aliran arus antara platnya. Tabel 2.3 menunjukkan berbagai bahan yang digunakan sebagai dielektrik.

Tabel 2. 2 Nilai Konstanta Dielektrik Pada Suatu Bahan[41]

Bahan Konstanta	Dielektrik
Vakum	1
Udara	1,006
Mika	3-6
Kayu	2-8
Air	80,37
Logam	~

2.2.5. Normalisasi Kapasitansi

Normalisasi kapasitansi dalam tomografi kapasitansi listrik adalah proses yang digunakan untuk membuat data pengukuran menjadi tidak berdimensi, memfasilitasi pemrosesan matematis dan rekonstruksi gambar sekaligus mengurangi kesalahan pengukuran. Model normalisasi yang berbeda dapat memengaruhi kualitas gambar yang direkonstruksi. Kapasitansi yang dinormalisasi dapat berupa fungsi linier atau nonlinier dari kapasitansi yang diukur, tergantung pada model normalisasi yang digunakan. Normalisasi dicapai dengan membagi kapasitansi yang diukur dengan nilai referensi, sehingga data menjadi tidak berdimensi dan cocok untuk pemrosesan lebih lanjut. Normalisasi kapasitansi sangat penting untuk mengurangi kesalahan sistematis dalam sistem pengukuran dan meningkatkan akurasi gambar yang direkonstruksi [42].

Normalisasi kapasitansi dalam ECVT merujuk pada proses kalibrasi untuk menetapkan range kapasitansi yang dapat diukur dari alat tersebut. Proses ini dilakukan dengan menetapkan batas bawah (kapasitansi normalisasi) menggunakan benda yang memiliki permitivitas kecil, seperti udara, untuk pasangan elektroda terdekat maupun terjauh. Hal ini penting karena nilai kapasitansi yang diukur akan dipengaruhi oleh permitivitas benda yang diukur. Proses normalisasi ini juga memengaruhi data akuisisi dalam proses imaging ECVT [43].

Normalisasi kapasitansi adalah proses yang digunakan dalam *Electrical Capacitance Volume Tomography* (ECVT) untuk meningkatkan kualitas gambar yang direkonstruksi. Dalam ECVT, kapasitansi yang diukur biasanya dinormalisasi pada nilai permitivitas tinggi dan rendah untuk membuat gambar. Ada berbagai model normalisasi yang digunakan dalam proses ini, termasuk model normalisasi statik yaitu Paralel [44], Seri [45], Maxwell [46], dan Böttcher [47], Exponential [23].

2.2.5.1. *Traditional Moving average (TMA)*

Traditional Moving average atau biasa disebut *Traditional Moving average* (TMA) adalah rata-rata umum n titik data sebelumnya dalam data deret waktu dengan memberikan bobot yang sama[48].

$$TMA = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x [i + j] \quad (4)$$

Dimana, P_M adalah nilai titik data pada waktu M dan n adalah jumlah titik data yang digunakan dalam perhitungan. TMA memberikan bobot yang sama pada setiap data maka setiap data memiliki kontribusi yang sama dalam perhitungan rata-rata[49]. TMA adalah nilai rata-rata selama periode waktu tertentu, sedangkan EMA diberi bobot untuk mendukung data yang lebih baru.

2.2.5.2. *Exponential Moving average*

Exponential Moving average (EMA) adalah jenis *moving average* yang memberikan bobot lebih besar pada titik data terbaru dibandingkan titik data yang lebih lama. Perhitungan EMA pertama sama dengan perhitungan TMA, pada perhitungan pertama akan menggunakan perhitungan TMA lalu untuk menghitung faktor penghalusan dan perhitungan EMA selanjutnya dengan menggunakan rumus berikut [50]:

$$\begin{aligned} S_1 &= Y_1, \\ t > 1, S_t &= \alpha \times Y_t + (1 - \alpha) \times S_{t-1} \end{aligned} \quad (5)$$

Dimana Y_t adalah nilai pada periode waktu t , S_t adalah nilai EMA pada periode waktu t , dan α mewakili derajat penurunan bobot, faktor penghalusan yang konstan antara 0 dan α dihitung menggunakan rumus[50]

$$\alpha = \frac{2}{N+1} \quad (6)$$

EMA dirancang untuk meningkatkan ide dari rata-rata bergerak sederhana dengan memberikan bobot lebih pada data terbaru, yang dianggap lebih relevan daripada data yang lebih lama. Karena data baru memiliki bobot yang lebih besar, EMA merespons perubahan harga lebih cepat daripada TMA[50].

