

**EVALUASI PARAMETER *QUALITY CONTROL*  
TERPILIH PADA SISTEM PET/CT GE DISCOVERY  
IQ GEN 2 RING 5**

**TUGAS AKHIR**

Untuk memenuhi sebagai persyaratan mencapai derajat sarjana S-1  
Program Studi Fisika



diajukan oleh :

Adhitiyo Dwi Prayitno

22106020039

STATE ISLAMIC UNIVERSITY  
**SUNAN KALIJAGA**  
PROGRAM STUDI FISIKA  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
**UIN SUNAN KALIJAGA YOGYAKARTA**

**2026**

# LEMBAR PENGESAHAN



KEMENTERIAN AGAMA  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

## PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-1295/Un.02/DST/PP.00.9/06/2026

Tugas Akhir dengan judul : Evaluasi Parameter Quality Control Terpilih pada Sistem PET/CT GE Discovery IQ Gen 2 Ring 5

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : ADHITIYO DWI PRAYITNO  
Nomor Induk Mahasiswa : 22106020039  
Telah diujikan pada : Jumat, 05 Juni 2026  
Nilai ujian Tugas Akhir : A

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

### TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang  
Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D.  
SIGNED

Valid ID: 6a27fe410a83



Penguji I  
Dr. Nita Handayani, S.Si., M.Si.  
SIGNED

Valid ID: 6a2770819a8c3



Penguji II  
Frida Agung Rakhmadi, S.Si., M.Sc.  
SIGNED

Valid ID: 6a28201109ccc



Yogyakarta, 05 Juni 2026  
UIN Sunan Kalijaga  
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi  
Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wandati, M.Si.  
SIGNED

Valid ID: 6a2a1656c4e8b

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

### SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Adhityo Dwi Prayitno  
NIM : 22106020039  
Program Studi : Fisika  
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul "Evaluasi Parameter *Quality Control* Terpilih pada Sistem PET/CT GE Discovery IQ Gen 2 Ring 5" merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 17 Mei 2026

Penulis

STATE ISLAMIC UNIVERSITY  
SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA



Adhityo Dwi Prayitno  
22106020039

## **SURAT PEMBIMBINGAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR**

Hal : Pembimbingan Skripsi

Lamp : -

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan  
Teknologi UIN Sunan Kalijaga  
Yogyakarta  
Di Yogyakarta

*Assalamu'alaikum wr. Wb*

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara :

Nama : Adhitiyo Dwi Prayitno  
NIM : 22106020039  
Judul Skripsi : Evaluasi Parameter *Quality Control* Terpilih pada Sistem  
PET/CT GE Discovery IQ Gen 2 Ring 5

Maka selaku pembimbing menyatakan bahwa proses pembimbingan skripsi telah dilaksanakan dan skripsi tersebut telah memenuhi syarat untuk diajukan kepada Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Strata Satu (S1) dalam bidang Fisika.

Demikian surat keterangan pembimbingan skripsi ini dibuat untuk dapat dipergunakan sebagaimana mestinya. Atas perhatian dan kerja samanya kami ucapkan terima kasih.

*Wassalamu'alaikum wr.wb*

Yogyakarta, 17 Mei 2026

Pembimbing I

Pembimbing II



Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D  
NIP.198306142009012009

M. Dlorifun Naqiyun, M.Si.

## SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan Skripsi

Lamp : -

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan  
Teknologi UIN Sunan Kalijaga

Yogyakarta

Di Yogyakarta

*Assalamu'alaikum wr. Wb*

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara :

Nama : Adhitiyo Dwi Prayitno

NIM : 22106020039

Judul Skripsi : Evaluasi Parameter *Quality Control* Terpilih pada Sistem  
PET/CT GE Discovery IQ Gen 2 Ring 5

Sudah dapat diujikan kembali kepada Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam bidang Fisika.

Dengan ini kami mengharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqasyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

*Wassalamu'alaikum wr.wb.*

Yogyakarta, 17 Mei 2026

Pembimbing I

Pembimbing II



Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D  
NIP.198306142009012009

M. Dlorifun Naqiyyun, M.Si.

**HALAMAN MOTTO**

*“Pressure is Privilage”*

“Tekanan adalah sebuah hak istimewa”

**-dr. Gia Pratama-**



## **HALAMAN PERSEMBAHAN**

### **Karya ini penulis persembahkan untuk :**

1. Ayah yang selalu ada di dalam hati saya dan selalu mengusahakan untuk saya semasa hidupnya, berkat impian beliau saya bisa ada berada pada titik ini.
2. Ibu yang selalu memberikan beribu ribu kasih sayang kepada saya yang tak tehitung jumlahnya yang tak akan bisa saya balas sepenuhnya.
3. Kakak yang telah membantu saya secara finansial semasa kuliah.
4. Semua aspek yang terlibat dalam pembuatan skripsi ini



## KATA PENGANTAR

*Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh*

*Alhamdulillah*, puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhānahu wa Ta'ālā atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penelitian tugas akhir/skripsi berjudul “Evaluasi Parameter *Quality Control* Terpilih pada Sistem PET/CT GE Discovery IQ Gen 2 Ring 5” dapat diselesaikan.

Skripsi ini disusun sebagai dasar pelaksanaan penelitian dan diharapkan bermanfaat bagi pengembangan ilmu serta peningkatan kualitas pelayanan di bidang kedokteran nuklir. Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, dan arahan dalam penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna, sehingga saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat sebagaimana tujuan yang diharapkan. Bapak dan Ibu selaku orang tua yang telah memberikan berbagai dukungan dalam bentuk materi maupun doa. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Noorhaidi, S.Ag., M.Phil., Ph.D., selaku Rektor UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
2. Ibu Dr. Hj. Khurul Wardati, M.Si., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
3. Ibu Dr. Widayanti, S.Si., M.Si., selaku Kepala Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
4. Ibu Anis Yuniati S.Si, M.Si, Ph.D., selaku Dosen Pembimbing Akademik sekaligus Dosen Pembimbing dalam penulisan laporan ini, yang telah memberikan bimbingan, nasehat, dan motivasi kepada penulis.
5. Bapak M. Dlorifun Naqiyyun, M.Si., selaku Dosen Pembimbing Lapangan yang telah memberikan bimbingan, nasehat, dan motivasi kepada penulis.
6. Umar Fadhil Assadullah selaku rekan Penelitian Tugas Akhir, yang

telah membantu pada saat penelitian dilaksanakan.

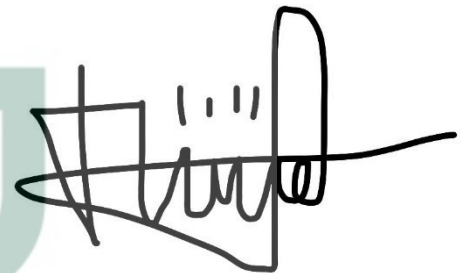
7. Semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam bentuk apapun yang tidak bisa disebutkan satu-persatu.

