



PANDUAN PEMERIKSAAN DAN INTERPRETASI NUKLIR KARDIAK PADA PENYAKIT ARTERI KORONER

**PERHIMPUNAN DOKTER
SPECIALIS KARDIOVASKULAR
INDONESIA
2023**

PANDUAN PEMERIKSAAN DAN INTERPRETASI NUKLIR KARDIAK PADA PENYAKIT ARTERI KORONER

**Kelompok Kerja
Kardiologi Nuklir dan Pencitraan Kardiovaskular**

PERHIMPUNAN DOKTER SPESIALIS KARDIOVASKULAR INDONESIA

2023

**PANDUAN PEMERIKSAAN DAN INTERPRETASI NUKLIR KARDIAK
PADA PENYAKIT ARTERI KORONER**

Penulis :

Elen

Astri Astuti

Irmarisyani Sudirman

Celly A Atmadikoesoemah

Manoefris Kasim

ISBN : 978-623-6311-39-4 (PDF)

November 2023

PENERBIT

PERHIMPUNAN DOKTER SPESIALIS KARDIOVASKULAR INDONESIA

2023

KATA PENGANTAR

Ketua Pengurus Pusat Perhimpunan Dokter Spesialis Kardiovaskular Indonesia

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Dengan memanjatkan puji dan syukur ke hadirat Allah SWT, maka buku "**Panduan Pemeriksaan dan Interpretasi Nuklir Kardiak Pada Penyakit Arteri Koroner**" yang disusun oleh Kelompok Kerja (POKJA) Nuklir dan Pencitraan Kardiovaskular Indonesia (PERKI) ini dapat terselesaikan dengan baik.

Pencitraan nuklir merupakan prosedur diagnostik noninvasif yang menggunakan materi radioaktif dalam jumlah kecil untuk menciptakan gambaran jantung di dalam tubuh. Walaupun memiliki terminologi "nuklir", jenis pencitraan ini dianggap sangat aman. Jumlah radiasi yang kecil ini tidak merusak tubuh atau organ seseorang. Pencitraan nuklir dapat memberikan informasi mengenai kondisi jantung seseorang, seperti: menentukan apakah seseorang memiliki gejala penyakit jantung, memonitor aliran jantung dan efek kemoterapi atau pengobatan terhadap jantung dan lain-lain.

Kami berharap buku ini dapat dipergunakan sebagai pedoman dan pegangan Sejawat dalam menambah dan memperdalam pengetahuan khususnya mengenai diagnosis dan tatalaksana gagal jantung terkini, sehingga dapat membantu memberikan pelayanan yang terbaik bagi pasien di rumah sakit dan fasilitas-fasilitas pelayanan kesehatan di seluruh Indonesia.

Kami sampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada tim penyusun buku yang telah meluangkan waktu, tenaga, pikiran serta keahliannya sehingga buku ini dapat diterbitkan.

Sesuai dengan perkembangan ilmu dan teknologi kardiovaskular, buku ini akan selalu dievaluasi dan disempurnakan agar dapat dipergunakan oleh seluruh tenaga kesehatan dalam memberikan pelayanan yang terbaik dan berkualitas.

Semoga buku pedoman ini bermanfaat bagi kita semua.

Wassalamua'alaikum Wr. Wb.



dr. Radityo Prakoso, SpJP(K), FIHA, FAPSIC, FAsCC, FESC, FACC, FSCAI

Ketua Umum Pengurus Pusat Perhimpunan Dokter Spesialis Kardiovaskular Indonesia

KATA PENGANTAR

Ketua Kelompok Kerja Kardiologi Nuklir dan Pencitraan Kardiovaskular

Assalamualaikum warahmatullahi wabarakatuh

Pencitraan perfusi miokardium dengan radionuklir telah dimulai sejak 50 tahun yang lalu. Pemeriksaan ini memiliki peranan penting dalam menegakkan diagnosis, stratifikasi risiko, dan prediksi keluaran pada berbagai penyakit kardiovaskular, diantaranya penyakit arteri koroner. Di Indonesia, pelayanan pencitraan nuklir kardiak telah dirintis sejak tahun 1985 oleh dr. Manoefris kasim, SpJP(K), SpKN, FIHA di RS Jantung dan Pembuluh Darah Harapan Kita.

Terdapat berbagai pembaharuan dalam langkah pemeriksaan dan interpretasi pencitraan perfusi miokardium sehingga diperlukan panduan bagi dokter yang berkecimpung dalam kardiologi nuklir. Buku ini bertujuan untuk memaparkan langkah-langkah pemeriksaan dan standar interpretasi pencitraan perfusi miokardium dengan *Single Photon Emission Computed Tomography* (SPECT) dan *Photon Emission Tomography* (PET) secara sistematis sehingga mempermudah dokter dan teknologis yang bekerja dalam bidang kardiologi nuklir. Informasi yang didapatkan dari pencitraan perfusi miokardium dapat bermanfaat dalam aplikasi klinis sehari-hari, terutama pada pasien dengan penyakit arteri koroner.

Saya mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah turut serta dalam penyusunan buku panduan ini, selebihnya kami memohon maaf apabila masih terdapat kekurangan. Semoga buku ini dapat dipergunakan sebagai pedoman dalam pelayanan pencitraan kardiovaskular khususnya bidang kardiologi nuklir di rumah sakit – rumah sakit di Indonesia.

Jakarta, 17 Oktober 2023



dr. Elen, SpJP(K), FIHA

Kelompok Kerja Kardiologi Nuklir dan Pencitraan Kardiovaskular

DAFTAR ISI

Kata Pengantar Ketua Pengurus Pusat Perhimpunan Dokter Spesialis Kardiovaskular Indonesia	iii
Kata Pengantar Kelompok Kerja Kardiologi Nuklir dan Pencitraan Kardiovaskular	iv
Daftar Isi	v
Daftar Tabel	vii
Daftar Gambar	viii
Daftar Singkatan	ix
Bab I Panduan Pemeriksaan Pencitraan Perfusi Miokardium dengan <i>Single Photon Emission Computed Tomography</i>	1
1.1 Persiapan Pasien	1
1.2 Uji beban	1
1.2.1 Uji beban latihan	1
1.2.2 Uji beban farmakologis	4
1.2.2.1 Adenosin	5
1.2.2.2 Regadenoson	9
1.2.2.3 Dipiridamol	10
1.2.2.4 Kombinasi latihan intensitas rendah dengan infus vasodilator	11
1.2.2.5 Dobutamin	11
1.3 Radiofarmaka	14
1.4 Kamera	14
1.5 Akuisisi	16
1.6 Pemrosesan	26
Bab II Panduan Interpretasi Pencitraan Perfusi Miokardium dengan <i>Single Photon Emission Computed Tomography</i>	28
2.1 Penilaian Visual	28
2.1.1 Tampilan gambar	29
2.1.2 Analisis dan interpretasi awal	30
2.1.3 Analisis dan interpretasi perfusi miokardium	32
2.2 Penilaian Semikuantitatif	33
2.2.1 <i>Summed Stress Score (SSS)</i>	34
2.2.2 <i>Summed Rest Score (SRS)</i>	34

2.2.3	<i>Summed Difference Score (SDS)</i>	34
2.2.4	Beban iskemia (<i>Ischemic burden</i>)	35
2.3	Penilaian kuantitatif	35
2.4	Viabilitas miokardium	36
2.5	Artefak	38
2.6	Penilaian SPECT dengan EKG-gated	39
2.7	Peranti lunak	40
2.8	Interpretasi akhir berdasarkan klinis dan data uji beban	41
2.9	Contoh Interpretasi	44
Bab III	Tinjauan Pencitraan Perfusi Miokardium dengan <i>Positron Emission Tomography</i>	58
3.1	Radiofarmaka	58
3.2	Persiapan pasien	60
3.3	Uji beban	63
3.4	Akuisisi	63
3.5	Pemrosesan	69
3.6	Interpretasi	69
3.6.1	Analisis dan interpretasi perfusi miokardium dengan PET	69
3.6.1.1	Penilaian secara kualitatif (visual)	71
3.6.1.2	Penilaian semikuantitatif	72
3.6.1.3	Penilaian kuantitatif	73
3.6.2	Analisis dan interpretasi metabolisme miokardium dengan PET	76
Daftar Pustaka		79

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Kontraindikasi uji beban jantung	2
Tabel 1.2	Prosedur uji beban jantung	3
Tabel 1.3	Indikasi penghentian dini uji beban jantung	4
Tabel 1.4	Kontraindikasi uji beban adenosin	6
Tabel 1.5	Efek samping uji beban adenosin	6
Tabel 1.6	Prosedur uji beban adenosin	7
Tabel 1.7	Indikasi penghentian uji beban adenosin	8
Tabel 1.8	Kontraindikasi uji beban dobutamin	12
Tabel 1.9	Efek samping uji beban dobutamin	12
Tabel 1.10	Prosedur uji beban dobutamin	13
Tabel 1.11	Indikasi penghentian uji beban dobutamin	13
Tabel 1.12	Parameter akuisisi protokol 1 hari dengan radiofarmaka Technetium-99m dan kamera Anger	21
Tabel 1.13	Parameter akuisisi protokol 2 hari dengan radiofarmaka Technetium-99m dan kamera Anger	22
Tabel 1.14	Parameter akuisisi protokol uji dengan radiofarmaka Thallium-201 dan kamera Anger	23
Tabel 1.15	Parameter akuisisi protokol 1 hari dengan radiofarmaka Technetium-99m dan kamera Cadmium Zinc Telluride (CZT)	24
Tabel 1.16	Parameter akuisisi protokol 2 hari dengan radiofarmaka Technetium-99m dan kamera Cadmium Zinc Telluride (CZT)	25
Tabel 1.17	Parameter akuisisi protokol uji dengan radiofarmaka Thallium-201 dan kamera Cadmium Zinc Telluride (CZT)	26
Tabel 2.1	Viabilitas miokardium berdasarkan radiofarmaka SPECT yang digunakan	37
Tabel 2.2	Interpretasi perfusi miokardium SPECT	41
Tabel 3.1	Perbandingan radiofarmaka yang tersedia untuk PET perfusi kuantitatif	62
Tabel 3.2	Prosedur pemeriksaan metabolisme miokardium dengan ¹⁸ F-Fluorodeoxyglucose	62
Tabel 3.3	Panduan pengendalian glukosa darah	63
Tabel 3.4	Pencitraan perfusi dengan radiofarmaka Rubidium-82	65
Tabel 3.5	Pencitraan perfusi dengan radiofarmaka Ammonia N-13	66
Tabel 3.6	Pencitraan metabolisme dengan radiofarmaka ¹⁸ F-Fluorodeoxyglucose	67
Tabel 3.7	Sistem skor semikuantitatif	73
Tabel 3.8	Interpretasi viabilitas berdasarkan perbandingan perfusi dan metabolisme dengan ¹⁸ F-Fluorodeoxyglucose	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Protokol uji beban adenosin	8
Gambar 1.2	Protokol uji beban regadenoson	10
Gambar 1.3	Protokol uji beban dipiridamol	11
Gambar 1.4	Protokol uji beban dobutamin	13
Gambar 1.5	Kamera SPECT	16
Gambar 1.6	Protokol uji beban-istirahat Technetium-99m	19
Gambar 1.7	Protokol istirahat-uji beban Technetium-99m	19
Gambar 1.8	Protokol uji beban - istirahat/redistribusi/reinjeksi Thallium-201	20
Gambar 2.1	Penilaian visual	29
Gambar 2.2	Tampilan 3 dimensi perfusi miokardium	30
Gambar 2.3	Segmentasi ventrikel kiri	32
Gambar 2.4	Penilaian semikuantitatif	34
Gambar 2.5	Tampilan <i>bull's eye</i> atau <i>polar map</i>	36
Gambar 2.6	Segmen miokardium viabel dan nonviabel	38
Gambar 3.1	Protokol evaluasi perfusi kuantitatif PET kardiak saat istirahat dan uji beban	68
Gambar 3.2	Protokol evaluasi metabolisme miokardium dengan [¹⁸ F]Fluorodeoxyglucose	68
Gambar 3.3	Penilaian visual	72
Gambar 3.4	Penilaian kuantitatif <i>myocardial blood flow</i> (MBF) dan <i>myocardial flow reserve</i> (MFR)	74
Gambar 3.5	Interpretasi viabilitas berdasarkan perbandingan perfusi dan metabolisme dengan [¹⁸ F]Fluorodeoxyglucose)	77

DAFTAR SINGKATAN

^{13}C	Carbon-13
^{13}N -ammonia	Ammonia N-13
^{15}O	Oksigen-15
^{18}F -FDG	Fluorodeoxyglucose F-18
^{201}Tl	Thalium-201
3D-RAMLA	<i>3D row action maximum likelihood algorithm</i>
^{82}Rb	Rubidium-82
^{82}Sr	Strontium-82
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	Technetium-99m
AHA	<i>American Heart Association</i>
ASNC	<i>American Society of Nuclear Cardiology</i>
AV	Atrioventrikular
BGO	<i>Bismuth germanate</i>
BMI	<i>Body Mass Index</i>
CABG	<i>Coronary Artery Bypass Graft</i>
CMR	<i>Cardiac Magnetic Resonance (CMR)</i>
CT	<i>Computed Tomography</i>
CZT	Cadmium Zinc Telluride
EKG	Elektrokardiografi
FBP	<i>Filtered Back Projection (FBP)</i>
FDA	<i>Food and Drug Administration</i>
GSO	<i>Gadolinium oxyorthosilicate</i>
IV	Intravena
LBBB	<i>Left Bundle Branch Block</i>
LPO	<i>left posterior oblique</i>
LSO	<i>Lutetium oxyorthosilicate</i>
LV	<i>left ventricle</i>
LVEF	<i>Left Ventricle Ejection Fraction</i>
LYSO	<i>Lutetium yttrium orthosilicate</i>
MBF	<i>Myocardial Blood Flow</i>
MFR	<i>Myocardial Flow Ratio</i>
MPI	<i>Myocardial Perfusion Imaging</i>
MRI	<i>Magnetic Resonance Imaging</i>
OSEM	<i>Ordered Subset Expectation Maximization</i>
PAK	Penyakit Arteri Koroner

PDS	<i>perfusion defect size</i>
PET	<i>Photon Emission Tomography (PET)</i>
PTF	<i>Perfusable Tissue Fraction</i>
PTI	<i>Perfusable Tissue Index</i>
RAO	<i>right anterior oblique</i>
SDS	<i>Summed Difference Score</i>
SPECT	<i>Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT)</i>
SPM	<i>Statistical Parametric Mapping</i>
SRS	<i>Summed Rest Score</i>
SSS	<i>Summed Stress Score</i>
TD	Tekanan Darah
TID	<i>Transient Ischemic Dilation</i>
TOF	<i>time-of-flight</i>
WPW	<i>Wolf-Parkinson-White</i>

BAB I
PANDUAN PEMERIKSAAN PENCITRAAN PERFUSI MIOKARDIUM
DENGAN *SINGLE PHOTON EMISSION COMPUTED TOMOGRAPHY*

1.1 Persiapan pasien

Pemeriksaan pencitraan perfusi miokardium memerlukan persiapan khusus yang berhubungan dengan uji beban. Berikut ini persiapan pasien akan dibahas pada masing-masing pemeriksaan uji beban secara spesifik. Jika pencitraan perfusi miokardium bertujuan untuk mendiagnosis penyakit arteri koroner (PAK), maka obat-obatan anti-iskemia harus dihentikan 12 jam sebelum pemeriksaan. Lain halnya jika pencitraan perfusi miokardium dilakukan atas indikasi stratifikasi risiko PAK, maka obat-obatan anti-iskemia dapat dilanjutkan sebelum pemeriksaan. Pasien gagal ginjal kronik yang telah rutin menjalani hemodialisis sebaiknya dijadwalkan pemeriksaan sehari setelah hemodialisis. Persiapan lainnya mengikuti persiapan untuk masing-masing jenis uji beban.

1.2 Uji beban

1.2.1 Uji beban latihan

Uji beban latihan telah digunakan selama lebih dari 60 tahun untuk tujuan diagnostik pada pasien yang memiliki keluhan angina, prognosis, dan stratifikasi risiko pada pasien PAK yang diketahui, seperti riwayat infark miokardium atau PAK yang telah dikonfirmasi dengan angiografi koroner invasif atau *computed tomography* (CT), juga untuk orang yang berisiko tinggi untuk adanya PAK, seperti pasien dengan diabetes melitus, penyakit pembuluh darah perifer atau serebral.

Modalitas latihan yang dapat dipergunakan antara lain:

1. Latihan menggunakan *treadmill* dilakukan sesuai dengan protokol standar (paling sering menggunakan protokol Bruce atau Bruce modifikasi) dengan kecepatan dan kemiringan *treadmill* dinaikkan bertahap.
2. Latihan menggunakan sepeda statis posisi tegak atau berbaring menggunakan kecepatan standar dengan resistensi tambahan, biasanya dimulai dengan beban 25W yang dinaikkan setiap 2 menit.

Kontraindikasi, prosedur, dan indikasi penghentian dini dari uji beban jantung dicantumkan pada **Tabel 1.1 - 1.3**.

Tabel 1.1 Kontraindikasi uji beban jantung

Kontraindikasi absolut

1. Angina tidak stabil risiko tinggi.
2. Infark miokardium akut (kurang dari 2-4 hari).
3. Gagal jantung kronik dengan tanda kongesti atau tidak terkontrol.
4. Tekanan darah sistolik >200 mmHg atau diastolik >110 mmHg sebelum pemeriksaan.
5. Aritmia yang tidak terkontrol (menyebabkan gejala atau gangguan hemodinamik).
6. Stenosis aorta berat yang bergejala.
7. Emboli paru akut.
8. Miokarditis atau perikarditis akut.
9. Diseksi aorta akut.
10. Hipertensi pulmonal berat.
11. Penyakit medis simtomatik akut.

Kontraindikasi relatif

1. Stenosis pembuluh darah koroner *left main* signifikan (stenosis >50%).
2. Stenosis aorta berat tanpa gejala
3. Kardiomiopati hipertrofi obstruktif atau bentuk lain dari obstruksi jalan keluar ventrikel kiri yang berat.
4. Takiaritmia atau bradikardia yang signifikan.
5. Blok atrioventrikular (AV) derajat tinggi.
6. Kelainan elektrolit.
7. Gangguan mental atau fisik yang menyebabkan ketidakmampuan untuk latihan secara memadai.
8. *Left bundle branch block* (LBBB), alat pacu jantung permanen, dan sindrom pre-eksitasi ventrikel/ *Wolf-Parkinson-White* (WPW): slebih baik dengan uji beban vasodilator.