2.2.5.3. *Weighted Moving average*

Weighted Moving average (WMA) digunakan untuk meratakan fluktuasi data dan mengidentifikasi tren. Tidak seperti *Traditional Moving average* (TMA) yang memberikan bobot yang sama pada setiap data, WMA memberikan bobot yang berbeda pada setiap data dengan memberikan bobot lebih besar pada data yang lebih baru. Rumus untuk WMA adalah sebagai berikut[51]:

$$WMA = (\sum(Dt. bobot))/(\sum bobot) \quad (7)$$

Dimana Dt adalah data aktual pada periode t . Kontribusi data lama terhadap perhitungan WMA menjadi lebih sedikit karena bobot data lama lebih kecil. Sebaliknya, WMA menekankan lebih banyak pada data terbaru karena bobotnya lebih besar, membuat WMA lebih responsif terhadap perubahan dan tren terbaru dalam data. Data lama secara efektif menjadi kurang penting dalam mempengaruhi hasil akhir[51].

2.2.6. Parameter Uji

Pada penelitian ini menggunakan 3 parameter uji yaitu *Correlation Coefficient* (CC), *Root Mean Square Error* (RMSE), *Image Error* (IE).

2.2.6.1. *Correlation Coefficient* (CC)

Correlation Coefficient (CC) adalah ukuran statistik yang mengukur kekuatan dan arah hubungan linier antara dua variabel, mulai dari -1 hingga 1; nilai -1 menunjukkan hubungan linier negatif, 0 menunjukkan tidak ada hubungan linier

dan 1 menunjukkan hubungan linier positif. CC digunakan di berbagai bidang, untuk menilai tingkat hubungan antara dua variabel, faktor, atau kumpulan data [52].

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (G_k - \overline{G_k})(G_{true} - \overline{G_{true}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_k - \overline{G_k})^2 \sum_{i=1}^n (G_{true} - \overline{G_{true}})^2}} \quad (8)$$

Dimana G_{true} adalah permitivitas yang dinormalisasi dari distribusi yang sebenarnya, G_k adalah distribusi gambar yang direkonstruksi.

2.2.6.2. Root Mean Square Error (RMSE)

Root Mean Square Error (RMSE) adalah cara standar untuk mengukur kesalahan model dalam memprediksi data kuantitatif [53]. RMSE digunakan untuk menilai jumlah kesalahan dalam regresi atau model statistik lainnya. Nilai 0 berarti bahwa nilai prediksi sama persis dengan nilai aktual, namun tidak akan pernah melihat hal tersebut dalam praktiknya. Nilai RMSE yang rendah menunjukkan bahwa model tersebut cocok dengan data dan memiliki prediksi yang lebih tepat[54]. Sebaliknya, nilai yang lebih tinggi menunjukkan lebih banyak kesalahan dan prediksi yang kurang tepat.

$$RSME = \frac{\sqrt{(C_{true} - C_k)^T \cdot (C_{true} - C_k)}}{C_{true}^T \cdot C_{true}} \quad (9)$$

Dimana C_{true} adalah kapasitansi terukur dan C_k adalah kapasitansi yang diprediksi berdasarkan forward problem.

2.2.6.3. Image Error (IE)

Image Error (IE) adalah untuk mengevaluasi perbedaan antara gambar yang dihasilkan atau diproses dengan gambar referensi atau gambar asli dengan nilai mendekati 0[23].

$$IE = \frac{\sqrt{(G_{true} - G_k)^T \cdot (G_{true} - G_k)}}{G_{true}^T \cdot G_{true}} \quad (9)$$

Dimana G_{true} adalah permitivitas yang dinormalisasi dari distribusi yang sebenarnya, G_k adalah distribusi gambar yang direkonstruksi. Nilai CC adalah 1, jika area rasio dan permitivitas rekonstruksi gambar sama dengan kondisi phantom, dan IE menunjukkan kuantifikasi perbedaan antara rekonstruksi gambar dan kondisi phantom. Ini adalah situasi ideal. Nilai residu total antara kapasitansi sebenarnya dan kapasitansi yang diprediksi masalah ke depan ditunjukkan oleh RMSE. Jika nilai CC adalah 1, nilai IE dan RMSE adalah 0 [23].

2.2.6.4. Standar Deviasi

Standar Deviasi adalah pembakuan dari penyimpangan nilai pada distribusi data yang dihitung dari nilai mean-nya yang selanjutnya dinamakan simpangan baku. Semakin kecil nilai Standar Deviasi implementasi semakin baik [55] [56].

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{x})^2}{n}} \quad (10)$$

Dimana:

N = jumlah subyek

x_i = nilai subyek ke i

\tilde{x} = nilai rata-rata seluruh subyek