Selain ucapan terima kasih, penulis juga memohon maaf apabila dalam penulisan skripsi ini terdapat banyak kekurangan dan kesalahan. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi penulis maupun pembaca. *Aamiin.*

*Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh*

Yogyakarta, Mei 2026

Penulis



STATE ISLAMIC UNIVERSITY  
SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA

Adhitiyo Dwi Prayitno

# EVALUASI PARAMETER *QUALITY CONTROL* TERPILIH PADA SISTEM PET/CT GE DISCOVERY IQ GEN 2 RING 5

Adhitiyo Dwi Prayitno  
22106020039

## INTISARI

Pelaksanaan program *Quality Control* (QC) merupakan tahapan krusial pada modalitas pencitraan hibrida *Positron Emission Tomography/Computed Tomography* (PET/CT) untuk memastikan pesawat beroperasi dengan tingkat presisi dan akurasi yang andal. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai uji parameter QC pada pesawat PET/CT, serta menganalisis kesesuaian nilai uji tersebut dengan ambang batas toleransi kelulusan uji berdasarkan standar pedoman yang berlaku seperti EFOMP (*European Federation of Organisations for Medical Physics*), IAEA (*International Atomic Energy Agency*), dan AAPM (*American Association of Physicists in Medicine*). Pengujian dalam penelitian ini dilakukan pada pesawat PET/CT GE Discovery IQ Gen 2 Ring 5 yang beroperasi di salah satu rumah sakit siloam yang berada di Jakarta. Parameter yang dievaluasi terdiri dari uji kualitas fungsional sistem PET yaitu pengujian *sensitifiy correction factor*, akurasi *cross-calibration*, dan akurasi *Standardized Uptake Value*, uji kualitas citra sistem CT berupa keseragaman HU, keseragaman *noise*, ketegaklurusan laser, resolusi spasial, dan ketebalan irisan, serta uji evaluasi registrasi PET dan CT. Nilai uji parameter QC pada penelitian ini secara keseluruhan menghasilkan persentase deviasi dan tingkat akurasi yang memenuhi kriteria nilai batas lolos uji, dengan rincian data: pola grafik *sensitifiy correction factor* tervalidasi wajar menurut pedoman IAEA *Human Health Series No.27*, deviasi akurasi *cross-calibration* sebesar 2,2% dan capaian nilai akurasi *Standardized Uptake Value* (SUV) sebesar 0,978 yang keduanya memenuhi batas toleransi *EFOMP'S Guideline Quality Controls in PET/CT and PET/MR*, deviasi keseragaman HU sebesar 1,028 HU dan 1,658 HU, keseragaman *noise* sebesar 0,160 HU dan 0,143 HU, serta deviasi ketebalan irisan sebesar 0,5 mm dan 1 mm yang seluruhnya memenuhi pedoman *EFOMP'S Guideline Quality Controls in PET/CT and PET/MR*, kemiringan ketegaklurusan laser sebesar 0,01 mm dan 0,04 mm memenuhi batas toleransi pedoman IAEA *Human Health Series No.19*, visibilitas resolusi spasial konsisten hingga skala 0,8 mm memenuhi batas toleransi IAEA *Human Health Series No.47*, serta deviasi maksimal evaluasi registrasi spasial PET dan CT sebesar 4,6 mm dan 4,4 mm yang memenuhi pedoman AAPM *Task Group 126*. Berdasarkan hasil perolehan nilai pengujian parameter QC tersebut, dapat disimpulkan bahwa pesawat PET/CT di rumah sakit tersebut berada dalam kategori sangat andal dan sepenuhnya layak digunakan untuk prosedur pelayanan pemeriksaan klinis diagnostik.

**Kata Kunci :** PET/CT, *Quality Control*, *Standardized Uptake Value*, CT Image Quality, Evaluasi registrasi PET dan CT.

## **EVALUATION OF SELECTED QUALITY CONTROL PARAMETERS ON THE GE DISCOVERY IQ GEN 2 RING 5 PET/CT SYSTEM**

**Adhityo Dwi Prayitno**  
**22106020039**

### **ABSTRACT**

*The implementation of a Quality Control (QC) program is a crucial stage in the Positron Emission Tomography/Computed Tomography (PET/CT) hybrid imaging modality to ensure that the system operates with a reliable level of precision and accuracy. This study aims to determine the QC parameter test values on a PET/CT scanner and analyze the compliance of these values with the acceptance tolerance thresholds based on applicable guidelines such as EFOMP (European Federation of Organisations for Medical Physics), IAEA (International Atomic Energy Agency), and AAPM (American Association of Physicists in Medicine). The testing in this study was performed on a GE Discovery IQ Gen 2 Ring 5 PET/CT scanner operating at a Siloam hospital in Jakarta. The evaluated parameters consisted of PET system functional quality tests (sensitivity correction factor, cross-calibration, and standardized uptake value accuracy), CT system image quality tests (HU uniformity, noise uniformity, laser perpendicularity, spatial resolution, and slice thickness, and PET/CT registration evaluation tests. Overall, the QC parameter test values in this study resulted in deviation percentages and accuracy levels that met the passing limit criteria, with the following detailed data: the sensitivity correction factor graph pattern was validated as normal according to the IAEA Human Health Series No. 27 guidelines, the cross-calibration deviation was 2.2% and the achieved Standardized Uptake Value (SUV) accuracy value was 0.978 which both met the EFOMP's Guideline Quality Controls in PET/CT and PET/MR tolerance limits, the HU uniformity deviations were 1.028 HU and 1.658 HU, the noise uniformities were 0.160 HU and 0.143 HU, and the slice thickness deviations were 0.5 mm and 1 mm which all met the EFOMP's Guideline Quality Controls in PET/CT and PET/MR guidelines, the laser orthogonality inclination of 0.01 mm and 0.04 mm met the tolerance limits of the IAEA Human Health Series No. 19 guidelines, the spatial resolution visibility was consistent up to a 0.8 mm scale meeting the tolerance limits of the IAEA Human Health Series No. 47, and the maximum deviations of the PET and CT spatial registration evaluation of 4.6 mm and 4.4 mm met the AAPM Task Group 126 guidelines. From the acquired results of these QC parameter test values, it can be concluded that the PET/CT scanner at the hospital falls into a highly reliable category and is fully eligible to be used for diagnostic clinical examination procedures.*

**Keywords:** *PET/CT, Quality Control, Standardized Uptake Value, CT image quality, PET and CT registration evaluation.*

## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PENGESAHAN.....</b>	<b>ii</b>
<b>SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....</b>	<b>iii</b>
<b>SURAT PEMBIMBINGAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR.....</b>	<b>iv</b>
<b>SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR.....</b>	<b>v</b>
<b>HALAMAN MOTTO .....</b>	<b>vi</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN .....</b>	<b>vii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>viii</b>
<b>INTISARI.....</b>	<b>x</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN.....</b>	<b>xviii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	11
1.3 Tujuan Penelitian.....	12
1.4 Batasan Penelitian.....	12
1.5 Manfaat Penelitian.....	13
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>14</b>
2.1 Studi Pustaka.....	14
2.2 Landasan Teori.....	24
2.2.1 Radiasi Pengion.....	24
2.2.2 Interaksi Radiasi Dengan Materi .....	24
2.2.3 <i>Positron Emission Tomography</i> (PET) .....	33
2.2.4 <i>Computed Tomography</i> (CT).....	44
2.2.5 <i>Quality Control</i> (QC) .....	51
2.2.6 <i>Sensitify Correction Factor</i> .....	58
2.2.7 <i>Akurasi Cross-Calibration</i> .....	61
2.2.8 <i>Akurasi SUV</i> .....	63
2.2.9 <i>CT image quality</i> .....	66