Tabel 1.2 Prosedur uji beban jantung

1. Pasien tidak boleh makan setidaknya 3 jam sebelum pemeriksaan. Pasien yang dijadwalkan agak siang boleh mendapatkan sarapan ringan (misalnya, sereal, buah). Kafein harus dihindari setidaknya selama 12 jam sebelum pemeriksaan, serupa dengan uji beban vasodilatasi, karena ada kemungkinan metode uji beban diubah menjadi uji beban farmakologis. Jika memungkinkan, penderita diabetes yang bergantung pada insulin dijadwalkan pada pagi hari.
2. Obat penyekat beta sebaiknya dihentikan sejak 1 hari sebelum uji beban latihan, kecuali pada pasien yang bergantung pada obat ini.
3. Kanula intravena (IV) (lebih baik jika berukuran lebih besar dari 24G) harus dimasukkan untuk injeksi radiofarmaka.
4. Elektrokardiogram harus dipantau terus-menerus selama uji beban latihan dan setidaknya hingga 4 menit setelah fase pemulihan. Selain itu, denyut jantung istirahat harus kembali mendekati awal. Gejala dan Perubahan segmen ST yang terjadi pasca latihan harus teratasi. Elektrokardiogram (EKG) 12 sandapan harus (secara otomatis) diperoleh pada setiap tahap latihan, pada fase puncak latihan, dan pada fase akhir pemulihan. Selain itu, jika terdapat kelainan (aritmia, dll), EKG 12 sadapan harus direkam.
5. Denyut jantung dan tekanan darah harus dicatat setidaknya setiap 3 menit selama latihan, pada puncak latihan, dan setidaknya 4 menit setelah fase pemulihan.
6. Uji beban latihan dihentikan bila terdapat gejala (nyeri dada sedang hingga parah, sesak napas berlebihan, dan kelelahan). Nilai denyut jantung mencapai 85% dari prediksi denyut nadi maksimum sesuai usia, bukan merupakan indikasi untuk penghentian tes. Catatan: Pada pasien yang telah diketahui mengidap PAK (terutama jika obat-obatan anti-iskemik tidak dihentikan), nilai prognostik tes tetap terjaga tanpa mencapai 85% dari perkiraan denyut jantung maksimum.
7. Radiofarmaka harus disuntikkan sedekat mungkin dengan puncak latihan. Pasien harus dimotivasi untuk terus melanjutkan latihan setidaknya 1 menit setelah injeksi radiofarmaka. Jika diperlukan, kecepatan dan/atau kemiringan treadmill dapat dikurangi setelah injeksi radiofarmaka.
8. Pasien yang dirujuk untuk uji beban diagnostik dapat diubah menjadi uji beban farmakologis atau kombinasi keduanya jika mereka tidak dapat berolahraga secara memadai selama 4 hingga 6 menit.

Tabel 1.3 Indikasi penghentian dini uji beban jantung

1. Angina pectoris sedang sampai berat.
2. Dispnea.
3. Kelelahan.
4. Ataksia, pusing, atau hampir sinkop.
5. Tanda-tanda hipoperfusi jaringan (sianosis dan pucat).
6. Pasien meminta untuk menghentikan tes.
7. Depresi segmen ST yang berlebihan (>2 mm dari baseline).
8. Elevasi segmen ST (>1 mm) pada sadapan tanpa diagnostik.
9. Takikardia supraventrikular atau ventrikel yang berkelanjutan.
10. Munculnya gambaran LBBB atau keterlambatan konduksi intraventrikular yang tidak dapat dibedakan dengan takikardia ventrikel.
11. Penurunan tekanan darah sistolik lebih besar dari 10 mmHg dari nilai awal, meskipun ada peningkatan beban kerja, bila disertai dengan bukti iskemia lainnya.
12. Tampak respon hipertensi (tekanan darah sistolik >230 mmHg dan/atau tekanan darah diastolik >115 mmHg).
13. Tidak dapat memantau tekanan darah sistolik dan/ atau elektrokardiogram dengan memadai.
14. Pada pasien yang dipasang defibrillator kardioverter implan, jika denyut jantung mengalami kenaikan 20 denyut per menit dari denyut jantung terendah, di mana terapi (pacu jantung antitakikardia atau syok) diprogram untuk diberikan, maka latihan harus dihentikan.

Uji beban latihan memiliki nilai diagnostik yang lebih rendah jika pasien tidak dapat mencapai target denyut jantung, tekanan darah, atau tidak dapat mempertahankan durasi latihan selama 4-6 menit, karena keterbatasan fisik non-kardiak, seperti kelainan paru, pembuluh darah perifer, kelainan muskuloskeletal, atau karena kurangnya motivasi. Pada pasien tersebut harus dipertimbangkan untuk dilakukan uji beban farmakologis. Denyut jantung mencapai 85% dari nilai prediksi denyut jantung maksimum berdasarkan usia, bukan merupakan indikasi untuk penghentian tes.

1.2.2 Uji beban farmakologis

Saat ini ada tiga agen vasodilator koroner, yaitu; adenosin, dipiridamol, dan regadenoson. Adenosin dan regadenoson bekerja dengan menghasilkan stimulasi reseptor A_{2A}. Dipyridamole menghambat enzim fosfodiesterase yang memecah cAMP dan menghambat *reuptake* adenosin endogen seluler, sehingga secara tidak langsung bertindak sebagai agonis adenosin. Aminofilin harus tersedia selama pengujian sebagai antidotum jika terjadi efek samping yang serius dari agen vasodilator.

1.2.2.1 Adenosin

Indikasi pemeriksaan pencitraan perfusi miokardium dengan uji beban adenosin sama dengan indikasi pencitraan perfusi miokardium pada umumnya, dan apabila ada kondisi berikut:

1. Ketidakmampuan untuk melakukan latihan yang memadai karena keterbatasan fisik non-kardiak (masalah paru-paru, pembuluh darah perifer, muskuloskeletal, atau kondisi mental) atau karena kurangnya motivasi. Sama halnya dengan uji beban latihan, obat jantung anti-iskemik (termasuk β -blocker, nitrat, dan antagonis kalsium) dapat menurunkan akurasi diagnostik uji beban vasodilator.
2. Adanya abnormalitas eletrokardiografi (EKG), yaitu: *left-bundle branch block* (LBBB), pre-eksitasi ventrikel (sindroma WPW), dan pacu jantung permanen.
3. Pasien pasca infark miokardium akut yang stabil dengan stratifikasi risiko rendah dan tinggi.
4. Pasien yang diduga sindroma koroner akut dengan risiko rendah (pasca evaluasi serial kondisi klinis, EKG, dan biomarker injuri miokardium) untuk membantu diagnosis atau stratifikasi risiko lanjutan.

Kontraindikasi, efek samping, prosedur, dan indikasi penghentian dini dari uji beban adenosin dicantumkan pada **Tabel 1.4-1.7** dan **Gambar 1.1**.

Tabel 1.4 Kontraindikasi uji beban adenosin

Kontraindikasi absolut

1. Pasien dengan penyakit paru-paru bronkospastik dengan mengi atau riwayat penyakit saluran napas reaktif yang signifikan.
2. Hambatan konduksi AV derajat dua atau tiga tanpa alat pacu jantung yang berfungsi.
3. Penyakit nodus sinus, seperti *sick sinus syndrome* atau bradikardia simtomatik, tanpa alat pacu jantung yang berfungsi.
4. Tekanan darah sistolik kurang dari 90 mmHg. Risiko hipotensi serius mungkin lebih tinggi pada pasien dengan disfungsi otonom, hipovolemia, stenosis koroner *left main* penyakit katup jantung stenotik, perikarditis, atau efusi perikardial, atau stenosis arteri karotis dengan insufisiensi serebrovaskular.
5. Hipertensi yang tidak terkontrol (TD sistolik >200 mmHg atau TD diastolik >110 mmHg).
6. Penggunaan obat yang mengandung dipiridamol atau dipiridamol (misalnya, Aggrenox) < 48 jam.
7. Diketahui memiliki hipersensitivitas terhadap adenosin.
8. Angina tidak stabil / sindroma koroner akut, atau < 2-4 hari pasca infark miokardium akut.

Kontraindikasi relatif

1. Bradikardia sinus (denyut jantung <40/menit).
2. AV blok derajat 2 tipe mobitz (Wenckebach).
3. Konsumsi makanan atau minuman berkafein (misalnya kopi, teh, soda) dalam 12 jam terakhir.
4. Stenosis aorta berat
5. Penyakit kejang.

Tabel 1.5 Efek samping uji beban adenosin

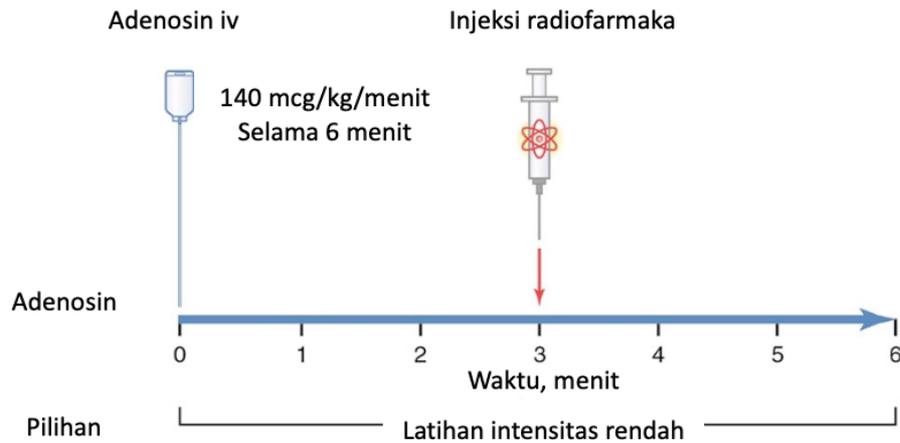
1. Efek samping ringan sering terjadi dan dapat terjadi pada sekitar 80% pasien. Efek samping yang umum adalah kemerahan (35-40%), nyeri dada (25-30%), dispnea (20%), pusing (7%), mual (5%), dan hipotensi simtomatik (5%). Nyeri dada tidak spesifik tidak selalu menunjukkan adanya PAK.
2. Hambatan konduksi AV (8%). Sebagian besar kasus (>95%) blok AV dapat sembuh sendiri dan tidak memerlukan terapi lanjut.
3. Depresi segmen ST ≥ 1 mm (5-7%). Dibandingkan dengan nyeri dada, perubahan segmen ST mungkin merupakan indikasi adanya iskemia.
4. Infark miokardium fatal atau non-fatal sangat jarang terjadi, tetapi pernah dilaporkan.
5. Fibrilasi atrium pernah dilaporkan terjadi dalam beberapa menit setelah inisiasi infus adenosin.
6. Onset baru atau kekambuhan kejang jarang terjadi setelah pemberian adenosin.
7. Stroke serebrovaskular hemoragik dan iskemik pernah dilaporkan.

Tabel 1.6 Prosedur uji beban adenosin

1. Persiapan pasien: tidak boleh makan setidaknya 3 jam sebelum tes. Hindari konsumsi produk apa pun yang mengandung metilxantin, termasuk kopi berkafein, teh, atau minuman berkafein lainnya, produk obat yang mengandung kafein dan teofilin setidaknya selama 12 jam sebelum tes. Dipiridamol atau obat yang mengandung dipiridamol harus ditunda setidaknya selama 48 jam (2 hari) sebelum pemberian adenosin.
2. Pompa infus/ pompa syringe diperlukan agar adenosin dapat diberikan dengan kecepatan infus yang konstan.
3. Jalur IV dengan konektor "Y" dua portal diperlukan untuk injeksi radiofarmaka selama infus adenosin.
4. Pemantauan EKG harus dilakukan seperti halnya uji beban latihan. Elektrokardiogram 12 sadapan akan direkam setiap menit selama infus adenosin (4 hingga 6 menit).
5. Tekanan darah harus dipantau setiap dua menit selama infus dan 3 sampai 5 menit setelah pemulihan atau sampai stabil.
6. Infus adenosin harus diberikan secara kontinyu dengan kecepatan 140 mcg/kg/menit selama periode 6 menit. Injeksi radiofarmaka dilakukan pada menit ke-3, dan infus dilanjutkan selama 3 menit.

Catatan:

- ❖ Adenosin dapat diberikan lebih singkat pada kasus tertentu, yaitu selama 4 menit. Durasi tersebut sama efektifnya untuk mendeteksi PAK dibandingkan dengan infus standar 6 menit.
- ❖ Untuk protokol durasi yang lebih pendek, waktu minimum untuk injeksi radiofarmaka adalah 2 menit, dan infus harus dilanjutkan setidaknya 2 menit setelahnya.
- ❖ Untuk pasien yang dianggap memiliki risiko komplikasi yang lebih tinggi (misalnya, hipotensi, asma terkontrol), infus adenosin dapat dimulai dengan dosis yang lebih rendah (70 hingga 110 mcg/kg/menit). Jika dosis ini dapat ditoleransi dengan baik selama 1 menit, kecepatan infus harus ditingkatkan menjadi 140 mcg/kg/menit dan harus dilanjutkan selama 4 menit. Radiofarmaka harus disuntikkan 1 menit setelah memulai dosis 140-mcg/kg/menit, tanpa menghentikan infus adenosin.
- ❖ Setelah mulai injeksi adenosin, dilakukan evaluasi respon adenosin pada menit kedua, yaitu; peningkatan denyut jantung 10-20 detak atau naik 10%, penurunan tekanan darah sistolik 10 mmHg, atau timbul keluhan seperti; napas cepat, *flushing*, dada terasa seperti diikat, atau sakit kepala.
- ❖ Pada pemeriksaan uji beban adenosin menggunakan *cardiac magnetic resonance* (CMR), jika respon tersebut belum timbul, maka dosis adenosin dapat dinaikkan ke 170 mcg/kg/menit kemudian 210 mcg/kg/menit dengan selang waktu 2 menit. Protokol ini kemungkinan dapat diterapkan pada pemeriksaan *statistical parametric mapping* (SPM) perfusi SPECT.
- ❖ Jika tidak dipasang dua jalur infus, injeksi iv radiofarmaka dilakukan secara perlahan menggunakan konektor Y dua portal. Jika infus adenosin terputus, harus segera dimulai kembali.



Gambar 1.1 Protokol uji beban adenosine

Tabel 1.7 Indikasi penghentian uji beban adenosin

1. Hipotensi berat (TD sistolik <80 mmHg).
2. Hambatan konduksi AV derajat 2 persisten atau blok AV komplit disertai gejala.
3. Aritmia jantung signifikan lainnya.
4. Mengi.
5. Nyeri dada berat yang berhubungan dengan depresi segmen ST sebesar 2 mm atau lebih.
6. Tanda-tanda penurunan perfusi jaringan (tampak pucat, sianosis, dan kulit dingin).
7. Masalah teknis dengan peralatan pemantauan.
8. Permintaan pasien untuk berhenti.

Catatan:

- ❖ Untuk tanda atau gejala yang tidak cukup signifikan untuk menghentikan tes, seseorang dapat mempertimbangkan untuk mempersingkat waktu infus dari 6 menjadi 4 menit.
- ❖ Infus adenosin harus dihentikan lebih awal jika ada perubahan hemodinamik yang nyata atau mengi.

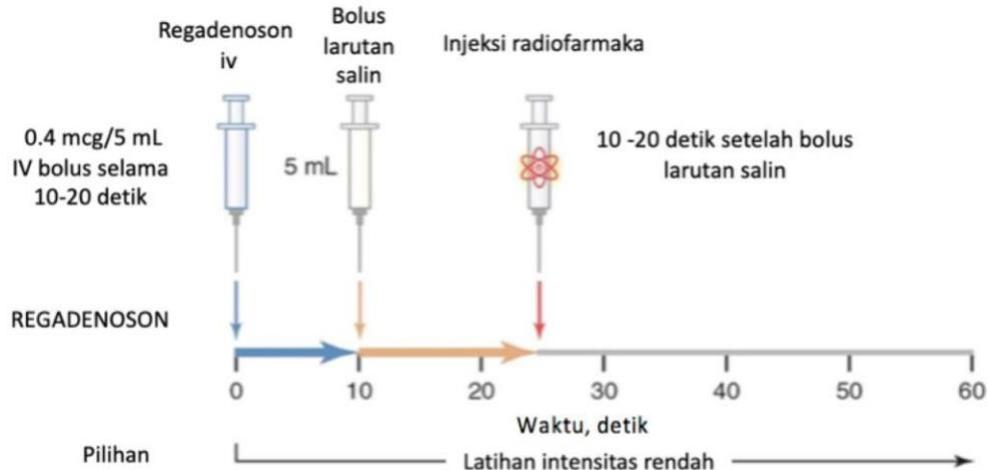
Sebagian besar efek samping hilang dalam beberapa detik setelah penghentian infus adenosin karena waktu paruh adenosin yang sangat singkat (<10 detik), dan pemberian aminofilin intravena jarang diperlukan. Indikasi untuk pemberian antidotum adenosin menggunakan aminofilin (50-250 mg intravena (IV) setidaknya 1 menit setelah injeksi radiofarmaka) meliputi:

1. Hipotensi berat (tekanan darah sistolik <80 mmHg).
2. Hambatan konduksi AV derajat 2 persisten atau blok AV komplit disertai gejala.
3. Aritmia jantung signifikan lainnya.
4. Mengi.
5. Nyeri dada berat yang berhubungan dengan depresi ST \geq 2 mm.
6. Tanda-tanda perfusi yang buruk (pucat, sianosis, kulit dingin).

1.2.2.2 Regadenoson

Regadenoson merupakan agonis reseptor A_{2A} spesifik. Regadenoson memiliki potensi 10 kali lipat dibandingkan adenosin dengan ukuran molekul yang lebih besar dibandingkan dengan vasodilator lainnya (adenosin 5.9 nM vs regadenosin 6.4 nM). Konsentrasi maksimum dan onset aksi farmakodinamik regadenoson di plasma tercapai dalam waktu 1-4 menit setelah injeksi. Karena mekanisme kerja yang serupa dengan adenosin, maka efek hemodinamik dan efek samping regadenoson juga serupa dengan adenosin. Namun, efek regadenoson akan menghilang dalam 15 menit, kecuali sakit kepala menghilang setelah 30 menit. Indikasi dan kontra indikasi uji beban regadenoson juga sama dengan adenosin dan dipiridamol. Regadenoson lebih terpilih dibandingkan adenosin pada pasien dengan asma dan PPOK yang tergantung pada inhaler, serta pasien yang sulit dipasang 2 jalur infus. Sebab, efek samping regadenoson lebih kecil dan kejadian hipotensi, AV blok, dan bronkokonstriksi lebih kecil. Adapun prosedur pemeriksaan uji beban regadenoson adalah:

1. Persiapan: sama dengan persiapan untuk menggunakan adenosin.
2. Dilakukan monitor EKG sama dengan uji beban Latihan. EKG 12 sadapan direkam setiap menit selama injeksi.
3. Tekanan darah dimonitor saat injeksi dan 3- 5 menit setelah pemulihan atau hingga stabil.
4. Regadenoson (0.4 mg/5 mL) diberikan sebagai IV bolus cepat (kira-kira 10 detik) melalui pembuluh vena perifer minimal menggunakan kateter no 22 G. Segera setelah injeksi regadenoson, dilanjutkan dengan injeksi 5 mL larutan salin. Radiofarmaka di injeksikan 10-20 detik setelah IV bolus salin dapat menggunakan jalur intravena yang sama dengan regadenoson, seperti yang terlihat pada **Gambar 1.2** di bawah ini.
5. Efek samping regadenoson serupa dengan adenosin sehingga antidotum yang digunakan pun sama.

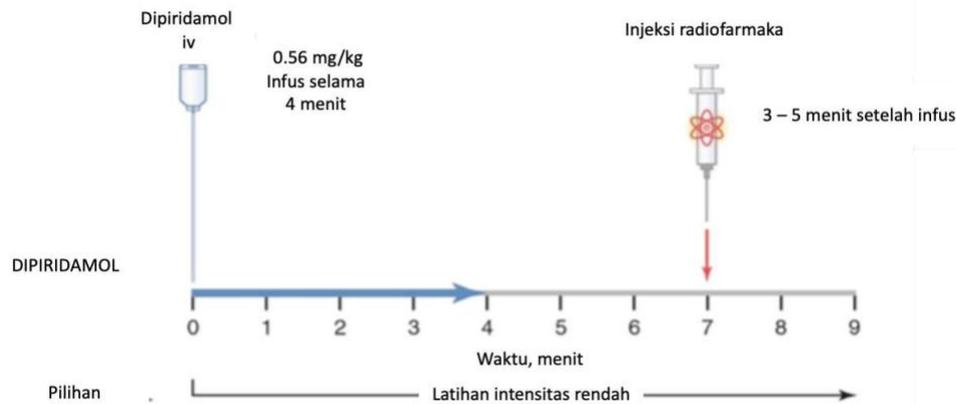


Gambar 1.2 Protokol uji beban regadenoson

1.2.2.3 Dipiridamol

Dipiridamol merupakan vasodilator koroner tidak langsung yang meningkatkan kadar adenosin jaringan dengan cara mencegah pengambilan kembali dan deaminasi adenosin. Puncak vasodilatasi adalah 6,5 menit setelah pemberian dan waktu paruhnya adalah 30-45 menit. Efek hemodinamik dan efek samping dipiridamol sama dengan kedua vasodilator yang telah dibahas sebelumnya (adenosin dan regadenoson). Efek samping dapat bertahan lebih lama dibandingkan vasodilator lainnya, yaitu selama 15-25 menit dan dapat bervariasi tergantung kondisi pasien. Aminofilin dapat digunakan sebagai antidotum. Indikasi dan kontraindikasi uji beban dipiridamol sama dengan adenosin. Adapun prosedur pemeriksaan uji beban dipiridamol adalah:

1. Persiapan sama dengan persiapan adenosin.
2. Dilakukan monitor EKG sama dengan uji beban Latihan. EKG 12 sadapan direkam setiap menit selama injeksi.
3. Tekanan darah dimonitor setiap menit selama injeksi dan 3- 5 menit setelah pemulihan atau hingga stabil.
4. Dipiridamol diberikan secara infus kontinyu selama 4 menit. Sebaiknya menggunakan pompa suntik/infus agar pemberian lebih akurat, namun jika tidak tersedia, pemberian secara injeksi manual atau tetesan *drip* dapat dilakukan. Radiofarmaka diinjeksikan 3 - 5 menit setelah infus dipiridamol selesai, seperti yang terlihat pada **Gambar 1.3** dibawah ini.



Gambar 1.3 Protokol uji beban dipiridamol

1.2.2.4 Kombinasi latihan intensitas rendah dengan infus vasodilator

Pasien rawat jalan dapat menjalani uji beban kombinasi latihan intensitas rendah (misalnya, treadmill 1,7 mph, elevasi 0%) dan infus adenosin, regadenoson, atau dipiridamol. Hal ini menghasilkan pengurangan efek samping vasodilator yang signifikan (misalnya, hipotensi, kemerahan, pusing, mual, dan sakit kepala). Kualitas gambar menjadi lebih baik, karena menurunkan penyerapan radiofarmaka oleh hepar dan usus, yang umum dengan terjadi dengan uji beban farmakologis. Latihan intensitas rendah tidak dianjurkan pada pasien dengan LBBB, WPW, dan pacing ventrikel karena tampak kelainan pencitraan terkait denyut jantung.

1.2.2.5 Dobutamin

Dobutamin bekerja dengan meningkatkan aktivitas reseptor beta secara langsung, menghasilkan peningkatan denyut jantung, tekanan darah, dan kontraktilitas miokardium yang serupa dengan uji beban latihan. Waktu paruh plasma dobutamin adalah 2 menit dengan onset kerja 1-2 menit; namun diperlukan durasi 10 menit untuk mendapatkan efek puncak. Pencitraan perfusi miokardium dengan dobutamin belum dipelajari secara ekstensif seperti pencitraan perfusi miokardium dengan vasodilator dalam evaluasi dan prognostik pasien dengan PAK.

Dobutamin diberikan secara bertahap mulai dengan dosis 5 atau 10 mcg/kg/menit, yang ditingkatkan dengan interval 3 menit menjadi 20, 30, dan 40 mcg/kg/menit. Target denyut jantung yang diharapkan mencapai lebih dari 85% dari detak jantung maksimal yg diprediksikan. Radiofarmaka disuntikkan pada denyut jantung puncak

dan infus dobutamin tetap dilanjutkan selama 1 menit kemudian. Uji beban dobutamin diindikasikan pada pasien yang tidak dapat menjalani uji beban latihan dan yang memiliki kontraindikasi terhadap uji beban vasodilator (terutama penyakit saluran napas bronkospastik). Kontraindikasi, efek samping, prosedur, dan indikasi penghentian dini dari uji beban adenosin dicantumkan pada **Tabel 1.8 - 1.11** dan **Gambar 1.4**.

Tabel 1.8 Kontraindikasi uji beban dobutamin

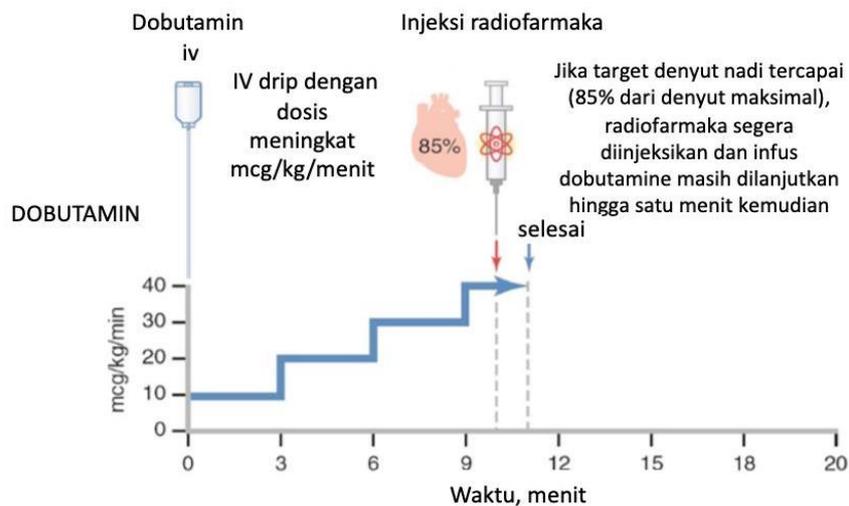
Kontraindikasi absolut uji beban dobutamin
<ol style="list-style-type: none"> 1. Angina tidak stabil, sindrom koroner akut, atau kurang dari 2 sampai 4 hari setelah infark miokardium akut. 2. Obstruksi <i>outflow</i> ventrikel kiri yang signifikan secara hemodinamik. 3. Takiaritmia atrium dengan respons ventrikel yang tidak terkontrol. 4. Riwayat takikardia ventrikel sebelumnya. 5. Hipertensi yang tidak terkontrol (TD sistolik >200 mmHg atau tekanan diastolik >110 mmHg). 6. Pasien dengan diseksi aorta. 7. Diketahui memiliki hipersensitivitas terhadap dobutamin.
Kontraindikasi relatif uji beban dobutamin
<ol style="list-style-type: none"> 1. Pasien yang menggunakan β-blocker di mana denyut jantung dan respons inotropik terhadap dobutamin berkurang. 2. Stenosis aorta berat. 3. Pasien aneurisma aorta besar yang bergejala. 4. EKG menunjukkan adanya LBBB 5. Pasien terpasang alat pacu jantung ventrikel.

Tabel 1.9 Efek samping uji beban dobutamin

<ol style="list-style-type: none"> 1. Efek samping yang umum adalah palpitasi (29%), nyeri dada (31%), sakit kepala (14%), flushing (14%), dyspnea (14%), dan aritmia supraventrikular atau ventrikel yang signifikan (8% hingga 10%). 2. Depresi segmen ST yang menandakan iskemia terjadi pada sekitar sepertiga pasien yang menjalani infus dobutamin. 3. Efek samping berat mungkin memerlukan pemberian IV β-blocker kerja cepat (esmolol, 0,5 mg/kg selama 1 menit). Metoprolol IV (5 mg) bolus 2 menit juga dapat digunakan.

Tabel 1.10 Prosedur uji beban dobutamin

1. Persiapan pasien: tidak ada yang boleh dimakan selama 3 jam sebelum tes.
2. Pompa infus diperlukan untuk pemberian dobutamin.
3. Jalur IV dengan konektor Y dua portal diperlukan untuk menyuntikkan radiofarmaka selama infus dobutamin.
4. Pemantauan EKG dan pemantauan tekanan darah harus dilakukan seperti halnya dengan stresor farmakologis lainnya.
5. Infus dobutamin harus dimulai dengan dosis 5 sampai 10 mcg/kg/menit. Dosis dobutamin kemudian harus ditingkatkan dengan interval 3 menit hingga maksimum 40 mcg/kg/menit. Radiofarmaka harus disuntikkan pada 1 menit sebelum tercapai dosis dobutamin tertinggi (mencapai setidaknya 85% dari prediksi penyakit jantung maksimal yang diinginkan), dan infus dobutamin harus dilanjutkan selama 1 menit setelah injeksi radiotracer.
6. Beberapa peneliti merekomendasikan penambahan atropin (dosis terbagi 0,25-0,5 mg hingga 1-2 mg) pada pasien yang tidak mencapai target denyut jantung dengan dobutamin saja.



Gambar 1.4 Protokol dobutamin

Tabel 1.11 Indikasi penghentian uji beban dobutamin

1. Nilai >85% dari nilai prediksi denyut jantung *age-adjusted* maksimum (setelah dipertahankan selama 1 menit setelah injeksi radiotracer).
2. Hipotensi berat (TD sistolik <80 mmHg).
3. Hipertensi berat (tekanan darah sistolik >230 mmHg atau diastolik >115 mmHg)
4. Aritmia jantung yang signifikan. Terminasi untuk takikardia ventrikel atau takiaritmia atrium lebih mungkin terjadi dengan dobutamin dibandingkan dengan stresor lainnya.
5. Nyeri dada berat yang berhubungan dengan depresi ST sebesar 2 mm atau lebih. Terminasi karena adanya depresi segmen ST lebih mungkin terjadi dengan dobutamin dibandingkan dengan stresor lainnya.
6. Tanda-tanda perfusi yang buruk (pucat, sianosis, kulit dingin).
7. Masalah teknis dengan peralatan pemantauan.
8. Permintaan pasien untuk berhenti.

Antidotum dobutamin diberikan jika terjadi efek samping yang berat, aritmia, atau perubahan segmen ST. Pemberian penyekat beta kerja cepat secara IV (esmolol, 0,5 mg/kg selama 1 menit). Metoprolol IV (dosis 5 mg) juga dapat digunakan pada kondisi sebagai berikut:

1. Hipertensi berat (TD sistolik $>220/110$ mmHg).
2. Aritmia jantung yang signifikan.
3. Nyeri dada berat yang berhubungan dengan depresi ST ≥ 2 mm.

1.3 Radiofarmaka

Terdapat 2 radiofarmaka yang biasa digunakan dalam pemeriksaan dengan *single photon emission computed tomography* (SPECT) perfusi miokardium, yaitu Thallium-201 (^{201}Tl) dan Technetium 99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$). Agen $^{99\text{m}}\text{Tc}$ terdapat dalam 3 bentuk, yaitu: tetrofosmin, sestamibi, dan teboroxim. Agen ^{201}Tl mengemisikan 80 keV energi foton, memiliki waktu paruh 73 jam, dan memasuki miosit melalui transport aktif dengan pompa Na-K-ATPase dan difusi terfasilitasi. Dosis radiasi efektif sekitar 4.4 mSv setiap 1 mCi ^{201}Tl yang diinjeksikan. Agen $^{99\text{m}}\text{Tc}$ mengemisikan 140 keV energi foton, memiliki waktu paruh 6 jam, memasuki sarkolema, dan membran mitokondria dari miosit melalui proses difusi pasif. Dosis radiasi efektif sekitar 0,3 mSv setiap 1 mCi $^{99\text{m}}\text{Tc}$ yang diinjeksikan.

1.4 Kamera

Pencitraan SPECT menggunakan kamera spesifik dan saat ini terdapat beberapa jenis kamera yang standar digunakan pada mesin SPECT dengan kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Kamera Anger yang umum digunakan saat ini merupakan kamera SPECT yang menggunakan sintilator kristal NaI (TI) kontinyu yang digabungkan ke dalam sebuah pancaran yang berasal dari tabung *photomultiplier*. Dalam beberapa tahun terakhir, pencitraan perfusi miokardium telah berkembang signifikan, salah satunya dengan perkembangan kamera semikonduktor *cadmium-zinc-telluride* (CZT). Kamera ini memiliki potensi untuk memberikan resolusi energi yang lebih tinggi dan kualitas gambar yang lebih baik dibandingkan dengan kamera Anger konvensional. Berbeda dengan kamera Anger, kamera CZT menggunakan prinsip deteksi langsung dimana interaksi foton gamma 140 keV menghasilkan sekitar 30.000 elektron, atau setara 20 kali lipat lebih tinggi daripada kristal NaI (TI). Kamera ini memberikan peningkatan resolusi energi sebanyak 2 kali

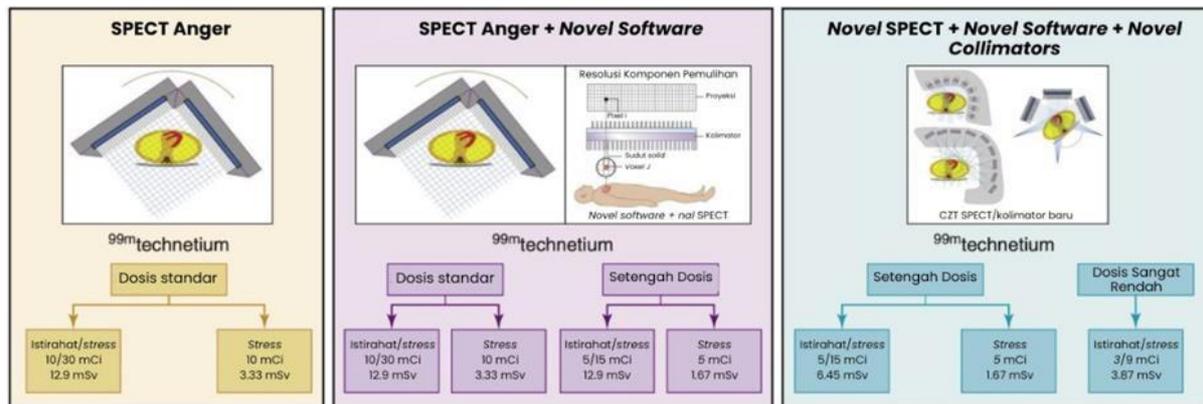
lipat lebih tinggi dibandingkan dengan kamera Anger konvensional. Kamera CZT juga dirancang untuk mengoptimalkan proses akuisisi dan rekonstruksi dengan perangkat lunak dan sistem kolimasi, menyebabkan peningkatan sensitivitas hitungan dan resolusi spasial.

Dua kamera semikonduktor yang saat ini dikomersialkan adalah kamera Discovery NM530c (GE Healthcare, Haifa, Israel) dan kamera D-SPECT (Spectrum Dynamics, Caesarea, Israel). Kedua kamera ini menggunakan tipe detektor *squared* CZT-pixel dengan luas permukaan sebesar 2,5 x 2,5 mm² dan tebal 5 mm. Resolusi energi kedua kamera sama dan jauh lebih baik daripada kamera konvensional. Selain resolusi energi, parameter utama karakteristik kamera gamma adalah (1) sensitivitas terhadap *count*, (2) resolusi spasial, dan (3) kontras pencitraan dinilai sebagai fungsi dari tingkat *noise* (rasio kontras/ *noise*).

Sensitivitas terhadap *count* tomografi merupakan parameter fisik kritis yang bergantung pada waktu perekaman dan aktivitas kamera yang diperlukan. Kamera CZT memiliki sensitivitas yang tinggi sehingga dapat mengurangi durasi perekaman hingga setengahnya, sedangkan aktivitas injeksi menurun hingga sepertiganya, menyebabkan perbaikan dalam hal toleransi dosis radiasi pasien. Di antara semua kamera gamma yang tersedia secara komersial, kamera D-SPECT CZT adalah model yang menunjukkan sensitivitas hitungan tomografi tertinggi, meskipun hanya sedikit (< 1%) dari foton yang dipancarkan direkam oleh kamera ini. Persentase ini, 2 kali lipat lebih tinggi bila dibandingkan dengan kamera Discovery CZT, dan 7-8 kali lipat lebih tinggi bila dibandingkan kamera Anger konvensional. Penting untuk diingat bahwa perbedaan ini tidak berhubungan dengan bahan CZT, meskipun kualitas deteksi cenderung lebih tinggi dengan detektor CZT karena proporsi foton yang terpencar lebih rendah. Metode kolimasi jantung-sentris dari dua kamera CZT inilah yang dapat menjelaskan peningkatan sensitivitas bila dibandingkan dengan SPECT konvensional.

Resolusi spasial adalah parameter kinerja kedua terpenting. Hal ini mengatur kualitas gambar dan terutama ketajaman batas miokardium dan deteksi defek perfusi. Parameter kinerja utama ketiga yaitu kontras gambar, juga ditentukan oleh resolusi spasial. Parameter resolusi spasial dan kontras pencitraan yang saling berpengaruh ini mencerminkan kualitas gambar dan dalam semua studi sebelumnya, secara konsisten ditemukan jauh lebih tinggi pada CZT daripada pada kamera Anger

konvensional. Selain itu, parameter ini mungkin sedikit lebih tinggi pada kamera Discovery dibandingkan dengan D-SPECT. Sebagai kesimpulan, sistem detektor SPECT dengan kamera CZT dibandingkan dengan kamera Anger konvensional menunjukkan sensitivitas, resolusi energi, dan kontras gambar yang lebih baik. Peningkatan sensitivitas menurunkan waktu akuisisi dan total aktivitas injeksi sehingga menurunkan dosis radiasi yang diterima pasien.



Gambar 1.5 Kamera SPECT. Penggunaan kamera Anger pada SPECT dengan berbagai metode untuk mengurangi radiasi.

1.5 Akuisisi

Terdapat beberapa protokol pada pemeriksaan SPECT perfusi miokardium, yaitu studi 1-hari, studi 2-hari, dan teknik dual isotope. Pada protokol studi 1 hari, injeksi radiofarmaka saat uji beban dan saat istirahat yang dilakukan dalam satu hari, atau sebaliknya. Dosis untuk injeksi ^{99m}Tc yang pertama yaitu 8-10 mCi dan injeksi ^{99m}Tc yang kedua membutuhkan dosis yang lebih besar, yaitu sekitar 20-30 mCi. Untuk protokol studi 2 hari, biasanya dilakukan pada pasien-pasien yang memiliki tubuh yang besar, sehingga membutuhkan dosis radiofarmaka yang cukup besar untuk mendapatkan uptake miokardium yang optimal pada saat stress maupun istirahat, yaitu 20-30 mCi. Sementara pada protokol dengan menggunakan dual radiofarmaka, yaitu dengan menggunakan radiofarmaka ^{201}Tl pada saat istirahat dan ^{99m}Tc pada saat uji beban, untuk mendapatkan kualitas gambar SPECT yang baik dan mendapatkan gambaran pada saat fase redistribusi dari isotop.

Idealnya, pencitraan uji beban dan istirahat dengan agen ^{99m}Tc dilakukan pada dua hari terpisah (**Gambar 1.6B** dan **1.7B**) untuk menghindari aktivitas residual ("*shine-through*" atau "*crosstalk*") akibat injeksi pertama. Hal ini akan menyebabkan

interpretasi gambar yang mencerminkan injeksi kedua. Pada pasien dengan obesitas (misalnya berat badan > 113 kg atau BMI > 35) atau pada pasien wanita di mana kita harus mengantisipasi atenuasi payudara, radiofarmaka ^{99m}Tc dosis rendah dapat menghasilkan gambar suboptimal. Oleh karena itu, protokol pencitraan 2 hari dengan aktivitas radiofarmaka yang lebih tinggi (18-30 mCi) untuk setiap injeksi akan menghasilkan gambar yang lebih baik.