2.2.10	Evaluasi Registrasi PET dan CT.....	76
2.2.11	Peraturan Terkait QC PET/CT.....	78
2.2.12	Integrasi-interkoneksi Keilmuan Dalam Islam .....	84
<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>		<b>88</b>
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian .....	88
3.2	Alat dan Bahan .....	88
3.2.1	Alat Penelitian.....	88
3.2.2	Bahan Penelitian .....	88
3.3	Tahapan Penelitian .....	90
3.3.1	Studi Literatur .....	90
3.3.2	Penentuan Parameter <i>Quality Control</i> .....	91
3.3.3	Persiapan Alat.....	93
3.3.4	Pengujian Parameter <i>Quality Control</i> PET.....	94
3.3.5	Pengujian Parameter <i>Quality Control</i> CT.....	100
3.3.6	Pengujian Evaluasi Registrasi PET dan CT.....	109
3.3.7	Pengolahan Data <i>Quality Control</i> PET.....	111
3.3.8	Pengolahan Data <i>Quality Control</i> CT.....	114
3.3.9	Pengolahan Data Evaluasi Registrasi PET dan CT .....	118
3.3.10	Analisis Data <i>Quality Control</i> PET.....	119
3.3.11	Analisis Data <i>Quality Control</i> CT.....	121
3.3.12	Analisis Data Evaluasi dan Registrasi PET dan CT.....	124
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>125</b>
4.1	Hasil dan Pembahasan Pengujian Parameter <i>Quality Control</i> PET .....	125
4.1.1	Hasil dan Pembahasan Pengujian Parameter QC <i>Sensitivity Correction Factor</i> .....	125
4.1.2	Hasil dan Pembahasan Pengujian Parameter QC Akurasi <i>Cross-Calibration</i> .....	125
4.1.3	Hasil dan Pembahasan Pengujian Parameter QC Akurasi SUV.....	129
4.2	Hasil dan Pembahasan Pengujian Parameter <i>Quality Control</i> CT .....	135
4.2.1	Hasil dan Pembahasan Pengujian QC Keseragaman HU CT.....	137
4.2.2	Hasil dan Pembahasan Pengujian QC Keseragaman Noise CT .....	140

4.2.3	Hasil dan Pembahasan Pengujian QC Ketegaklurusan Laser CT .....	144
4.2.4	Hasil dan Pembahasan Pengujian QC Resolusi Spasial CT .....	147
4.2.5	Hasil dan Pembahasan Pengujian QC Ketebalan Irisan CT .....	151
4.3	Hasil dan Pembahasan Evaluasi Registrasi PET dan CT.....	154
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>159</b>
5.3	Kesimpulan.....	159
5.2	Saran .....	160
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>		<b>162</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>		<b>165</b>



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Tinjauan Pustaka.....	22
<b>Tabel 2.2</b> Alat Dan Kriteria Uji Untuk Pengujian Penerimaan Dan QC Pemindai PET/CT .....	81
<b>Tabel 2.3</b> Alat Dan Kriteria Uji Untuk Pengujian Penerimaan Dan QC Pemindai CT .....	81
<b>Tabel 3.1</b> Alat Penelitian QC PET/CT .....	88
<b>Tabel 4.1</b> Data Hasil Pengujian akurasi <i>cross-calibration</i> dan akurasi SUV.....	129
<b>Tabel 4.2</b> Data hasil pengujian keseragaman HU variasi <i>slice thickness</i> 5 mm.	137
<b>Tabel 4.3</b> Data hasil pengujian keseragaman HU variasi <i>slice thickness</i> 2,5 mm .....	137
<b>Tabel 4.4</b> Data hasil pengujian keseragaman <i>noise</i> variasi <i>slice thickness</i> 5 mm .....	140
<b>Tabel 4.5</b> Data hasil pengujian keseragaman <i>noise</i> variasi <i>slice thickness</i> 2,5 mm .....	140
<b>Tabel 4.6</b> Data hasil pengujian ketegaklurusan laser .....	143
<b>Tabel 4.7</b> Data hasil pengujian resolusi spasial variasi <i>slice thickness</i> 5 mm....	146
<b>Tabel 4.8</b> Data hasil pengujian resolusi spasial variasi <i>slice thickness</i> 2,5 mm.	146
<b>Tabel 4.9</b> Data hasil pengujian ketebalan irisan .....	151
<b>Tabel 4.10</b> Data hasil pengujian Evaluasi Registrasi PET dan CT <i>slice thickness</i> 3.75 mm.....	154
<b>Tabel 4.11</b> Data hasil pengujian Evaluasi Registrasi PET dan CT <i>slice thickness</i> 5 mm .....	154

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Interaksi partikel bermuatan dengan materi .....	26
<b>Gambar 2.2</b> Proses terjadinya peluruhan gamma.....	28
<b>Gambar 2.3</b> Sinar-X <i>Bremsstrahlung</i> dan sinar-X karakteristik.....	29
<b>Gambar 2.4</b> Proses terjadinya a. efek Fotolistrik, b. Hamburan Compton dan c. Produksi Pasangan.....	31
<b>Gambar 2.5</b> Sistem kamera gamma tipikal.....	37
<b>Gambar 2.6</b> <i>Phantom</i> pengujian <i>sensitify correction factor</i> .....	61
<b>Gambar 2.7</b> <i>General Electric Standard QC Phantom</i> .....	66
<b>Gambar 2.8</b> Analisis <i>phantom</i> air silindris seragam sebagai bagian dari prosedur QC CT harian .....	70
<b>Gambar 2.9</b> Citra CT dari <i>phantom</i> jaminan kualitas untuk pengukuran resolusi spasial, ketegaklurusan laser dan ketebalan irisan .....	75
<b>Gambar 2.10</b> Hasil citra fusi registrasi spasial PET dan CT .....	77
<b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir Penelitian.....	89
<b>Gambar 3.2</b> Diagram alir pengujian parameter QC PET <i>sensitify correction factor</i> .....	95
<b>Gambar 3.3</b> Diagram alir pengujian parameter QC PET akurasi <i>cross-calibration</i> .....	97
<b>Gambar 3.4</b> Diagram alir pengujian parameter QC PET akurasi SUV.....	99
<b>Gambar 3.5</b> Diagram alir pengujian parameter QC CT keseragaman HU dan keseragaman <i>noise</i> .....	102
<b>Gambar 3.6</b> Diagram alir pengujian parameter QC CT ketegaklurusan laser ...	105
<b>Gambar 3.7</b> Diagram alir pengujian parameter QC CT resolusi spasial .....	106
<b>Gambar 3.8</b> Diagram alir pengujian parameter QC CT ketebalan irisan .....	109
<b>Gambar 3.9</b> Diagram alir pengujian evaluasi registrasi PET dan CT .....	110
<b>Gambar 4.1</b> Citra penampang melintang dari akuisisi <i>phantom</i> Ge-68 Annulus .....	125
<b>Gambar 4.2</b> Grafik <i>Sensitify</i> dan <i>Activity Correction Factor</i> .....	125
<b>Gambar 4.3</b> Citra hasil rekonstruksi modul <i>uniformity</i> pada GE CT <i>Phantom</i> variasi <i>slice thickness</i> 5 mm .....	135

<b>Gambar 4.4</b> Citra hasil rekonstruksi modul <i>uniformity</i> pada GE CT Phantom variasi <i>slice thickness</i> 2,5 mm .....	135
<b>Gambar 4.5</b> Citra hasil rekonstruksi modul <i>wire ramp</i> pada GE CT Phantom variasi <i>slice thickness</i> 5 mm .....	136
<b>Gambar 4.6</b> Citra hasil rekonstruksi modul <i>wire ramp</i> pada GE CT Phantom variasi <i>slice thickness</i> 2,5 mm .....	136
<b>Gambar 4.7</b> Grafik hubungan antara <i>bar pattern scale</i> dengan nilai standar deviasi untuk variasi <i>slice thickness</i> 5 mm.....	147
<b>Gambar 4.8</b> Grafik hubungan antara <i>bar pattern scale</i> dengan nilai standar deviasi untuk variasi <i>slice thickness</i> 2,5 mm.....	147

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 : Dokumentasi Teknis Penelitian .....	164
Lampiran 2 : Data Mentah dan Pengolahan Hasil Citra .....	169
Lampiran 3 : Pengolahan Data .....	177
Lampiran 4 : Dokumentasi Alat Penelitian .....	181



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Radiasi pengion merupakan fenomena fisika yang sangat penting dalam ilmu kedokteran nuklir karena menjadi dasar dari berbagai aplikasi pencitraan dan terapi. Secara definitif, radiasi pengion adalah radiasi yang membawa energi yang cukup untuk melepaskan elektron dari orbit atom atau molekul, sehingga menciptakan pasangan ion (atom bermuatan positif dan elektron bebas). Proses ionisasi ini yang memungkinkan deteksi radiasi dan pada saat yang sama dapat menyebabkan perubahan biologis dalam jaringan (Harrison, 2020). Radiasi ini dihasilkan oleh inti atom yang tidak stabil melalui proses peluruhan radioaktif. Inti yang tidak stabil tersebut akan berusaha mencapai kestabilan dengan memancarkan energi dalam bentuk partikel alfa, beta, maupun foton gamma. Karakteristik radiasi pengion adalah kemampuannya untuk melepaskan elektron dari atom atau molekul yang dilaluinya, sehingga dapat menimbulkan ionisasi (Douglass, 2018).