Akan tetapi studi 2-hari tidak praktis untuk dilakukan sehingga kebanyakan melakukan studi 1 hari seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1.6A** dan **1.7A**. Suntikan ^{99m}Tc pertama diberikan dengan dosis 8 mCi untuk pasien dengan BMI <25 kg/m², 9 mCi jika BMI 25-30 kg/m², 10 mCi jika BMI 30-35 kg/m², dan 12 mCi untuk pasien dengan BMI >35 kg/m² atau memiliki bidang dada lebar. Dosis injeksi pertama lebih rendah (sekitar seperempat dari dosis total) daripada injeksi kedua (sekitar tiga perempat dari dosis total atau tiga kali lipat dosis pertama). Pada pasien obesitas yang menjalani studi 2-hari, dosis radiasi dapat dioptimalkan dengan melakukan pencitraan uji beban pada hari pertama dan pencitraan istirahat hanya dilakukan jika gambaran pencitraan uji beban abnormal.

Protokol studi 1-hari baik uji beban/istirahat ataupun istirahat/uji beban, jeda antara akuisisi gambar pada studi pertama dan injeksi ^{99m}Tc pada studi kedua saat ini biasanya tidak menggunakan jeda yang lama. Hal ini berbeda dengan era tahun 1990 dimana protokol yang ditetapkan adalah penundaan 2 jam dengan tujuan memungkinkan dosis pertama meluruh dan memaksimalkan rasio kepadatan *count* dan meminimalkan artefak. Namun, meningkatkan aktivitas injeksi kedua pun dapat mencapai rasio kepadatan *count* yang sama dengan membiarkan dosis pertama meluruh (20% dalam 2 jam). Sehingga metode dosis rasio 3:1 dengan penundaan 2 jam dan dosis rasio 3,5-4:1 tanpa penundaan memberikan hasil gambar yang serupa.

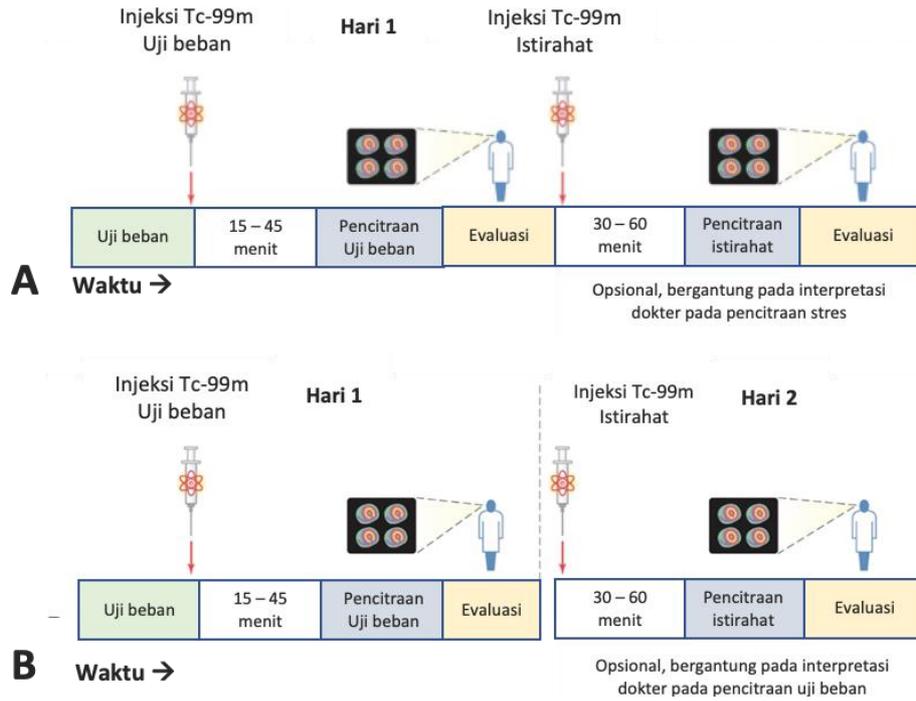
Dengan ^{99m}Tc sestamibi, waktu jeda injeksi radiofarmaka dan akuisisi gambar adalah minimal 15-20 menit untuk uji beban latihan, minimal 60 menit untuk uji beban farmakologis, dan minimal 45-60 menit untuk studi istirahat. Dengan ^{99m}Tc tetrofosmin, waktu jeda injeksi radiofarmaka dan akuisisi gambar adalah minimal 10-15 menit untuk uji beban latihan, minimal 45 menit untuk uji beban farmakologis, dan minimal 30-45 menit untuk studi istirahat. Karena minimalnya redistribusi dengan ^{99m}Tc , waktu jeda injeksi radiofarmaka dan akuisisi gambar yg lebih panjang sampai 2 jam dapat digunakan bila diperlukan.

Dengan ^{201}TI , pada studi uji beban digunakan dosis tunggal 2.5-3.5 mCi yang diinjeksi tepat sebelum puncak uji beban latihan atau pada puncak vasodilatasi pada uji beban farmakologis, dengan jeda injeksi radiofarmaka dan akuisisi gambar adalah 10-15 menit setelah uji beban. Studi redistribusi/istirahat dikerjakan 2.5-4 jam kemudian. Apabila terdapat defek menetap atau reversibilitas minimal, viabilitas miokardium dapat dievaluasi dengan pengambilan studi istirahat pada 18-24 jam setelahnya atau dapat diberikan re-injeksi 1-2 mCi terlebih dahulu pada studi istirahat kedua ini. Alternatif lain adalah protokol untuk penilaian viabilitas miokardium saja, maka injeksi 2,5-3,5 mCi dilakukan pada studi istirahat, kemudian akuisisi gambar redistribusi 3-4 jam atau 18-24 jam setelahnya (**Gambar 1.8**).

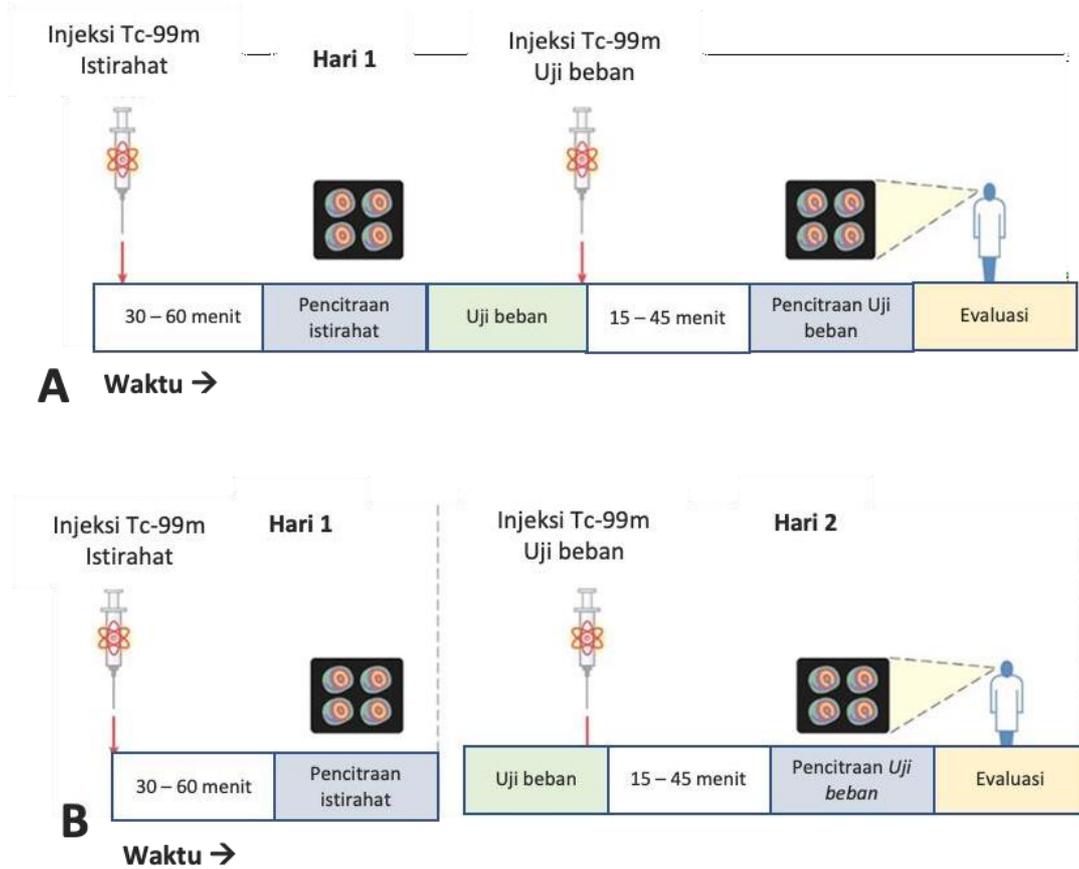
Akuisisi perfusi disarankan menggunakan mode *EKG-gated* dengan menyesuaikan parameter terhadap pasien, scanner, dan pertanyaan klinis. Apabila memungkinkan, rekomendasi pengambilan gambar pada pencitraan perfusi miokardium SPECT adalah:

- Aktivitas radiofarmaka disarankan menggunakan dosis terendah, tanpa menurunkan kualitas gambar,
- Penyesuaian waktu pengambilan gambar berdasarkan aktivitas radiofarmaka, menggunakan pixel maksimum pada kamera,
- Pengambilan gambar dengan 2 posisi, dan
- Pengambilan gambar uji beban terlebih dahulu

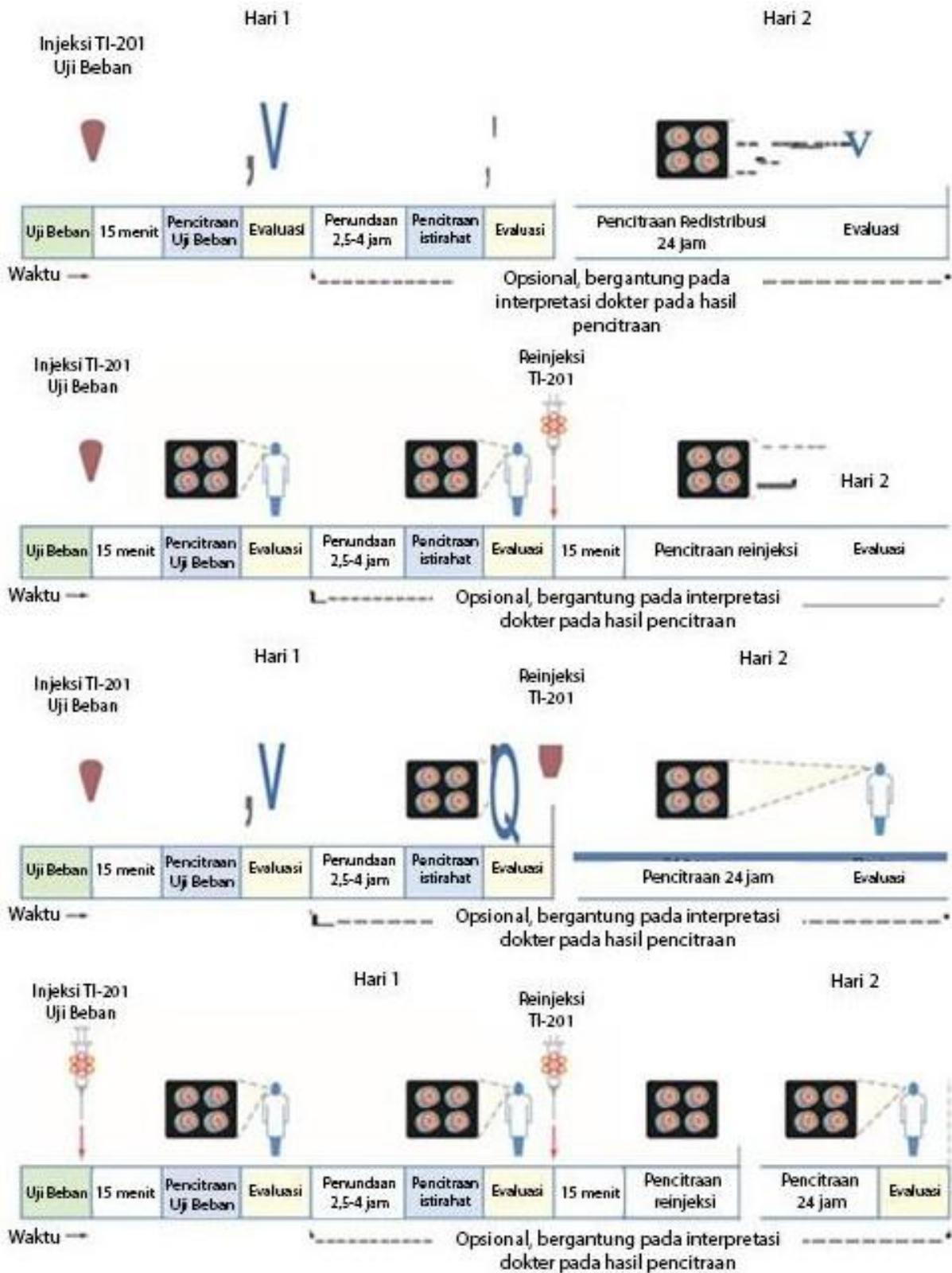
Koreksi atenuasi jaringan lunak dapat meningkatkan spesifisitas penampakan miokardium normal, baik saat penilaian visual maupun semikuantitatif. Pasien disarankan untuk bernapas dangkal seperti biasa. Parameter akuisisi dengan berbagai radiofarmaka dan protokol dan jenis kamera ditampilkan pada **Tabel 1.12 - 1.17**.



Gambar 1.6 Protokol uji beban-istirahat Technetium-99m. Satu hari (A) dan dua hari (B).



Gambar 1.7 Protokol istirahat-uji beban Technetium-99m. Satu hari (A) dan dua hari (B)



Gambar 1.8 Protokol uji beban - istirahat/redistribusi/reinjeksi Thallium-201

Tabel 1.12 Parameter akuisisi protokol 1 hari dengan radiofarmaka Technetium-99m dan kamera Anger

Parameter	Studi pertama (uji beban atau istirahat)*	Studi kedua (istirahat atau uji beban)*
Dosis radiofarmaka	8-12 mci	24-36 mci
Posisi	Terlentang Alternatif: telungkup	Terlentang Alternatif: telungkup
Jeda waktu penyuntikan radiofarmaka - akuisisi gambar	Studi uji beban: 15-60 menit Studi istirahat: 30-60 menit	Studi istirahat: 30-60 menit Studi uji beban: 15-60 menit
Jeda waktu studi pertama dan kedua		30 menit - 4 jam
Rentang energi	Simetris 15-20%, 140 keV	Simetris 15-20%, 140 keV
Tipe akuisisi	Step & shoot Alternatif: kontinyu	Step & shoot Alternatif: kontinyu
Kolimator	Lehr	Lehr
Orbit	180° (45° RAO to 45° LPO)	180° (45° RAO to 45° LPO)
Tipe orbit	Sirkular Ideal: non-sirkular (elips)	Sirkular Ideal: non-sirkular (elips)
Ukuran pixel	3-6 mm	3-6 mm
Matriks	128x128 (minimal 64x64)	128x128 (minimal 64x64)
Jumlah proyeksi	60-64	60-64
Durasi/proyeksi	25 detik	20 detik
ECG-gated	Standar	Standar
Frame/siklus	8 (ideal:16)	8 (ideal:16)
Rentang R-R	20-100%	20-100%

*studi uji beban direkomendasikan dikerjakan terlebih dahulu

Tabel 1.13 Parameter akuisisi protokol 2 hari dengan radiofarmaka Technetium-99m dan kamera Anger

Parameter	Studi uji beban*	Studi istirahat*
Dosis radiofarmaka	18-30 mci (BMI \geq 35 kg/m ²) 8-12 mci (BMI <35 kg/m ²)	18-30 mci (BMI \geq 35 kg/m ²) 8-12 mci (BMI <35 kg/m ²)
Posisi	Terlentang Alternatif: telungkup	Terlentang Alternatif: telungkup
Jeda waktu penyuntikan radiofarmaka - akuisisi gambar	15-60 menit	30-60 menit
Rentang energi	Simetris 15-20%, 140 keV	Simetris 15-20%, 140 keV
Tipe akuisisi	Step & shoot Alternatif: kontinyu	Step & shoot Alternatif: kontinyu
Kolimator	Lehr	Lehr
Orbit	180° (45° RAO to 45° LPO)	180° (45° RAO to 45° LPO)
Tipe orbit	Sirkular Ideal: non-sirkular (elips)	Sirkular Ideal: non-sirkular (elips)
Ukuran pixel	3-6 mm	3-6 mm
Matriks	128x128 (minimal 64x64)	128x128 (minimal 64x64)
Jumlah proyeksi	60-64	60-64
Durasi/proyeksi	25 detik	20 detik
ECG-gated	Standar	Opsional
Frame/siklus	8-16	8-16
Rentang R-R	100%	100%

*studi uji beban direkomendasikan dikerjakan terlebih dahulu

Tabel 1.14 Parameter akuisisi protokol uji dengan radiofarmaka Thallium-201 dan kamera Anger

Parameter	Studi uji beban/redistribusi	Studi istirahat/re-injeksi
Dosis radiofarmaka	2.5-3.0 mci	1.0 mci (re-injeksi)
Posisi	Terlentang Alternatif: telungkup/tegak	Terlentang Alternatif: telungkup/tegak
Jeda waktu penyuntikan radiofarmaka - akuisisi gambar	10-15 menit	20-30 menit
Jeda waktu studi uji beban - studi istirahat		3-4 jam
Rentang energi	Simetris 30%, 70 keV	Simetris 30%, 70 keV
Tipe akuisisi	Step & shoot Alternatif: kontinyu	Step & shoot Alternatif: kontinyu
Kolimator	LEAP	LEAP
Orbit	180° (45° RAO to 45° LPO)	180° (45° RAO to 45° LPO)
Tipe orbit	Sirkular atau non-sirkular	Sirkular atau non-sirkular
Ukuran pixel	6.4+/-0.4 mm	6.4+/-0.4 mm
Matriks	64x64	64x64
Jumlah proyeksi	32-64	32-64
Durasi/proyeksi	40 detik (32 frame) 25 detik (64 frame)	40 detik (32 frame) 25 detik (64 frame)
ECG-gated	Standar	Opsional
Frame/siklus	8-16	8-16
Rentang R-R	100%	100%

Tabel 1.15 Parameter akuisisi protokol 1 hari dengan radiofarmaka Technetium-99m dan kamera Cadmium Zinc Telluride (CZT)

Parameter	Studi pertama (uji beban atau istirahat)*	Studi kedua (istirahat atau uji beban)*
Dosis radiofarmaka	4-6 mci	12-18 mci
Posisi	Terlentang/tegak Alternatif: telungkup	Terlentang/tegak Alternatif: telungkup
Jeda waktu penyuntikan radiofarmaka - akuisisi gambar	Studi uji beban: 15-60 menit Studi istirahat: 30-60 menit	Studi istirahat: 30-60 menit Studi uji beban: 15-60 menit
Jeda waktu studi pertama dan kedua		30 menit - 4 jam
Rentang energi	Simetris 15-20%, 140 keV	Simetris 15-20%, 140 keV
Tipe akuisisi	Kontinyu	Kontinyu
Kolimator	<i>Wide-angle / multi-pinhole</i>	<i>Wide-angle / multi-pinhole</i>
Ukuran pixel	2-3 mm	2-3 mm
Matriks	64x64 (alternatif: 128x128)	64x64 (alternatif: 128x128)
Jumlah proyeksi	N/A	N/A
Waktu akuisisi	5-14 menit	3-6 menit
ECG-gated	Standar (stress)	Standar (stress)
Frame/siklus	8-16	8-16
Rentang R-R	100%	100%

*studi uji beban direkomendasikan dikerjakan terlebih dahulu

Tabel 1.16 Parameter akuisisi protokol 2 hari dengan radiofarmaka Technetium-99m dan kamera Cadmium Zinc Telluride (CZT)

Parameter	Studi uji beban*	Studi istirahat*
Dosis radiofarmaka	9-15 mci (BMI \geq 35 kg/m ²) 4-6 mci (BMI <35 kg/m ²)	9-15 mci (BMI \geq 35 kg/m ²) 4-6 mci (BMI <35 kg/m ²)
Posisi	Terlentang/tegak Alternatif: telungkup	Terlentang/tegak Alternatif: telungkup
Jeda waktu penyuntikan radiofarmaka - akuisisi gambar	15-60 menit	30-60 menit
Rentang energi	Simetris 15-20%, 140 keV	Simetris 15-20%, 140 keV
Tipe akuisisi	Kontinyu	Kontinyu
Kolimator	<i>Wide-angle / multi-pinhole</i>	<i>Wide-angle / multi-pinhole</i>
Ukuran pixel	2.5 mm	2.5 mm
Matriks	64x64 (alternatif: 128x128)	64x64 (alternatif: 128x128)
Jumlah proyeksi	N/A	N/A
Waktu akuisisi	5-14 menit	5-14 menit
ECG-gated	Standar	Opsional
Frame/siklus	8-16	8-16
Rentang R-R	100%	100%

*studi uji beban direkomendasikan dikerjakan terlebih dahulu

Tabel 1.17 Parameter akuisisi protokol 2 hari dengan radiofarmaka Thallium-201 dan kamera Cadmium Zinc Telluride (CZT)

Parameter	Studi uji beban/redistribusi	Studi istirahat/re-injeksi
Dosis radiofarmaka	1.3-1.8 mci	0 0.5 mci (re-injeksi)
Posisi	Terlentang/tegak Alternatif: telungkup	Terlentang/tegak Alternatif: telungkup
Jeda waktu penyuntikan radiofarmaka - akuisisi gambar	10-15 menit	20-30 menit
Jeda waktu studi uji beban - studi istirahat		3-4 jam
Rentang energi	Simetris 30%, 70 keV	Simetris 30%, 70 keV
Tipe akuisisi	Kontinyu	Kontinyu
Kolimator	<i>Wide-angle / multi-pinhole</i>	<i>Wide-angle / multi-pinhole</i>
Ukuran pixel	2.5 mm	2.5 mm
Matriks	128x128 (minimal: 64x64)	128x128 (minimal: 64x64)
Jumlah proyeksi	19/120	19/120
Waktu akuisisi	5-8 menit	5-8 menit
ECG-gated	Standar	Opsional
Frame/siklus	8-16	8-16
Rentang R-R	100%	100%

1.6 Pemrosesan

Hal yang paling penting untuk dievaluasi pasca-akuisisi gambar adalah melihat data tomografi mentah pada mode *endless-loop cine*. Metode ini paling baik dalam mengevaluasi gerakan jantung pasien, mendeteksi keberadaan dan lokasi payudara yang dapat menimbulkan artefak, mendeteksi elevasi diafragma yang mungkin dapat menyebabkan artefak atenuasi, dan menilai aktivitas organ intra-abdominal disekitar jantung yang dapat menimbulkan artefak di sekitar dinding inferior jantung. Evaluasi data mentah topografi jantung dilakukan sebelum pasien keluar dari scanner.

Pada pemeriksaan dengan gated EKG, biasanya evaluasi gambar gerak *cine* dari seluruh data topografi dapat memberikan informasi adanya kegagalan gating EKG yang disebabkan oleh aritmia. Hal ini tampak dengan hilangnya data secara

intermitten sehingga menimbulkan gambar yang “berkedip”. Evaluasi gerak otot miokardium pada gambar *cine* juga dapat dilakukan dengan mengevaluasi gambaran histogram denyut nadi (jumlah detak relatif pada suatu interval R-R), apakah gerak tersebut suatu artefak atau gerakan miokardium yang abnormal. Gambaran histogram juga dapat membantu mendeteksi kesalahan gating yang dapat mengganggu akurasi pengukuran fungsi jantung. Adanya kelainan pada ekstrakardiak juga dapat ditemukan pada saat evaluasi gambar *cine*, seperti adanya kista ginjal, keganasan, hepatosplenomegali, hernia hiatus, dll.

Pemrosesan pencitraan perfusi miokardium SPECT sebaiknya dilakukan secara rekonstruksi iteratif, metode rekonstruksi canggih, koreksi atenuasi (jika memungkinkan), atau pengambilan gambar dengan dua posisi agar kualitas gambar optimal dan meningkatkan akurasi, sesuai rekomendasi *American Society of Nuclear Cardiology* (ASNC).

BAB II

PANDUAN INTERPRETASI PENCITRAAN PERFUSI MIOKARDIUM DENGAN *SINGLE PHOTON EMISSION COMPUTED TOMOGRAPHY*

Sebelum interpretasi gambar, teknologis dan/atau dokter harus memastikan bahwa semua parameter kualitas kamera dapat diterima. Interpretasi gambar perfusi miokardium SPECT harus dilakukan secara sistematis untuk mencakup:

- 1) Evaluasi gambar mentah atau gambar proyeksi intensitas maksimum yang direkonstruksi dalam mode *cine*, dan tinjauan sinogram dan gambar linogram, untuk menentukan keberadaan sumber potensial artefak gambar dan distribusi aktivitas pelacak ekstrakardiak (seperti yang dibahas dalam paragraf sebelumnya);
- 2) Interpretasi gambar sehubungan dengan lokasi, ukuran, keparahan, dan reversibilitas defek perfusi, serta ukuran ruang jantung, dan ada atau tidak adanya peningkatan serapan paru (terutama ^{201}Tl);
- 3) Evaluasi hasil analisis perfusi kuantitatif;
- 4) Evaluasi data fungsional yang diperoleh dari gambar gated; dan
- 5) Pertimbangan data klinis, EKG uji beban dan data hemodinamik yang dapat mempengaruhi interpretasi akhir penelitian.

Semua faktor ini harus dievaluasi secara sistematis sebelum menghasilkan laporan klinis akhir.

2.1 Penilaian Visual

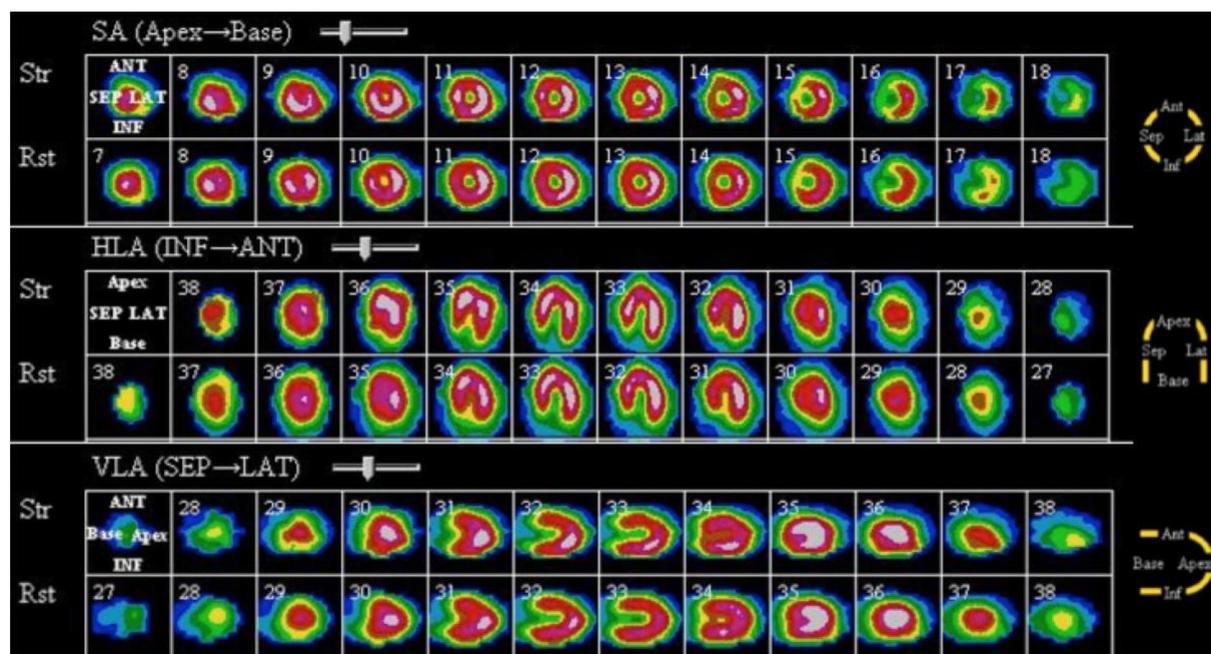
Evaluasi hasil pencitraan perfusi miokardium direkomendasikan untuk dilakukan langsung pada monitor dengan peranti lunak, dan sebaiknya tidak dilakukan menggunakan cetakan film atau kertas. Tabel warna skala abu-abu umumnya lebih disukai daripada tabel warna karena skala abu-abu linier dan memberikan tingkat penyerapan yang lebih konsisten sedangkan sebagian besar skala warna mungkin telah mengatur transisi secara artifisial pada berbagai ambang batas. Namun, pilihan skala abu-abu atau warna juga tergantung pada kebiasaan pembaca. Skala logaritmik dapat digunakan untuk mengevaluasi daerah dengan kepadatan hitungan yang lebih rendah, seperti penyerapan jaringan lunak dan ventrikel kanan, tetapi tidak boleh digunakan untuk interpretasi utama penyerapan regional ventrikel kiri.

2.1.1 Tampilan gambar

Tiga set gambar tomografi harus ditampilkan untuk dievaluasi, yaitu;

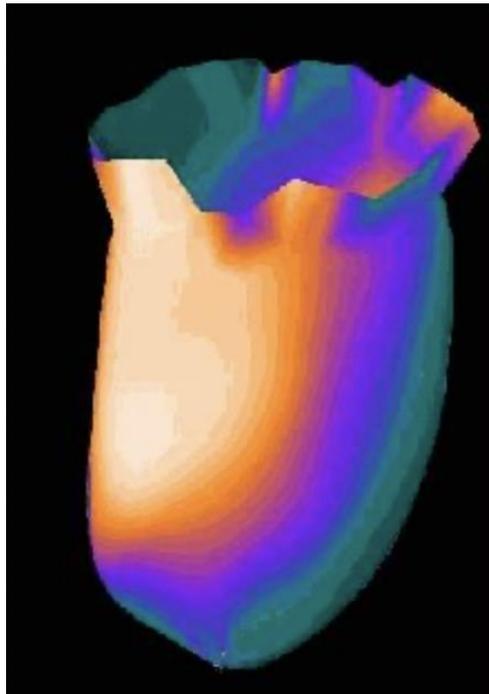
- 1) Sumbu pendek (*short axis*): irisan apikal di kiri dan irisan basal di kanan.
- 2) Sumbu panjang vertikal (*vertical long axis*): irisan septum di kiri dan irisan lateral di kanan.
- 3) Sumbu panjang horizontal (*horizontal long axis*): irisan inferior di kiri dan irisan anterior di kanan.

Tampilan gambar pada laporan diatur untuk memudahkan perbandingan gambar saat uji beban dan istirahat. Gambar ditampilkan secara berurutan dalam satu baris dengan gambar uji beban di baris atas dan istirahat di baris bawah, seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2.1 Penilaian visual. Evaluasi gambar tomografi dilakukan pada tiga set posisi, yaitu sumbu pendek (*short axis*), sumbu panjang horizontal (*horizontal long axis*), dan sumbu panjang vertikal (*vertical long axis*)

Program perangkat lunak komersial memungkinkan pembuatan tampilan 3D perfusi miokardium regional, seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.2**. Tampilan ini dapat membantu pembaca yang kurang berpengalaman mengidentifikasi distribusi koroner yang terkait dengan defek perfusi, tetapi tampilan 3D harus digunakan hanya sebagai tambahan, bukan pengganti, interpretasi gambar konvensional yang dijelaskan sebelumnya



Gambar 2.2 Tampilan 3 dimensi perfusi miokardium

2.1.2 Analisis dan interpretasi awal

Dilatasi ventrikel

Sebelum analisis segmental perfusi miokardium, dilakukan evaluasi volume dan fungsi ventrikel kiri terlebih dahulu, baik saat istirahat atau setelah uji beban. Peningkatan rasio rongga ventrikel kiri saat uji beban dan istirahat, dilatasi iskemik transien (*transient ischemic dilatation-TID*), menunjukkan PAK dengan risiko tinggi. Gambaran TID pada yang diambil pada 30 menit setelah uji beban, menunjukkan adanya dilatasi ventrikel disertai iskemia subendokardial difus atau disfungsi mikrovaskuler. Kondisi ini biasanya dievaluasi pada gambar statis; jika TID terlihat pada penilaian kualitatif, maka rasio TID dapat diukur. Nilai normal bergantung pada protokol pencitraan perfusi, parameter pemrosesan gambar, dan algoritma perangkat lunak yang digunakan. Nilai ambang TID abnormal pada studi dengan uji beban latihan adalah 1,16 sedangkan pada studi dengan uji beban vasodilator adalah 1,22. Untuk menentukan volume ventrikel kiri dan rasio TID yang akurat, penting untuk menentukan batas endokardium dan bidang katup secara akurat dan konsisten pada gambar uji beban dan istirahat. Penentuan bidang katup yang tidak tepat seringkali menyebabkan nilai TID tidak akurat.

Ambilan paru-paru.

Indikator prognosis yang buruk pada pencitraan perfusi ^{201}Tl adalah terdapat peningkatan ambilan paru-paru. Namun, tidak ada konsensus yang jelas mengenai signifikansi ambilan paru-paru pada pencitraan perfusi menggunakan $^{99\text{m}}\text{Tc}$, meskipun hal ini dapat memberikan petunjuk adanya disfungsi sistolik ventrikel kiri pada pasien.

Ambilan ventrikel kanan

Uptake ventrikel kanan dapat dinilai secara kualitatif pada data proyeksi mentah dan pada data yang direkonstruksi. Tidak ada kriteria kuantitatif yang ditetapkan untuk ambilan ventrikel kanan, tetapi ambilan dikatakan tinggi jika intensitas ventrikel kanan kira-kira 50% lebih banyak dari intensitas ventrikel kiri. Ambilan ventrikel kanan meningkat jika terdapat hipertrofi ventrikel kanan (paling sering disebabkan oleh hipertensi pulmonal), atau jika ambilan global ventrikel kiri menurun. Abnormalitas *uptake* ventrikel kanan regional dapat menunjukkan suatu iskemia atau infark. Ukuran ventrikel kanan juga harus diperhatikan, karena dilatasi dapat memberikan petunjuk adanya peningkatan volume jantung kanan karena kondisi tertentu, seperti defek septum atrium atau regurgitasi trikuspid berat.

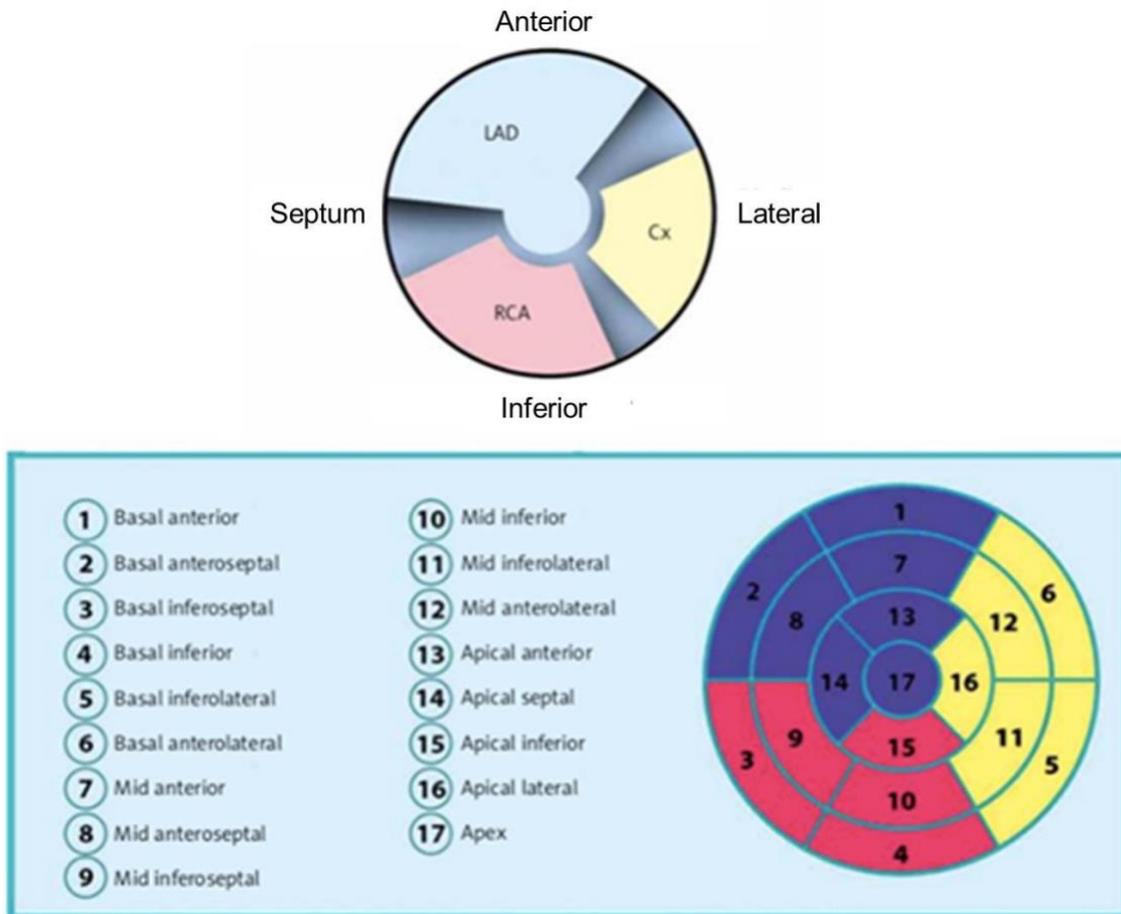
Temuan ekstrakardiak fisiologis dan patologis

Aktivitas radiofarmaka pada pembuluh darah viseral saat uji beban umumnya meningkat setelah pemberian dipiridamol, adenosin, regadenoson, atau dobutamin (karena hiperemia pembuluh darah viseral); Namun, kondisi ini tidak terlalu terlihat pada uji beban latihan meskipun detak jantung telah mencapai lebih dari 85% dari prediksi detak jantung maksimum (karena hiperemia juga terjadi pada otot-otot skeletal). Evaluasi gambar mentah dan pemahaman distribusi *uptake* isotop normal (misalnya: kandung empedu, hepar, usus) membantu untuk mengenali *uptake* ekstrakardiak fokal yang abnormal di payudara, aksila, tiroid, mediastinum, dan perut. Agen ^{201}Tl dan $^{99\text{m}}\text{Tc}$ juga dapat diserap oleh tumor, dan penyerapan ekstrakardiak dapat mencerminkan patologi lain. Namun, belum terdapat evaluasi mengenai sensitivitas dan spesifisitas pencitraan perfusi miokardium pada kondisi ekstrakardiak. Evaluasi gambar mentah juga dapat mengidentifikasi adanya efusi perikardium yang tampak sebagai daerah radiolusen melingkar di sekitar jantung jika jumlahnya banyak.