Fenomena peluruhan radioaktif memiliki berbagai bentuk dan mekanisme yang berbeda. Pada peluruhan alfa, inti atom memancarkan dua proton dan dua neutron sehingga menghasilkan partikel bermuatan positif dengan jangkauan sangat pendek, namun kemampuan ionisasinya tinggi. Peluruhan beta menghasilkan elektron atau positron, yang berinteraksi lebih jauh dengan jaringan tubuh. Sedangkan peluruhan gamma menghasilkan foton berenergi tinggi yang mampu menembus jaringan tubuh manusia (Knoll, 2009).

Interaksi radiasi pengion dengan materi sangat menentukan keberhasilan aplikasi medisnya. Dalam jaringan tubuh, radiasi dapat berinteraksi melalui efek fotoelektrik, hamburan Compton, maupun produksi pasangan, yang masing-masing dipengaruhi oleh energi radiasi dan nomor atom penyusun jaringan. Efek fotoelektrik dominan pada energi rendah, yaitu ketika foton diserap sepenuhnya dan energinya digunakan untuk melepaskan elektron. Hamburan Compton terjadi pada rentang energi menengah yang relevan untuk pencitraan diagnostik, ketika foton menyerahkan sebagian energinya kepada elektron dan terhambur ke arah lain. Produksi pasangan terjadi pada energi sangat tinggi (di atas 1.022 MeV), yang pada prosesnya energi foton diubah menjadi pasangan elektron-positron. Mekanisme interaksi inilah yang kemudian dimanfaatkan dalam teknik pencitraan medis seperti *Positron Emission Tomography* (PET), *Single Photon Emission Computed Tomography* (SPECT), maupun *Computed Tomography* (CT), kemudian radiasi yang keluar dari tubuh pasien ditangkap oleh detektor untuk direkonstruksi menjadi citra diagnostik (IAEA, 2009).

Secara spesifik, PET dan CT menggunakan jenis radiasi yang berbeda untuk menghasilkan informasi komplementer. CT menggunakan sumber radiasi eksternal, yaitu sinar-X, yang dilewatkan melalui tubuh pasien untuk memetakan perbedaan atenuasi (pelemahan) antar jaringan, sehingga menghasilkan citra anatomi dengan resolusi spasial tinggi. Di sisi lain, PET menggunakan sumber radiasi internal yang memancarkan sinar gamma. PET merupakan modalitas pencitraan fungsional yang memanfaatkan radioisotop pemancar positron, seperti Fluorine-18 (F-18), untuk memvisualisasikan proses metabolisme di dalam tubuh.

Setelah disuntikkan ke pasien dalam bentuk *radiotracer* misalnya F-18 FDG (*Fluorodeoxyglucose*), radionuklida akan mengalami peluruhan beta-plus ( $\beta^+$ ) yang menghasilkan positron. Positron ini akan bertemu dengan elektron di sekitarnya dan mengalami anihilasi, menghasilkan dua foton gamma dengan energi 511 keV yang dipancarkan berlawanan arah. Detektor PET menangkap pasangan foton gamma ini untuk merekonstruksi citra fungsional yang memvisualisasikan proses metabolisme di dalam tubuh. CT berfungsi melengkapi PET dengan menyediakan informasi anatomi resolusi tinggi menggunakan sinar-X. Melalui rotasi tabung sinar-X dan detektor di sekitar tubuh pasien, CT mampu menghasilkan potongan citra melintang yang kemudian dapat direkonstruksi menjadi gambaran tiga dimensi. Integrasi PET dan CT dalam satu sistem memberikan keuntungan besar, yaitu kombinasi antara informasi fungsional dan anatomi dalam satu kali pemeriksaan. Dengan demikian, PET/CT dapat meningkatkan akurasi diagnostik secara signifikan. Untuk menjamin bahwa integrasi kedua modalitas pencitraan yang kompleks tersebut berfungsi dengan optimal dan aman bagi pasien, diperlukan standar jaminan mutu yang diatur oleh lembaga internasional.

*International Atomic Energy Agency (IAEA)* memberikan panduan komprehensif yang bertujuan untuk membantu negara-negara lain dalam membangun dan mempertahankan program kedokteran nuklir berkualitas tinggi. melalui publikasi seperti *IAEA Human Health Series*, agensi ini menetapkan kerangka kerja untuk penjaminan mutu (*Quality Assurance*) yang mencakup semua aspek, mulai dari pemilihan peralatan hingga prosedur klinis. Untuk PET/CT,

pedoman IAEA menekankan pentingnya pelaksanaan *acceptance testing* untuk verifikasi spesifikasi pabrikan, *commissioning* untuk menetapkan *baseline* kinerja, dan *Quality Control* (QC) rutin (harian, mingguan, bulanan, tahunan) untuk memantau stabilitas sistem. Protokol ini mencakup pengujian parameter kunci seperti kalibrasi *well counter* dan *dose calibrator*, uniformitas, resolusi spasial, sensitivitas sistem, dan akurasi koreksi atenuasi dan hamburan. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa citra yang dihasilkan akurat secara kuantitatif dan dosis radiasi yang diterima pasien serendah mungkin sesuai prinsip ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*). Selain kerangka kerja global dari IAEA tersebut, harmonisasi protokol teknis yang lebih spesifik mengenai ambang batas kelulusan pengujian juga dikembangkan oleh organisasi keprofesian di tingkat Eropa.

*European Federation of Organisations for Medical Physics* (EFOMP) secara spesifik berfokus pada harmonisasi dan standarisasi protokol pengujian kinerja (*performance testing*) serta program *Quality Control* (QC) untuk peralatan radiologi dan kedokteran nuklir, termasuk PET/CT. Inisiatif utama mereka tertuang dalam publikasi pedoman teknis QC yang dirancang untuk mengurangi variabilitas metode evaluasi antar institusi kesehatan, yang sangat krusial untuk menjamin keandalan diagnostik, akurasi kuantifikasi, dan keselamatan pasien. Protokol EFOMP menetapkan spesifikasi yang ketat terkait tata cara akuisisi data pengujian beserta penetapan ambang batas toleransi (*acceptance/tolerance limits*) untuk masing-masing parameter kualitas citra maupun kinerja fungsional. Meskipun dalam penelitian ini evaluasi fungsional sistem PET difokuskan pada pemanfaatan *flood phantom* yang diinjeksi radioisotop  $^{18}\text{F}$ , prinsip-prinsip evaluasi kuantitatif

dan kriteria kelulusan uji yang direkomendasikan oleh EFOMP tetap menjadi landasan konseptual utama dalam pemilihan parameter *Quality Control* yang dianalisis. Pedoman keprofesian EFOMP terus diperbarui secara berkala guna mengakomodasi evaluasi teknis pada perkembangan modalitas pencitraan terkini, termasuk pada operasional sistem PET/CT modern. Melengkapi standar dari Eropa tersebut, pedoman komprehensif yang menjabarkan metodologi pengukuran fisika medis secara lebih mendetail turut diterbitkan oleh asosiasi keprofesian di Amerika.