2.1.3 Analisis dan interpretasi perfusi miokardium

Lokasi defek perfusi

Analisis visual dilakukan untuk mengevaluasi defek perfusi miokardium pada potongan yang direkonstruksi. Lokasi defek perfusi dilaporkan menggunakan model jantung 17 segmen yang secara umum dapat menggambarkan wilayah arteri koroner seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.3**. Namun dominasi arteri koroner dapat bervariasi, sehingga terdapat variasi sumber perdarahan pada suatu area.



Gambar 2.3 Segmentasi ventrikel kiri

Keparahan dan luasnya defek perfusi

Secara kualitatif, penilaian derajat keparahan defek biasanya dinyatakan sebagai ringan, sedang, atau berat. Namun, derajat keparahan defek lebih baik diperkirakan secara semikuantitatif. Defek yang tingkat keparahan dan luasnya tidak berubah antara gambar uji beban-dan-istirahat dikategorikan sebagai defek menetap atau *irreversible*. Ketika defek perfusi lebih parah dan/atau ekstensif pada uji beban

dibandingkan dengan gambar istirahat, deskripsi kualitatif tingkat reversibilitas diperlukan.

2.2 Penilaian Semikuantitatif

Selain evaluasi defek perfusi secara kualitatif, interpretasi juga direkomendasikan untuk dilakukan secara semi kuantitatif yang dapat diterapkan pada penilaian diagnostik dan prognostik dan untuk tatalaksana selanjutnya. Derajat keparahan defek perfusi 17-segmen pada gambar uji beban atau istirahat, dinilai secara semikuantitatif menggunakan skor 0 hingga 4.

Klasifikasi derajat keparahan defek perfusi pada setiap segmen miokardium adalah sebagai berikut:

- Skor 0: normal perfusi
- Skor 1: penurunan ringan (penurunan 10-<25% hitungan)
- Skor 2: penurunan moderat (penurunan 25-50% hitungan)
- Skor 3: penurunan berat (penurunan \geq 50% hitungan)
- Skor 4: tidak tampak perfusi

Luasnya defek dapat digambarkan secara semikuantitatif sebagai:

- Kecil: melibatkan 1-2 segmen
- Sedang: melibatkan 3-4 segmen
- Besar: melibatkan segmen \geq 5

Di samping itu, defek kecil, sedang, dan besar masing-masing melibatkan <10%, 10-20%, dan \geq 20% dari LV.

Penggunaan sistem penilaian memberikan penilaian semikuantitatif yang dapat direproduksi dari derajat keparahan dan luasnya defek. Pendekatan yang konsisten untuk derajat keparahan dan luas defek secara klinis penting karena kedua variabel mengandung informasi prognostik independen. Poin diberikan ke setiap segmen sesuai dengan kepadatan hitungan segmen.

2.2.1 Summed Stress Score (SSS)

Selain skor segmental, skor juga dijumlahkan lalu dihitung persentase matriks miokardium dan luas iskemia. *Summed stress score* (SSS) merupakan jumlah skor individu dari 17 segmen ventrikel kiri (**Gambar 2.4**) yang diperoleh selama uji beban jantung, termasuk didalamnya kondisi iskemia ataupun infark. Ketika jumlah SSS <4, perfusi dianggap normal atau abnormal minimal (tidak ada gangguan perfusi yang signifikan); SSS 4-8 menunjukkan perfusi abnormal ringan; SSS 9-13 perfusi abnormal sedang; dan SSS >13 menunjukkan adanya iskemia yang signifikan (**Tabel 3.2**).

$$\text{Persentase area iskemia saat uji beban} = \frac{\text{SSS}}{4 (\text{skor tertinggi}) \times 17 (\text{segmen})} \times 100\%$$

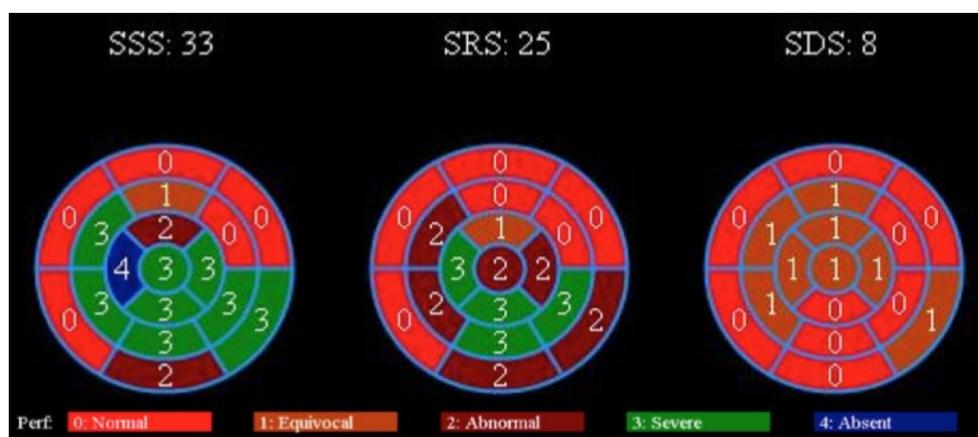
2.2.2 Summed Rest Score (SRS)

Summed rest score (SRS) merupakan penjumlahan skor istirahat dari semua segmen, dan menggambarkan besarnya defek perfusi yang terjadi. Luas dan derajat infark miokardium dapat dinilai melalui skor ini, namun skor ini juga dipengaruhi oleh miokardium yang berhibernasi.

$$\text{Persentase area infark} = \frac{\text{SRS}}{4 (\text{skor tertinggi}) \times 17 (\text{segmen})} \times 100\%$$

2.2.3 Summed Difference Score (SDS)

Summed difference score (SDS) adalah selisih antara SSS dan SRS, dan merupakan ukuran reversibilitas defek perfusi, yang mencerminkan adanya iskemia yang terinduksi oleh uji beban.



Gambar 2.4 Penilaian semikuantitatif menggunakan peranti lunak 4DM.

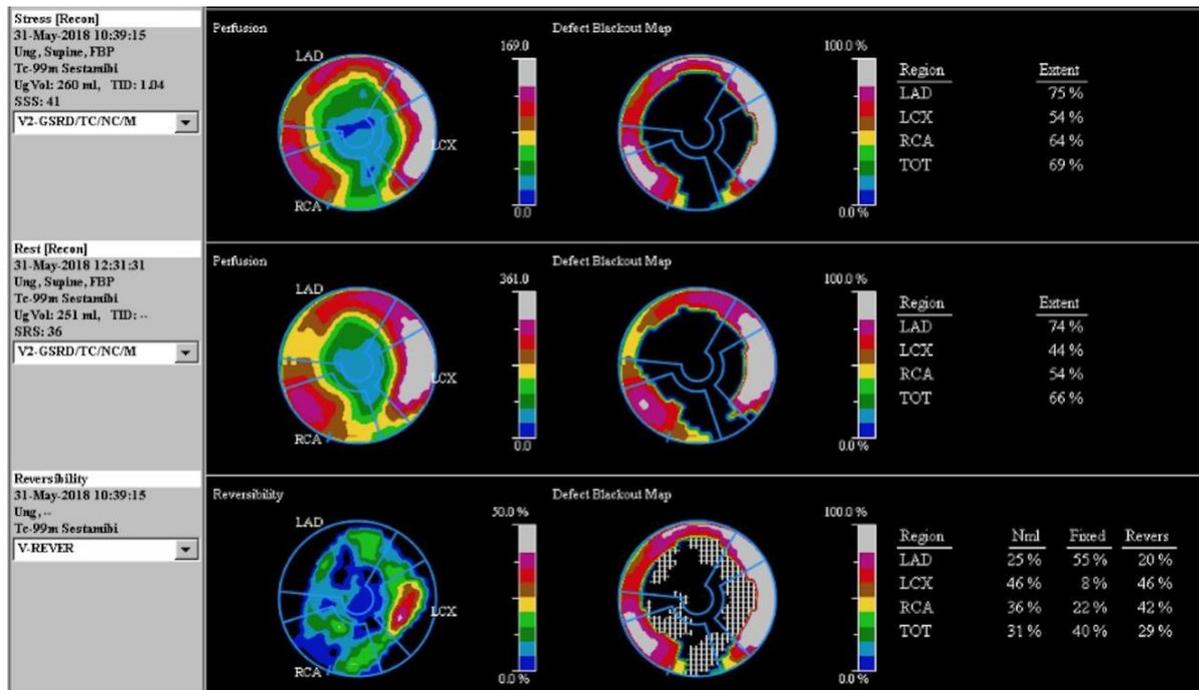
2.2.4 Beban iskemia (*Ischemic burden*)

Beban iskemia didapatkan dari SDS dibagi skor ambilan maksimal kemudian dikalikan 100%. Untuk model 17-segmen dengan skema skor 0 sampai 4, skor maksimal yang mungkin adalah 68 (17 x 4). Beban iskemia <10% menunjukkan iskemia ringan sedangkan beban iskemia ≥10% menunjukkan iskemia sedang-berat (iskemia signifikan).

$$\text{Persentase area iskemia} = \frac{\text{SDS}}{4 (\text{skor tertinggi}) \times 17 (\text{segmen})} \times 100\%$$

2.3 Penilaian kuantitatif

Interpretasi secara kuantitatif dilakukan dengan melakukan analisis sirkumferensial dari aktivitas relatif radiofarmaka pada setiap piksel gambar tomogram potongan *short axis* yang dibandingkan dengan standar normal yang telah ditetapkan. Sistem perangkat lunak juga menghasilkan analisis *bull's-eye* atau *polar maps* yang mengilustrasikan perfusi dari 3 dimensi miokardium menjadi tampilan 2 dimensi. Data kuantitatif juga dapat dihasilkan dari abnormalitas perfusi secara global, abnormalitas perfusi secara teritori vaskular, dan luasnya reversibilitas ataupun defek tetap. *Black-out map* menampilkan bagian piksel mana saja yang nilainya dibawah standar normal sebagai daerah berwarna hitam, sedangkan reversibilitas diperlihatkan sebagai daerah berwarna putih pada gambar saat istirahat. Luasnya abnormalitas juga ditampilkan sebagai persentase dari daerah teritori vaskular atau sebagai persentase dari seluruh ventrikel kiri, disebut sebagai *perfusion defect size* (PDS) seperti diilustrasikan pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2.5 Tampilan *bull's eye* atau *polar map*

2.4 Viabilitas miokardium

Deteksi perfusi miokardium penting untuk mengidentifikasi pasien PAK dengan disfungsi ventrikel kiri berat yang mungkin mendapatkan manfaat dari revaskularisasi arteri koroner. Perfusi miokardium pada ventrikel kiri dengan disfungsi sistolik berat dapat menunjukkan gambaran normal (pada kardiomiopati non-iskemik atau balans iskemia PAK) atau abnormal (akibat hibernasi miokardium atau jaringan skar). Miokardium yang mengalami hipoperfusi dan disfungsi dapat disebabkan oleh infark (tidak aktif secara metabolik) atau berhibernasi (aktif secara metabolik). Miokardium yang hibernasi berpotensi mengalami peningkatan fungsi dengan stimulasi inotropik atau revaskularisasi koroner. Adanya serapan radiofarmaka ^{99m}Tc dan ^{201}Tl menunjukkan integritas dinding sel miosit dan fungsi mitokondria (^{99m}Tc), yang menunjukkan viabilitas. Sementara, serapan $^{18}\text{F-FDG}$ mencerminkan adanya aktivitas metabolisme glukosa pada miokardium.

Seperti halnya luas iskemia, viabilitas miokardium dapat dinilai secara kualitatif, semi kuantitatif, dan kualitatif. Evaluasi kualitatif menggunakan beberapa parameter. Ambilan miokardium yang normal dan adanya iskemia yang terinduksi saat uji beban pada pencitraan perfusi miokardium dengan ^{99m}Tc menunjukkan miokardium yang viabel. Dengan kata lain, segmen miokardium yang mengalami hipoperfusi lalu perbaikan setelah pemberian nitrat atau adanya cadangan kontraksi setelah

pemberian dobutamin dosis rendah juga menunjukkan adanya viabilitas. Saat melakukan protokol pencitraan perfusi miokardium dengan ^{99m}Tc , dianjurkan untuk memberikan nitrogliserin sublingual 0,4-0,8 mg sebelum injeksi ulang untuk mengoptimalkan identifikasi miokardium iskemia. Protokol ini dapat dilakukan pada pasien yang diketahui memiliki pembuluh darah kolateral melalui angiografi koroner invasif.

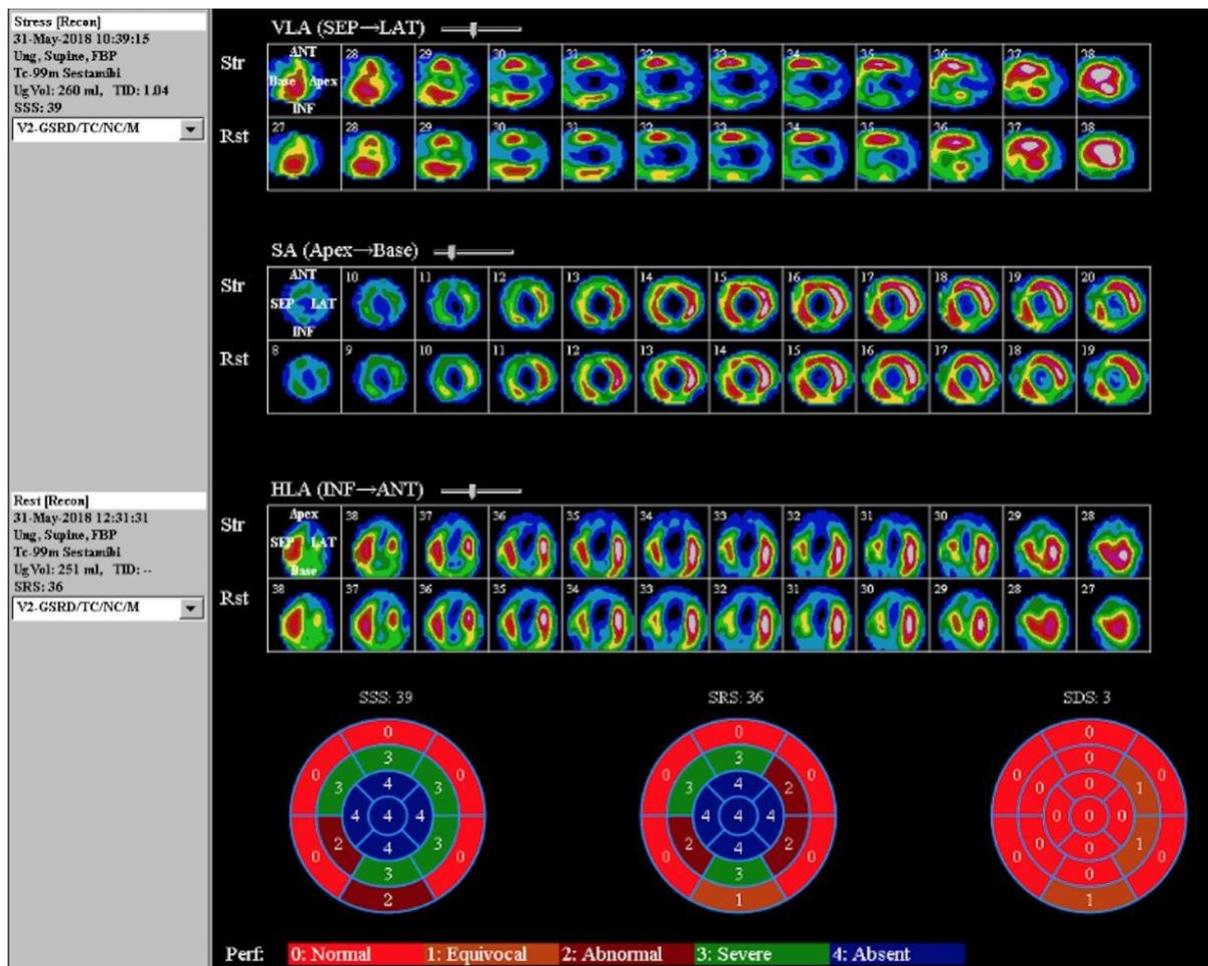
Evaluasi viabilitas secara semikuantitatif dapat dilihat pada gambar istirahat, injeksi ulang, atau redistribusi, dengan kategori sebagai berikut:

- Perfusi normal (skor 0) - segmen viabel
- Hipoperfusi ringan (skor 1) - segmen viabel
- Hipoperfusi sedang (skor 2) - segmen kombinasi viabel dan nonviabel
- Hipoperfusi berat (skor ≥ 3) - segmen nonviable

Secara kuantitatif, jika serapan radiofarmaka $\leq 50\%$ maka segmen tersebut non-viabel, sedangkan jika serapan radiofarmaka $>50\%$ maka segmen tersebut viabel (**Tabel 2.1**). Contoh miokardium yang viabel dan nonviabel ditunjukkan pada **Gambar 2.6**.

Tabel 2.1 Viabilitas miokardium berdasarkan radiofarmaka SPECT yang digunakan

Radiofarmaka	Karakteristik	Penanda Viabilitas
^{201}Tl	Perfusi, integritas sel membran	<ul style="list-style-type: none"> ● Aktivitas radiotracer $> 50\%$ ● Redistribusi $> 10\%$
^{99m}Tc	Perfusi, integritas sel membran, mitokondria intak	<ul style="list-style-type: none"> ● Aktivitas radiotracer $> 50\%$ ● Ischemia yang terinduksi



Gambar 2.6 Segmen miokardium viabel dan nonviabel. Miokardium disebut viabel jika pada saat studi istirahat memiliki ambilan radiofarmaka yang normal hingga >50% (skor 0,1, atau 2), dan non viabel jika pada saat studi istirahat berupa defek menetap berat (skor 3 atau 4).

Sebagai simpulan, viabilitas miokardium dapat ditentukan jika terdapat:

1. Terdapat iskemia yang terinduksi saat uji beban pada miokardium dengan disfungsi sistolik
2. Terdapat kuantifikasi perfusi saat istirahat baik (>50-60% dari miokardium kontralateral) pada miokardium dengan disfungsi sistolik.
3. Terdapat redistribusi ²⁰¹Tl saat istirahat pada miokardium dengan disfungsi sistolik.

2.5 Artefak

Artefak atenuasi dan koreksi atenuasi

Artefak atenuasi biasanya memberikan gambar yang menyerupai defek menetap, namun dapat pula berupa pseudo-reversible defek perfusi. Identifikasi artefak atenuasi sebaiknya menggunakan tampilan *cine* pada gambar proyeksi planar.

Organ yang paling sering menyebabkan artefak atenuasi adalah diafragma pada pria dan payudara pada wanita. Kedua defek tersebut dapat dikonfirmasi apakah benar suatu defek atau hanya artefak dengan cara penilaian gerakan pada segmen-segmen tersebut. Artefak atenuasi payudara juga dapat dibedakan dengan defek perfusi iskemia dengan cara pengulangan akuisisi setelah reposisi payudara kiri. Artefak atenuasi karena diafragma dan payudara dapat dihindari dengan posisi telungkup atau dikurangi dengan posisi berdiri saat pencitraan.

Artefak rekonstruksi

Gambaran ekstrakardiak dengan serapan tinggi di dekat jantung (misalnya, hepar yang bertumpang tindih dengan miokardium) dapat menyebabkan peningkatan serapan di miokardium yang berdekatan dengan struktur ekstrakardiak tersebut. Kondisi ini dapat menutupi defek perfusi, atau disalahartikan sebagai defek perfusi pada segmen *remote* miokardium, karena area miokardium yang tumpang tindih dengan *hotspot* terbaca normal oleh peranti lunak. Aktivitas ekstrakardiak yang berdekatan tetapi tidak tumpang tindih, juga dapat menyebabkan artefak rekonstruksi negatif yang mengakibatkan penurunan aktivitas di segmen miokardium yang berdekatan. Beberapa metode untuk mengurangi serapan ekstrakardiak adalah konsumsi makanan, air, susu, atau menunda pencitraan, sehingga radiofarmaka tersebut terekskresi melalui empedu.

2.6 Penilaian SPECT dengan EKG-gated

SPECT dengan EKG-gated adalah teknik pencitraan nuklir yang umum digunakan untuk menilai fungsi global dari ventrikel kiri. Teknik pencitraan ini dapat membedakan antara gambaran yang benar menunjukkan adanya iskemik atau hanya karena artefak. Dengan teknik ini kita dapat membedakan antara fase diastol dan sistol, dimana pada fase sistol gambar tomogram akan tampak lebih terang dan tebal. Analisis gambar dari SPECT dengan EKG-gated dapat secara visual maupun kuantitatif. Analisis secara visual berdasarkan intensitas serapan dari radiofarmaka yang tampak pada gambar tomogram pada fase diastol dan fase sistol. Analisis secara kuantitatif yang dapat mengkalkulasikan volume darah saat akhir diastol dan akhir sistol sehingga dapat dihitung ejeksi fraksi ventrikel kiri.

Perangkat lunak akan menentukan batas epikardial dan endokardial secara otomatis, serta menghitung volume ventrikel dan fraksi ejeksi. Penentuan segmen

basal ventrikel kiri sangat penting, karena pemilihan bidang katup yang salah dapat mengakibatkan kesalahan dalam penghitungan volume dan fraksi ejeksi. Kesalahan gating dapat menyebabkan distorsi kurva, sehingga kita perlu mengevaluasi kurva volume-waktu.

Gerakan dinding regional diinterpretasi menggunakan nomenklatur standar, yaitu; normal, hipokinesia, akinesia, dan diskinesia. Hipokinesia diklasifikasikan menjadi ringan, sedang, atau berat. Interpretasi gerakan dinding juga dapat dilakukan secara semikuantitatif, yaitu;

- Kinetik normal: skor 0
- Hipokinetik ringan: skor 1
- Hipokinetik sedang: skor 2
- Hipokinetik berat: skor 3
- Akinetik: skor 4
- Diskinetik: skor 5

Perangkat lunak juga dapat memberikan interpretasi secara semikuantitatif, namun dokter tetap harus memvalidasi dan melakukan evaluasi ulang penilaian tersebut. Terdapat variasi normal dan abnormal dalam gerakan dinding miokardium, seperti penurunan gerakan dinding di basal dibandingkan dengan apeks, serta adanya gerakan yang lebih masif pada dinding lateral basal dibandingkan dengan septum basal. Evaluasi gerakan dan penebalan dinding, dilakukan bersamaan dan dinyatakan sebagai satu kesatuan skor. Gerakan septum disebut paradoks jika perfusi septum normal namun gerakan dinding tampak abnormal pada *polar map* kuantitatif. Selain mencatat gerakan, penebalan dinding, dan fraksi ejeksi ventrikel kiri, fungsi ventrikel kanan juga harus diperhatikan.

2.7 Peranti Lunak

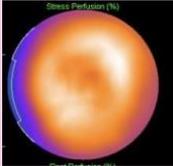
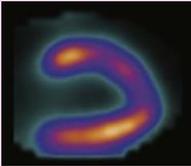
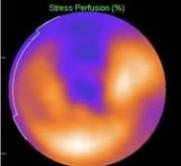
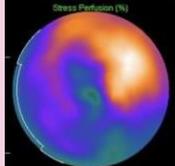
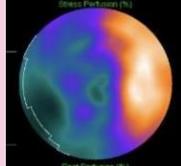
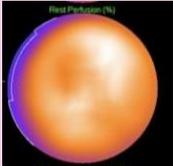
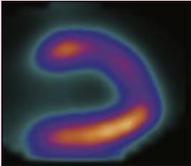
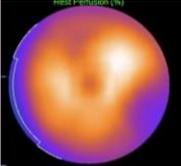
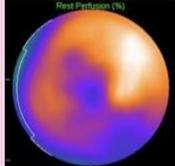
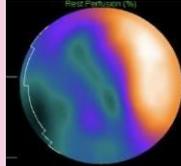
Terdapat tiga perangkat lunak komersial yang banyak digunakan untuk pengukuran otomatis SPECT, yaitu *Quantitative Perfusion SPECT* (QPS, Cedars-Sinai Medical Center, Los Angeles, CA, USA), *Emory Cardiac Toolbox* (ECTb, Emory University, Atlanta, GA, USA), dan *4 Dimension-Myocardial SPECT* (4DM, University of Michigan, Ann Arbor, MI, AS). Namun, dalam suatu studi tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara perangkat lunak dalam mengukur defek perfusi dan fungsi ventrikel kiri, serta dalam menentukan beban iskemik kecil, sedang, atau besar.

Namun, sebaiknya menggunakan perangkat lunak yang sama untuk menilai monitoring evaluasi dengan pencitraan serial.

2.8 Interpretasi akhir berdasarkan klinis dan data uji beban

Hasil interpretasi SPM SPECT dapat menyimpulkan status iskemia dan status viabilitas. Iskemia terinduksi akan tampak sebagai defek reversibel baik parsial atau komplit. Penjelasan iskemia perlu dijabarkan pula ukuran, luas, dan derajat iskemia (persentasi miokardium abnormal, iskemia, atau infark). Evaluasi defek perfusi harus dikonfirmasi dengan gerakan miokardium untuk membedakan dengan artefak. Infark atau miokardium yang non-viabel akan tampak sebagai defek menetap atau *uptake* radiofarmaka $\leq 50\%$. Interpretasi perfusi miokardium dirangkum dalam **Tabel 2.2**.

Tabel 2.2 Interpretasi perfusi miokardium SPECT

Interpretasi	Normal	Artefak atenuasi	Iskemia terinduksi/viabel		Infark/Non-viabel
Uji beban					
Istirahat					
Perfusi	Tidak ada defek	Defek menetap	Defek reversibel komplit	Defek reversibel parsial	Defek menetap
Kinetik	Normal	Normal	Normal/ abnormal	Normal/ abnormal	Abnormal

Lebih lanjut, data luas iskemia dan viabilitas membantu klinisi untuk diagnosis, stratifikasi risiko, dan tatalaksana PAK. Jika ditemukan stratifikasi risiko tinggi maka pasien selanjutnya dapat menjalani revaskularisasi sesuai indikasi.

Terdapat beberapa kriteria tambahan risiko tinggi mortalitas berdasarkan hasil pencitraan perfusi miokardium dengan SPECT, yaitu:

1. Defek perfusi menetap dan/atau defek reversibel >15% dari massa ventrikel kiri,
2. Terdapat *transient ischemic dilatation* (TID) pada ventrikel kiri,
3. *Stunning* ventrikel kiri yang tercetus oleh uji beban disertai penurunan fraksi ejeksi ventrikel kiri pasca ujibeban,
4. *Uptake* sementara radiofarmaka oleh ventrikel kanan,
5. Peningkatan *uptake* radiofarmaka oleh paru-paru.

Definisi dari TID adalah adanya pembesaran relatif ventrikel kiri pasca stres dibandingkan saat istirahat. Terdapat variabilitas *cut-off* TID yang dikatakan abnormal, yaitu berkisar antara 1.0-1.36. Terdapat beberapa postulasi penyebab fenomena tersebut, namun belum ada konsensus yang jelas mengenai patofisiologi TID. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa TID pada pasien dengan defek perfusi miokardium yang reversibel dikaitkan dengan peningkatan risiko PAK multivaskular yang berat dan luas. Selain itu, TID abnormal juga dikaitkan dengan peningkatan risiko dan luaran kardiovaskular yang buruk. Apabila TID ditemukan pada pasien dengan perfusi normal, maka hal ini menunjukkan adanya ***balanced ischemia***, yaitu terdapat PAK dengan lesi multivessel berat dan penurunan aliran darah koroner namun hasil perfusi normal. Oleh karena itu, interpretasi perfusi miokardium harus diintegrasikan dengan data klinis, EKG, dan respon hemodinamik terhadap uji beban dan skor kalsium untuk meningkatkan kecurigaan terhadap adanya *balanced ischemia*.

Namun, beberapa penelitian lain menunjukkan bahwa TID dapat terjadi pada pasien dengan perfusi normal dan tidak ada PAK yang signifikan; misalnya pada pasien dengan non-iskemik kardiomiopati, kardiomiopati hipertrofik, penyakit jantung hipertensi, dan hipertrofi ventrikel kiri lainnya.

Sehingga, TID dikatakan sebagai penanda yang spesifik namun tidak sensitif untuk mendeteksi penyakit jantung koroner yang parah dan luas dengan sensitivitas sebesar 44% dan spesifisitas sebesar 88% pada suatu meta-analisis. Hingga saat ini, terdapat berbagai perbedaan mengenai interpretasi TID, namun, jika terdapat TID dan hasil perfusi menunjukkan risiko tinggi, maka pasien perlu dipertimbangkan untuk menjalani angiografi koroner invasif. Dilain pihak, karena spesifisitasnya tinggi, jika terdapat TID pada pasien dengan defek perfusi dengan risiko tidak tinggi (SSS <4),

maka kemungkinan besar evaluasi selanjutnya dapat dilakukan angiografi secara non-invasif.

Keberadaan TID menunjukkan indikator prognosis yang buruk, dan risiko meningkat secara signifikan pada pasien baik yang terdapat defek perfusi maupun perfusi normal dengan komorbid (diabetes melitus) atau ejeksi fraksi menurun saat uji beban. Oleh karena itu, TID harus dianggap sebagai penanda risiko tinggi untuk tatalaksana klinis lanjutan pada pasien yang diduga atau diketahui memiliki penyakit arteri koroner.

Jika terdapat ketidaksesuaian antara data, misalnya SPM tampak normal namun disertai kriteria risiko tinggi saat uji beban, maka sebaiknya dipertimbangkan pemeriksaan anatomi koroner lebih lanjut. Kriteria risiko tinggi saat uji beban adalah:

1. Penurunan tekanan darah sistolik ≥ 10 mmhg saat latihan,
2. Timbul elevasi segmen ST > 1 mm di sadapan tanpa gelombang Q,
3. Depresi segmen ST horizontal atau *downsloping* > 3 mm,
4. Depresi segmen ST berkepanjangan,
5. Depresi segmen ST pada beban latihan rendah,
6. Depresi segmen ST pada multipel lead, atau
7. Takikardia ventrikel berkelanjutan.

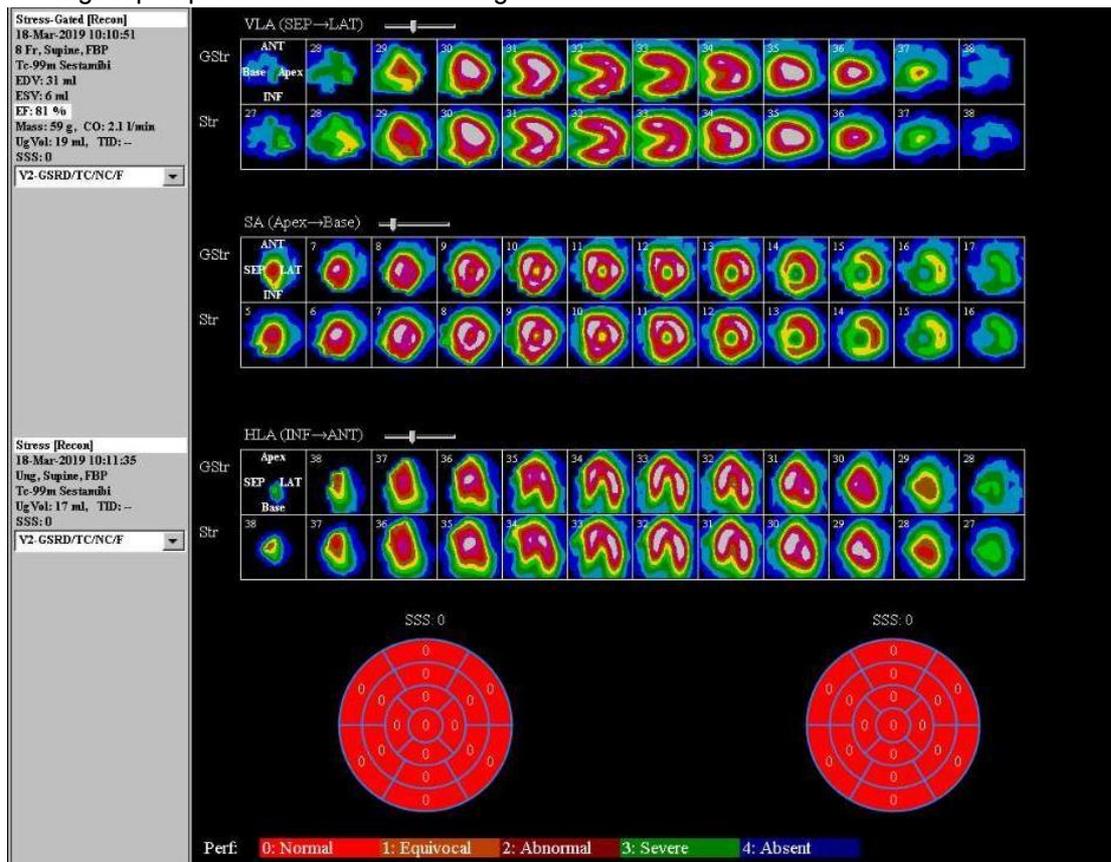
2.9 Contoh Interpretasi

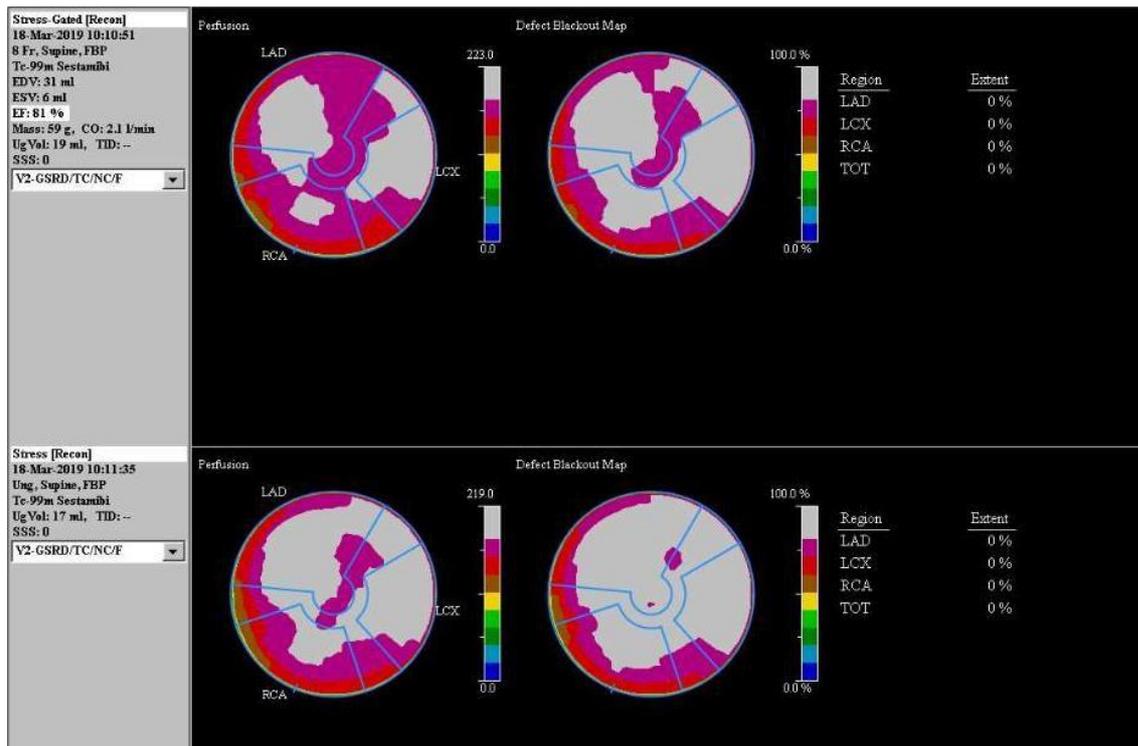
Contoh Interpretasi 1

Protokol fase uji beban-istirahat dalam satu hari: radioisotop ^{99m}Tc tetrofosmin dengan dosis 8 mCi saat uji beban dan 24 mCi saat istirahat.

Fase uji beban dengan ergocycle: mampu dilakukan selama 8 menit 35 detik, TD 135/85 → 180/80 mmHg, nadi 72 → 95 x/menit, tercapai 92% dari prediksi laju nadi maksimum, uji beban dihentikan karena pasien kelelahan, keluhan: tidak ada nyeri dada atau sesak. EKG: normal sinus ritme, tidak terdapat perubahan ataupun aritmia.