*American Association of Physicists in Medicine* (AAPM) melalui berbagai publikasi laporan *Task Group* (TG), turut memegang peran esensial dalam menyediakan pedoman teknis jaminan mutu (QA) dan *Quality Control* (QC) yang sangat komprehensif untuk sistem hibrida PET/CT. Pendekatan AAPM lebih menitikberatkan pada penjabaran metodologi pengukuran fisika medis yang mendetail, mencakup tata cara evaluasi kinerja pada komponen PET dan CT secara independen, hingga keakuratan fusi registrasi spasial di antara keduanya.

Kombinasi teknologi canggih dalam PET/CT menjadikan prosedur QC sangat penting untuk menjamin mutu hasil pemeriksaan. QC dilakukan untuk memverifikasi bahwa sistem bekerja sesuai standar pabrikan dan pedoman internasional, sehingga hasil pemeriksaan konsisten, akurat, dan aman. Tanpa QC yang baik, nilai SUV pada PET dapat bervariasi antar pusat pelayanan, dan citra CT dapat mengalami penurunan kualitas yang berpengaruh langsung pada keputusan klinis. Untuk mengatasi tantangan ini, berbagai organisasi internasional IAEA, AAPM dan EFOMP telah mengembangkan pedoman QC yang komprehensif.

Pelaksanaan *Quality Control* (QC) pada sistem PET/CT merupakan langkah fundamental untuk memastikan integritas kinerja sistem serta keandalan hasil diagnostik yang dihasilkan. Dalam berbagai parameter pengujian yang tersedia, penelitian ini difokuskan pada empat aspek utama yang memiliki pengaruh signifikan terhadap akurasi kuantitatif dan kualitas diagnostik PET/CT, yaitu *sensitify correction factor*, akurasi *cross-calibration*, akurasi *standardized uptake value* (SUV), kualitas citra CT (*CT image quality*), dan evaluasi registrasi PET dan CT. Kelima parameter tersebut saling melengkapi dalam menjamin bahwa sistem PET/CT beroperasi secara optimal dan konsisten sesuai dengan standar internasional yang ditetapkan oleh IAEA, EFOMP dan AAPM. Pentingnya menjaga konsistensi dan ketelitian dalam pengukuran ini sejalan dengan prinsip keteraturan dan kesempurnaan dalam penciptaan, sebagaimana difirmankan dalam QS. Al-Mulk (67): 3–4.

الَّذِي خَلَقَ سَبْعَ سَمَاوَاتٍ طِبَاقًا مَّا تَرَى فِي خَلْقِ الرَّحْمَنِ مِنْ تَفْوُتٍ فَارْجِعِ الْبَصَرَ هَلْ تَرَى مِنْ فُطُورٍ ثُمَّ ارْجِعِ الْبَصَرَ كَرَّتَيْنِ يَنْقَلِبْ إِلَيْكَ الْبَصَرُ خَاسِئًا وَهُوَ حَسِيرٌ

Artinya : “(Dia juga) yang menciptakan tujuh langit berlapis-lapis. Kamu tidak akan melihat pada ciptaan Tuhan Yang Maha Pengasih ketidakseimbangan sedikit pun. Maka, lihatlah sekali lagi! Adakah kamu melihat suatu cela? Kemudian, lihatlah sekali lagi (dan) sekali lagi (untuk mencari cela dalam ciptaan Allah), niscaya pandanganmu akan kembali kepadamu dengan kecewa dan dalam keadaan letih (karena tidak menemukannya). ”

Ayat ini menjelaskan bahwa Allah menciptakan langit secara berlapis-lapis dengan struktur yang sempurna dan tanpa ketidakteraturan. Dalam *Tafsir Al-Mishbah*, M. Quraish Shihab menafsirkan bahwa ayat ini mengandung dorongan bagi manusia untuk mengamati dan menelaah ciptaan Allah secara berulang-ulang guna menemukan keteraturan, kesempurnaan, dan konsistensi hukum-hukum yang

berlaku di alam semesta. Proses pengamatan yang berulang tersebut menegaskan bahwa tidak terdapat cacat atau ketidakseimbangan dalam sistem yang diciptakan, melainkan seluruhnya tersusun dengan presisi yang tinggi dan tunduk pada hukum yang tetap (Shihab, 2002).

Sejalan dengan tafsir tersebut, prinsip pengamatan berulang dan verifikasi terhadap kesempurnaan sistem dapat dihubungkan dengan praktik *Quality Control* (QC) dalam teknologi pencitraan medis, khususnya pada sistem PET/CT. Dalam konteks ini, QC dilakukan secara berkala untuk memastikan bahwa setiap komponen sistem berfungsi secara konsisten, akurat, dan bebas dari penyimpangan yang dapat memengaruhi hasil diagnostik. Dengan demikian, upaya pengujian seperti *sensitifity correction factor*, akurasi *cross-calibration*, akurasi SUV, kualitas citra CT, dan evaluasi registrasi PET dan CT merupakan bentuk implementasi prinsip ketelitian dan verifikasi berulang sebagaimana yang tersirat dalam ayat tersebut, sehingga sistem yang digunakan benar-benar memenuhi standar keandalan dalam mendukung diagnosis medis.

Pada sistem PET/CT, akurasi dan keseragaman citra sangat dipengaruhi oleh performa masing-masing detektor. Dalam praktiknya, setiap kristal detektor memiliki efisiensi yang berbeda sehingga dapat menimbulkan variasi sensitivitas antar kanal dan menyebabkan ketidakseragaman distribusi sinyal pada citra. Oleh karena itu, dilakukan proses normalisasi, yaitu prosedur kalibrasi yang bertujuan untuk mengoreksi perbedaan efisiensi antar detektor. Proses ini menghasilkan *sensitifity correction factor* yang diterapkan pada data akuisisi untuk menormalkan respons detektor terhadap foton yang datang dari berbagai sudut dan lintasan.

Akurasi *Cross-Calibration* merupakan pengujian kalibrasi absolut pada sistem PET/CT yang bertujuan untuk menetapkan hubungan antara nilai piksel citra yang dihasilkan detektor dengan konsentrasi aktivitas radiofarmaka dalam satuan fisik (Bq/ml). Prosedur ini dilakukan menggunakan *phantom* berisi air dan radioisotop dengan aktivitas yang telah diketahui secara akurat. Sistem PET pada dasarnya merekam hitungan per detik (*counts per second*) yang mencerminkan sensitivitas detektor, namun nilai tersebut belum merepresentasikan besaran fisik absolut. Oleh karena itu, melalui akurasi *cross-calibration* dihitung suatu faktor konsentrasi aktivitas (*activity concentration factor*) yang digunakan untuk mengonversi sensitivitas (*counts*) menjadi konsentrasi aktivitas (Bq/ml). Dengan demikian, proses ini memastikan bahwa setiap nilai piksel citra memiliki makna kuantitatif yang sesuai dengan aktivitas radioaktif sebenarnya, yang selanjutnya sangat penting dalam perhitungan parameter kuantitatif seperti *Standard Uptake Value* (SUV)

SUV merupakan parameter kuantitatif yang paling banyak digunakan dalam pemeriksaan PET/CT untuk menggambarkan tingkat penyerapan *radiotracer* di jaringan tubuh. Dalam praktik klinis, metrik kuantitatif utama yang dihasilkan dari pemindaian PET adalah SUV. SUV menormalisasi konsentrasi radioaktivitas yang terukur di suatu wilayah (misalnya, tumor) terhadap dosis yang disuntikkan dan berat badan pasien, sehingga memberikan indeks semi-kuantitatif dari aktivitas metabolisme. Nilai ini sangat fundamental dalam diagnosis, penentuan stadium penyakit, dan evaluasi respons terhadap terapi, terutama dalam bidang onkologi. Namun, keandalan SUV sangat rentan terhadap berbagai faktor teknis dan biologis.

Variasi dalam kalibrasi pemindai, parameter rekonstruksi citra, waktu akuisisi pasca-injeksi, dan metode koreksi dapat menyebabkan variabilitas yang signifikan dalam pengukuran SUV. Program penjaminan mutu yang ketat dan upaya harmonisasi menjadi sangat penting untuk memastikan bahwa nilai SUV yang dihasilkan akurat, dapat direproduksi, dan dapat dibandingkan antar pusat layanan kesehatan maupun dalam pemantauan longitudinal pada pasien yang sama (Akamatsu dkk, 2023).

Pemindaian PET/CT menggabungkan data fungsional metabolik dari PET dengan pemetaan anatomis resolusi tinggi dari CT ke dalam satu kesatuan citra. Ketidakakuratan penyelarasan spasial (*misalignment*) antar kedua sistem dapat mengakibatkan kesalahan lokalisasi anatomi dari lesi atau tumor, yang berisiko fatal terhadap presisi diagnosis dan perencanaan terapi pasien. Lebih dari itu, karena data CT digunakan sebagai landasan peta transmisi untuk proses koreksi atenuasi citra PET, pergeseran spasial sekecil apa pun dapat memicu kemunculan artefak dan secara langsung mendistorsi akurasi kuantifikasi nilai SUV, terutama pada area batas jaringan dengan perbedaan densitas yang mencolok (seperti area paru-paru dan dinding dada). Berdasarkan hal tersebut maka diperlukan pengujian evaluasi registrasi PET dan CT yang merupakan tahap esensial untuk memvalidasi bahwa penyimpangan pergeseran sumbu koordinat spasial antara gantri PET dan CT tetap presisi dan berada di dalam ambang batas toleransi klinis yang diizinkan.

Selanjutnya, parameter kualitas citra CT dievaluasi untuk memastikan bahwa komponen CT pada sistem PET/CT memberikan citra anatomi dengan ketajaman, kontras, dan akurasi geometrik yang optimal. Citra CT tidak hanya

berfungsi untuk evaluasi anatomis, tetapi juga untuk koreksi atenuasi pada data PET sehingga degradasi kualitas citra CT akan langsung memengaruhi hasil kuantitatif PET. Pengujian kualitas citra CT mencakup evaluasi keseragaman *Hounsfield Unit* (HU), keseragaman *noise*, ketegaklurusan laser, resolusi spasial dan ketebalan irisan menggunakan GE CT *Phantom* dan juga diperlukan pengujian evaluasi registrasi PET dan CT. Setiap parameter memiliki batas toleransi tertentu sesuai pedoman IAEA, EFOMP, dan AAPM.

Sejumlah penelitian sebelumnya telah membahas pentingnya QC dalam sistem PET/CT, baik dalam bentuk pedoman, studi konseptual, maupun evaluasi terbatas. Koole dkk. (2023) menyusun pedoman QC rutin berbasis standar internasional yang menekankan evaluasi uniformitas dan akurasi SUV menggunakan *phantom* homogen, namun penelitian tersebut bersifat konseptual dan tidak berfokus pada evaluasi empiris langsung pada satu sistem tertentu seperti pada penelitian yaitu sistem PET/CT GE *Discovery IQ Gen 2 Ring 5*.

Penelitian lain oleh Reynés-Llompert dkk. (2022) mengidentifikasi adanya variasi signifikan dalam implementasi QC di berbagai fasilitas PET/CT di Eropa melalui pendekatan survei, namun tidak melakukan pengujian eksperimental langsung seperti penelitian yang akan dilakukan terhadap performa sistem. Sementara itu, McDougald dan Mannheim (2022) menegaskan pentingnya normalisasi dan penggunaan *phantom* dalam menjaga stabilitas SUV, tetapi kajiannya bersifat konseptual tanpa verifikasi kuantitatif berbasis data aktual. Di sisi lain, Anam dkk. (2023) berfokus pada evaluasi kualitas citra CT melalui pengujian linearitas nilai *Hounsfield Unit* (HU) menggunakan *phantom* Catphan,

namun penelitian tersebut terbatas pada aspek CT dan tidak mencakup integrasi dengan sistem PET secara keseluruhan .

Berdasarkan tinjauan tersebut, dapat diidentifikasi bahwa sebagian besar penelitian masih bersifat konseptual, berbasis survei, atau hanya berfokus pada parameter tertentu secara terpisah. Oleh karena itu, terdapat kebutuhan untuk melakukan evaluasi QC secara komprehensif dan empiris pada satu sistem PET/CT dengan mengintegrasikan beberapa parameter utama secara simultan. Penelitian ini berupaya mengisi celah tersebut dengan melakukan analisis langsung terhadap performa sistem PET/CT melalui parameter *sensitivity correction factor*, akurasi *cross-calibration*, akurasi SUV, kualitas citra CT, dan evaluasi registrasi PET dan CT sehingga diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai kondisi operasional sistem dalam praktik klinis.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah,

1. Bagaimana kualitas sistem PET berdasarkan uji *Quality Control* (QC) dengan data parameter *sensitivity correction factor*, akurasi *cross-calibration* dan akurasi SUV pada Modalitas PET/CT GE Discovery IQ Gen 2 Ring 5?
2. Bagaimana kualitas sistem CT berdasarkan uji *Quality Control* (QC) berupa data kualitas citra CT (*CT image quality*) pada Modalitas PET/CT GE Discovery IQ Gen 2 Ring 5?
3. Bagaimana kualitas hasil fusi pencitraan PET/CT terhadap keselarasan spasial antara citra fungsional PET dan citra anatomis CT dalam pada uji *Quality*

*Control* PET/CT evaluasi registrasi PET dan CT pada Modalitas PET/CT GE Discovery IQ Gen 2 Ring 5?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah maka tujuan dari penelitian ini adalah.

1. Mengevaluasi kualitas sistem PET berdasarkan uji *Quality Control* (QC) dengan data parameter *sensitify correction factor*, akurasi *cross-calibration* dan Akurasi SUV pada Modalitas PET/CT GE Discovery IQ Gen 2 Ring 5.
2. Mengevaluasi kualitas sistem CT berdasarkan uji *Quality Control* (QC) berupa data kualitas citra CT (*CT image quality*) pada Modalitas PET/CT GE Discovery IQ Gen 2 Ring 5.
3. Mengevaluasi kualitas hasil fusi pencitraan PET/CT terhadap keselarasan spasial antara citra fungsional PET dan citra anatomis CT pada uji *Quality Control* evaluasi registrasi PET dan CT pada Modalitas PET/CT GE Discovery IQ Gen 2 Ring 5.

### 1.4 Batasan Penelitian

Penelitian ini dibatasi oleh beberapa hal yaitu.

1. Penelitian hanya dilakukan pada satu unit modalitas PET/CT
2. Parameter yang diuji terbatas pada QC sistem PET berupa *sensitify correction factor*, akurasi *cross-calibration*, akurasi SUV, QC sistem CT berupa *CT image quality* dan evaluasi registrasi PET dan CT.
3. Penelitian menggunakan Ge-68 PET *Cylinder Phantoms* untuk *sensitify correction factor* dan *Flood Phantom* berisi radioisotop  $^{18}\text{F}$  untuk akurasi *cross-calibration* dan akurasi SUV, GE CT *Phantom* untuk uji *CT image quality*.

4. Analisis data dibatasi hanya sampai pada proses verifikasi apakah performa modalitas PET/CT telah memenuhi standar *Quality Control* yang ditetapkan oleh lembaga internasional seperti IAEA, AAPM dan EFOMP.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat diantaranya.

1. Menambah pemahaman mengenai proses QC PET, CT, dan aspek keselamatan radiasi sesuai dengan standar teknis internasional.
2. Memberikan analisis aspek fisika kedokteran terkait akurasi kuantifikasi, kualitas citra, dan penerapan prinsip ALARA pada pemeriksaan PET/CT.
3. Menambah pengalaman praktis dalam pelaksanaan uji *Quality Control* perangkat kedokteran nuklir di fasilitas klinis.
4. Melatih kemampuan analisis dan pemecahan masalah dalam menjaga konsistensi performa sistem PET/CT.
5. Memberikan kontribusi bagi peningkatan mutu pelayanan di bidang kedokteran nuklir serta sebagai acuan dalam standarisasi QC PET/CT di Indonesia.
6. Memberikan informasi objektif dan data teknis bagi instansi rumah sakit selaku pemilik pesawat PET/CT mengenai status kelayakan operasional alat, sebagai dasar evaluasi pemeliharaan preventif (*preventive maintenance*), jaminan mutu diagnosis klinis pasien, serta pemenuhan kepatuhan terhadap regulasi yang berlaku.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.3 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisa data yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan diantaranya sebagai berikut:

1. Evaluasi fungsional QC sistem PET terkonfirmasi presisi dan lolos uji. Pola grafik *sensitifty correction factor* tervalidasi menurut pedoman IAEA *Human Health Series No. 27*. Nilai perbandingan dosis dari *dose calibrator* dengan dosis yang terbaca pada PET pada uji akurasi *cross-calibration* sebesar 97.8% dengan deviasi 2,2%. Nilai akurasi SUV diperoleh sebesar 0,978 (mendekati 1), sehingga pengujian QC akurasi *cross-calibration* dan akurasi SUV telah memenuhi batas toleransi pedoman EFOMP (2022). Secara keseluruhan, pemenuhan ketiga parameter ini bermakna bahwa sistem PET memiliki respons sensitivitas detektor yang seragam, kalibrasi pembacaan aktivitas yang tepat, serta kemampuan kuantifikasi serapan radiofarmaka yang sangat andal untuk mendukung penegakan diagnosis klinis.
2. Evaluasi kualitas sistem CT (*Image Quality*) pada variasi irisan 2,5 mm dan 5 mm tervalidasi menurut pedoman EFOMP dan IAEA. adapun hasil dari nilai keseragaman HU (deviasi 1,028 HU & 1,658 HU), keseragaman *noise* (0,160 HU & 0,143 HU), dan ketebalan irisan (deviasi 0,5 mm & 1 mm) seluruhnya tervalidasi memenuhi pedoman EFOMP. Sementara itu, parameter ketegaklurusan laser (kemiringan 0,01 mm & 0,04 mm) serta resolusi spasial (visibilitas konsisten hingga skala 0,8 mm) secara mutlak tervalidasi mematuhi

standar IAEA *Human Health Series No. 19* yang mengacu pada manual penggunaan pabrikan. Secara keseluruhan, pencapaian nilai deviasi yang rendah pada pengujian ini membuktikan bahwa pesawat CT mampu memberikan peta anatomi yang bebas distorsi volumetrik, tingkat noise citra yang sangat rendah, serta presisi lokalisasi lesi yang andal.

3. Pengujian evaluasi registrasi PET dan CT pada variasi irisan 3,75 mm dan 5 mm terkonfirmasi lolos uji. Dalam hal ini, hasil evaluasi registrasi PET dan CT pada posisi Anterior, Posterior, *Right*, dan *Left* (dengan nilai deviasi maksimal 4,6 mm dan 4,4 mm) seluruhnya tervalidasi memenuhi batas toleransi pedoman AAPM *Task Group 126* yaitu  $\leq 5$  mm. Secara keseluruhan, pencapaian ini membuktikan bahwa pengujian evaluasi registrasi PET dan CT masih berada dalam batas toleransi klinis yang aman, sehingga keakuratan penentuan lokasi lesi tetap terjamin.

## 5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, terdapat beberapa kekurangan yang masih perlu diperbaiki untuk pengembangan pada penelitian selanjutnya. Berikut beberapa catatan peneliti berkaitan dengan saran terhadap penelitian yang dapat dilakukan selanjutnya.

1. Penelitian selanjutnya diharapkan dapat menetapkan parameter pemindaian (*scan parameters*) secara mandiri dengan landasan teknis yang kuat, serta mengekspansi pengujian pada parameter Quality Control (QC) PET/CT lainnya guna memperoleh evaluasi performa sistem yang komprehensif..

2. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melengkapi pengujian *Quality Control* (QC) pada parameter yang belum diteliti guna memperoleh hasil evaluasi yang utuh, seperti pengujian *Count rate performance* dan kualitas citra (NEMA IQ) pada sistem PET, serta pengujian linearitas, *low contrast detail*, *detectability*, *X-ray beam width*, dan dosimetri pada sistem CT



## DAFTAR PUSTAKA

- American Association of Physicists in Medicine. 2019. *PET/CT Acceptance Testing and Quality Assurance The Report of AAPM Task Group 126*.
- American Association of Physicists in Medicine. 2019. *Performance Evaluation of Computed Tomography Systems The Report of AAPM Task Group 233*.
- Akamatsu, G., Tsutsui, Y., Daisaki, H., Mitsumoto, K., Baba, S., & Sasaki, M. 2023. *A review of harmonization strategies for quantitative PET*. (Annals of Nuclear Medicine), **Vol. 37 No. 2 2023** : 71–88. <https://doi.org/10.1007/s12149-022-01820>.
- Anam, C., Amilia, R., Naufal, A., & Dougherty. 2023. *Automatic Measurement of CT Number Linearity in Three Types of Catphan Phantoms*. (Jurnal Teknologi), **Vol. 85 No. 6 2023** : 155–160. <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v85.20340>.
- Anca Dragomir dan M Roomans, G. 2014. *X-Ray Microanalysis in the Scanning Electron Microscope*. (Electron Microscopy: Methods and Protocols, Methods in Molecular Biology), **Vol. 1117**. DOI 10.1007/978-1-62703-776-1\_28.
- Badan Pengawas Tenaga Nuklir. 2011, *Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 8 Tahun 2011*.
- Bailey, D. L., J.L Humm., A. Todd-Pokropek., A. van Aswegen. 2014. *Radiation oncology physics : a handbook for teachers and students*. International Atomic Energy Agency. IAEA Library Cataloguing in Publication Data.
- Bevins, N. 2018. *Considerations for the Use of Handheld Image Viewers The Report of AAPM Task Group 260 2018*.
- Boellaard, R., Delgado-Bolton, R., Oyen, W. J. G., Giammarile, F., Tatsch, K., Eschner, W., Verzijlbergen, F. J., Barrington, S. F., Pike, L. C., Weber, W. A., Stroobants, S., Delbeke, D., Donohoe, K. J., Holbrook, S., Graham, M. M., Testanera, G., Hoekstra, O. S., Zijlstra, J., Visser, E., ... Krause, B. J. 2015. *FDG PET/CT: EANM procedure guidelines for tumour imaging: version 2.0*. (European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging), **Vol. 42 No. 2 2015** : 328–354. <https://doi.org/10.1007/s00259-014-2961>.
- Bushberg, J. T., Seibert J. A., Leidhold JR, E. M., Boone. J. M. 2012. *The Essential Physics of Medical Imaging*. (Third, International edition). Wolters Kluwer Health.
- Cherry, S.R., Sorenson, J.A., Phelps, M.E. 2012. *Physics in Nuclear Medicine*. (Fourth Edition). Saunders Elsevier Inc.
- Conti, M. 2009. *State of the art and challenges of time-of-flight PET*. (Physica Medica), **Vol. 25 No 1 2009** : 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2008.10.001>.
- Daniel Gay'an Tisner. 2018/2019. *Diseno de un sistema PET basado en triple coincidencia aniquilaci'on positr'on-emisi'on gamma*. (Tugas Akhir). Universitas de Zaragoza.

- Douglass, M. 2018. *Eric J. Hall and Amato J. Giaccia: Radiobiology for the radiologist.* (Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine), **Vol 41 No.4 2018** : 1129–1130. <https://doi.org/10.1007/s13246-018-0684-1>
- European Federation of Organisations for Medical Physics. 2022. *EFOMP'S Guideline Quality Controls in PET/CT AND PET/MR.* (Version 02.03.2022).
- General Electric Company. 2021. *Discovery IQ<sup>TM</sup> Quick Reference Guide* (Revision 3). **Vol.5982250-1EN.**
- Glenn F. Knoll. 2009. *Radiation Detection and Measurement.* (third edition). John Wiley Sons, Inc.
- Hallab, R., Eddaoui, K., & Aouad, N. B. R. 2022. *The Quality Assurance for the PET/CT in Nuclear Medicine - Evaluation of the Daily Quality Control of The Positron Emission Tomography.* (Biomedical and Pharmacology Journal) Vol. 15 No.3 2022 : 1589–1595. <https://doi.org/10.13005/bpj/2497>
- International Atomic Energy Agency. 2009. *IAEA Human Health Series No.1 Quality Assurance for PET and PET/CT Systems.* ISSN 2075–3772 ; no. 1 IAEA Library Cataloguing in Publication Data.
- International Atomic Energy Agency. 2014. *IAEA Human Health Series No.27 PET/CT Atlas on Quality Control and Image Artefacts.* ISSN 2075–3772 ; no. 27. IAEA Library Cataloguing in Publication Data.
- International Atomic Energy Agency. 2023. *IAEA Human Health Series No.47 Handbook of Basic Quality Control Test for Diagnostic Radiology.* ISSN 2075–3772 ; no. 47. IAEA Library Cataloguing in Publication Data.
- International Commission on Radiological Protection. 2007. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.* ICRP Publication 103 .Elsevier
- International Commission on Radiological Protection. 2018. *Ethical Foundations of the system of radiological protection.* ICRP Publication 138 Ann. ICRP 47(1).
- Kinahan, P. E., dan Fletcher, J. W. 2010. *Positron emission tomography-computed tomography standardized uptake values in clinical practice and assessing response to therapy.* (Seminars in Ultrasound, CT and MRI), Vol. 31 No.6 2010 : 496–505. <https://doi.org/10.1053/j.sult.2010.10.001>.
- Koole, M., Armstrong, I., Krizsan, A. K., Stromvall, A., Visvikis, D., Sattler, B., Nekolla, S. G., & Dickson, J. 2023. *EANM guidelines for PET-CT and PET-MR routine Quality Control.* (Zeitschrift Fur Medizinische Physik), **Vol. 33 No. 1 2022** : 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.zemedi.2022.08.003>
- Lam, M. G. E. H., Hunt, S. J., El-Haddad, G. E., & Alavi, A. 2019. *Evolving Role of PET in Interventional Radiology-Based Oncology Procedures.* (PET Clinics), **Vol. 14 No 4 2019** : xiii–xiv. <https://doi.org/10.1016/j.cpet.2019.07.001>

- Lodge, M. A., Lesniak, W., Gorin, M. A., Pienta, K. J., Rowe, S. P., & Pomper, M. G. 2021. *Measurement of PET Quantitative Bias In Vivo*. (*Journal of Nuclear Medicine*), **Vol. 62 No. 5 2021** : 732–737. <https://doi.org/10.2967/jnumed.120.251397>
- Masa-Ah, P. dan Soongsathitanon, S. (2010). *A Novel Standardized Uptake Value (SUV) calculation of PET DICOM files using MATLAB*. (International Conference on Applied Informatics, Biomedical Electronics & Informatics and Communications). ISBN: 978-960-474-216-5 2010 : 413-416.
- McCullough, C. H., & Rajiah, P. S. 2023. *Milestones in CT: Past, Present, and Future*. (*Radiology*), **Vol. 309 No. 1 2023**. Radiological Society of North America Inc. <https://doi.org/10.1148/radiol.230803>.
- McDougald, W. A., & Mannheim, J. G. 2022. *Understanding the importance of Quality Control and quality assurance in preclinical PET/CT imaging*. (*EJNMMI Physics*), **Vol.9 No.1 2022**. <https://doi.org/10.1186/s40658-022-00503-w>.
- M. Quraish Shihab. 2002. *Tafsir Al-Mishbah*. **Vol.14**. Lentera Hati.
- Phantom Laboratory. 2023. *Catphan® 604 Product Guide*. Diakses 2 April 2026 dari <https://www.phantomlab.com/s/CTP604Manual20230330.pdf>.
- Podgorsak, E. B. 2010. *Radiation Physics for Medical Physicists (Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering)*. (Second Edition) <http://www.springer.com/series/3740>.
- Reynés-Llompart, G., Zorz, A., Boellaard, R., Ptáček, J., Pike, L., Soret, M., Vandenberghe, S., & Matheoud, R. 2022. *Quality Control in PET/CT and PET/MRI: Results of a survey amongst European countries*. (*Physica Medica*) **Vol. 99 2022** : 16–21. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2022.05.004>.
- Singh, M. K., Mohan, V. S. K., & Kaushik, C. 2023. *Operational and Performance Experience with uMI550 Digital PET-CT during Routine Quality Control Procedures*. (*World Journal of Nuclear Medicine*), **Vol 22 No. 4 2023** : 267–275. <https://doi.org/10.1055/s-0043-1777696>.
- Sipilä, O., Liukkonen, J., Halme, H. L., Tolvanen, T., Sohlberg, A., Hakulinen, M., Manninen, A. L., Tahvanainen, K., Tunninen, V., Ollikainen, T., Kangasmaa, T., Kangasmäki, A., & Vuorela, J. 2023. *Variability in PET image quality and quantification measured with a permanently filled 68Ge-phantom: a multi-center study*. (*EJNMMI Physics*), **Vol. 10 No.38 2023**. <https://doi.org/10.1186/s40658-023-00551-w>.
- Turner, J. E. 2007. *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*. (Third, Completely Revised and Enlarged Edition). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Vallot, D., De Ponti, E., Morzenti, S., Gramek, A., Pieczonka, A., Llompart, G. R., Siennicki, J., Deak, P., Dutta, C., Uribe, J., & Caselles, O. 2020. *Evaluation of PET quantitation accuracy among multiple discovery IQ PET/CT systems via NEMA image quality test*. (*EJNMMI Physics*), **Vol.7 No.30 2020**. <https://doi.org/10.1186/s40658-020-00294-y>.
- Willi A. Kalender. 2012. *Computed Tomography : Fundamentals, System Technology, Image Quality, Applications*. (third edition). Publicis Erlangen.