Perangkat pemrosesan: 4 DM. Kualitas gambar: baik





Temuan

- Tidak terdapat defek perfusi (*no perfusion defect*) pada uji beban
- SSS 0, beban iskemik 0%
- EDV 31 mL, ESV 6 mL, EF 81%, global normokinetik

Impresi Klinis

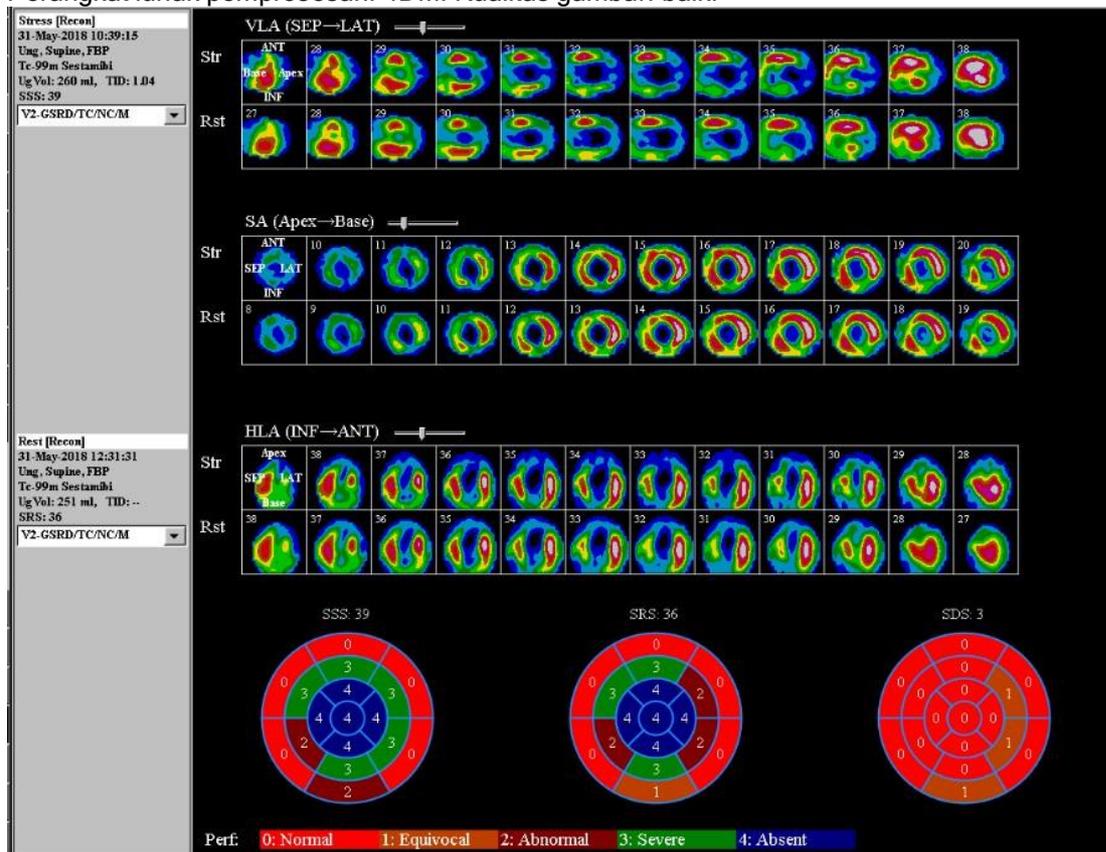
Perfusi miokardium normal pada uji beban

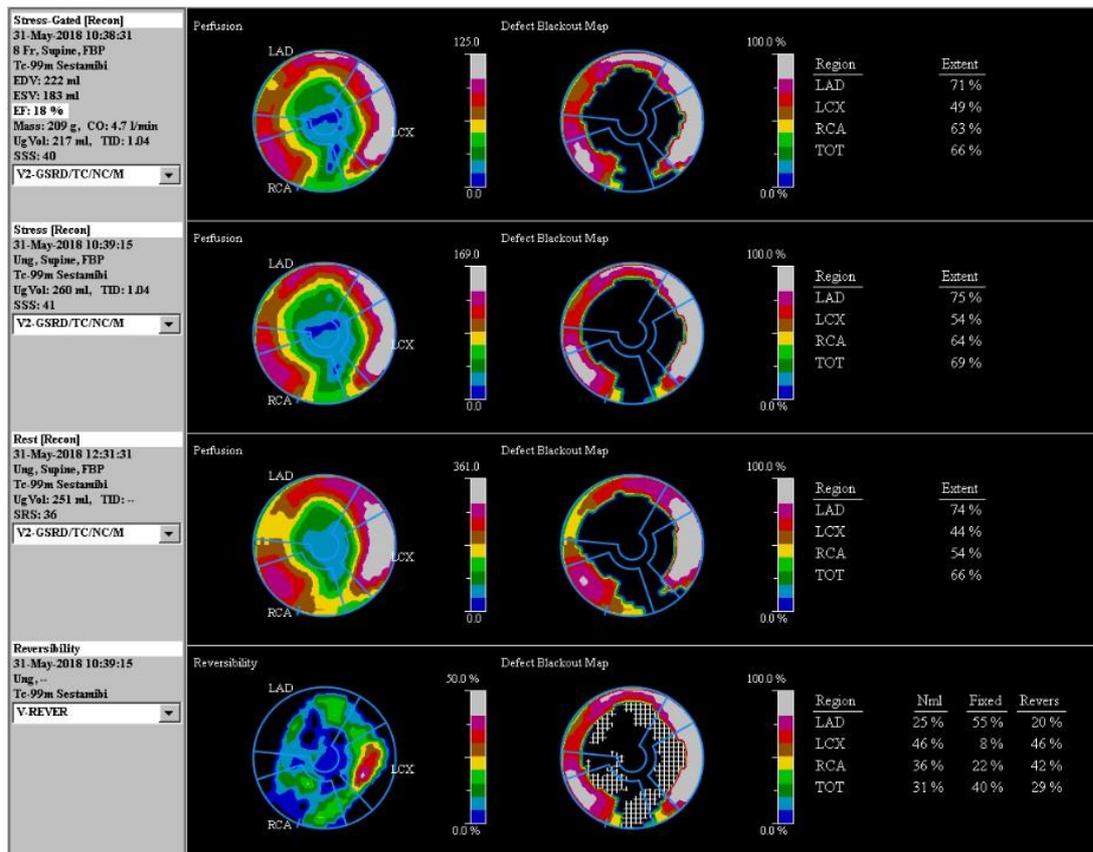
Contoh Interpretasi 2

Protokol fase uji beban-istirahat dalam satu hari: radioisotop ^{99m}Tc tetrafosmin dengan dosis 10 mCi saat uji beban dan 30 mCi saat istirahat.

Fase uji beban dengan adenosin, dosis 140 mcg/kgBB/menit selama 6 menit: TD 135/80 \rightarrow 121/83, nadi 88 \rightarrow 102 x/menit, keluhan: rasa hangat di wajah dan dada, perubahan EKG: (-), aritmia (-).

Perangkat lunak pemrosesan: 4DM. Kualitas gambar: baik.





Temuan

- Defek menetap berat (**severe fixed defect**) pada apex, apicoseptal, mid anteroseptal, mid-apicoanterior LAD), mid-apicoinferior (RCA), apicolateral (LCx) -- *non-viabel*
- Defek menetap sedang (**moderate fixed defect**) pada mid inferoseptal (RCA) -- *viabel*
- Defek reversibel sebagian (**partial reversible defect**) pada mid anterolateral, mid inferolateral (LCx), mid inferior (RCA) -- *viabel dengan iskemia*
- SSS 39, SRS 36, SDS 3, beban iskemik 4,4%
- EDV 222 mL, ESV 183 mL, EF 18%, TID 1,04

Impresi Klinis

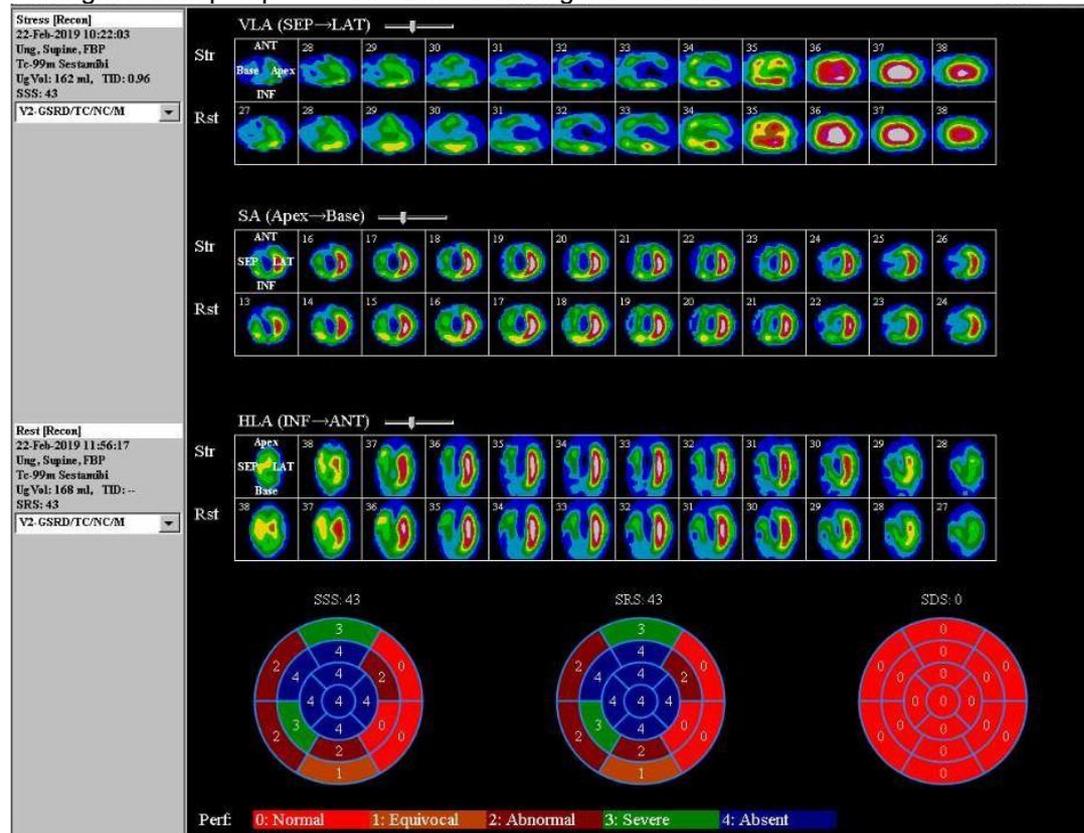
Kardiomiopati iskemik tanpa viabilitas pada sebagian besar teritori LAD, sebagian kecil teritori LCx dan RCA, dengan iskemia ringan (<10%) pada teritori LCx dan RCA.

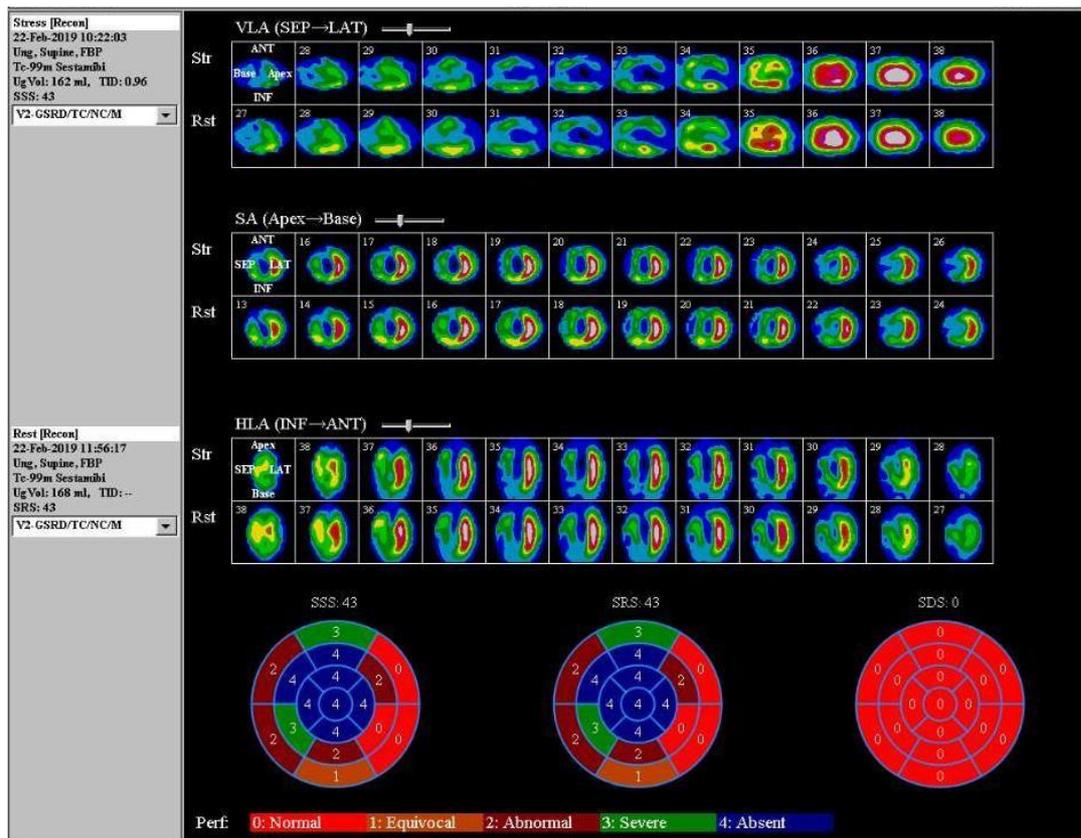
Contoh Interpretasi 3

Protokol fase uji beban-istirahat dalam satu hari: radioisotop ^{99m}Tc tetrofosmin dengan dosis 10 mCi saat uji beban dan 30 mCi saat istirahat.

Fase uji beban dengan adenosin, dosis 140 mcg/kgBB/menit selama 6 menit: TD 142/83 mmHg → 128/85 mmHg, nadi 75 → 92 x/menit, keluhan: sesak napas, nyeri dada (-), perubahan EKG (-), artimia (-).

Perangkat lunak pemrosesan: 4DM. Kualitas gambar: baik.





Temuan

- Defek menetap berat (**severe fixed defect**) pada apex, apicoseptal, mid anteroseptal, basal-apicoanterior (LAD), apicoinferior, mid inferoseptal (RCA), apicolateral (LCx) -- *non-viabel*
- Defek menetap ringan-sedang (**mild-moderate fixed defect**) pada basal anteroseptal (LAD), basal inferoseptal, basal-mid inferior (RCA), mid anterolateral (LCx) -- *viabel*
- SSS 43, SRS 43, SDS 0, beban iskemik 0%
- EDV 144 mL, ESV 111 mL, EF 23%, TID 0,96

Impresi Klinis

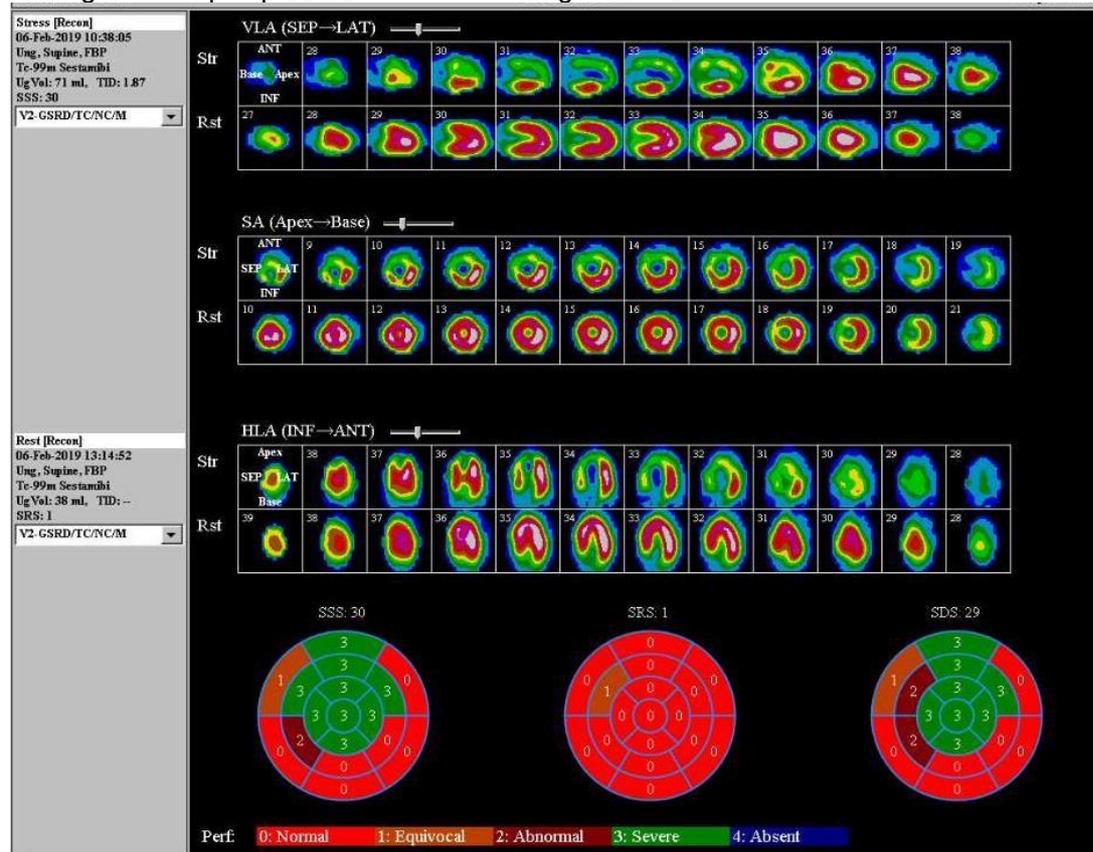
Kardiomiopati iskemik tanpa viabilitas pada sebagian besar teritori LAD, sebagian kecil teritori RCA dan LCx, dan tanpa beban iskemia

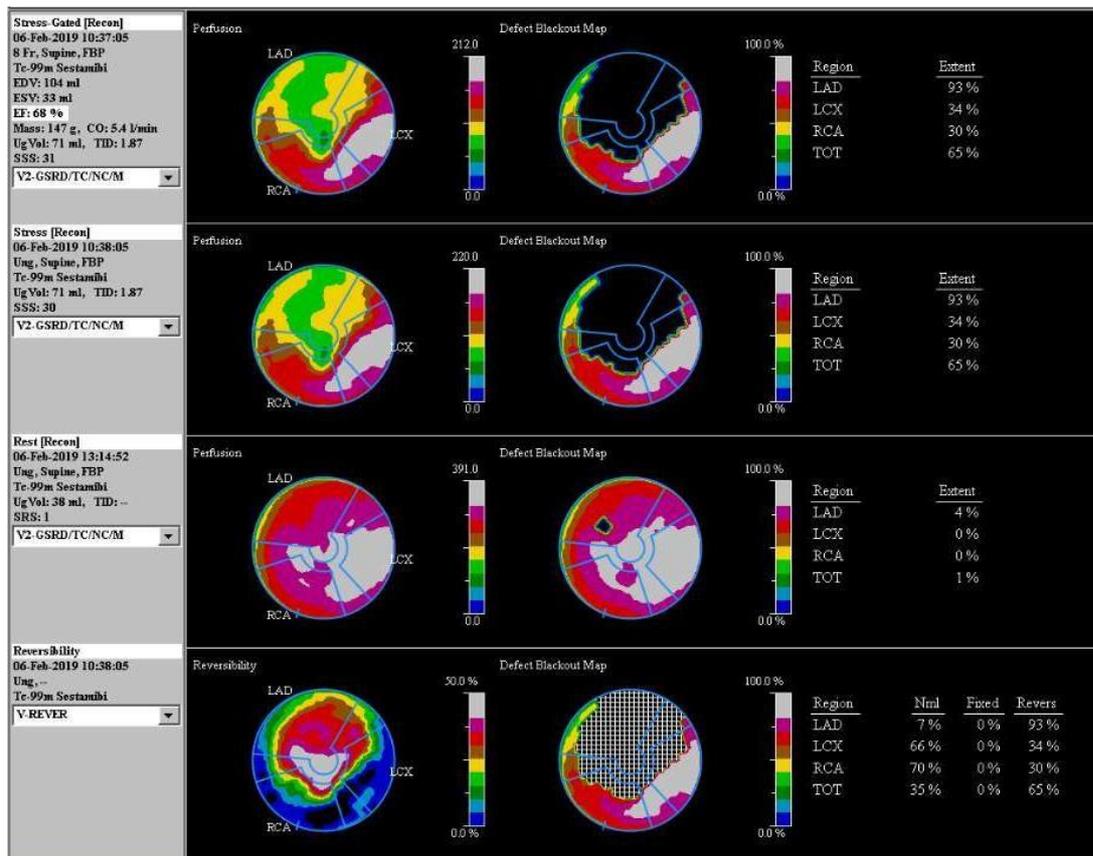
Contoh Interpretasi 4

Protokol fase uji beban-istirahat dalam satu hari: radioisotop ^{99m}Tc tetrofosmin dengan dosis 8 mCi saat uji beban dan 24 mCi saat istirahat.

Fase uji beban dengan ergocycle, mampu dilakukan selama 5 menit 40 detik: TD 142/83 → 190/100 mmHg, nadi 83 → 125 x/menit, tercapai 75% dari prediksi maksimum laju nadi dengan keluhan nyeri dada tipikal, sesak napas, pusing, perubahan EKG: depresi ST 1,5 mm di V4-V6, aritmia (-).

Perangkat lunak pemrosesan: 4DM. Kualitas gambar baik.





Temuan

- Defek reversibel sebagian (**partial reversible defect**) pada mid anteroseptal (LAD) -- *viabile dengan iskemia*
- Defek reversibel (**reversible defect**) pada apex, apicolateral, apicoinferior, apicoseptal, apicobasal anterior, mid anterolateral, mid inferoseptal (LAD +/- LCx, RCA) - *viabile dengan iskemia*
- SSS 30, SRS 1, SDS 29, beban iskemik 42,6%
- EDV 104 mL, ESV 33 mL, EF 68%, TID 1,87

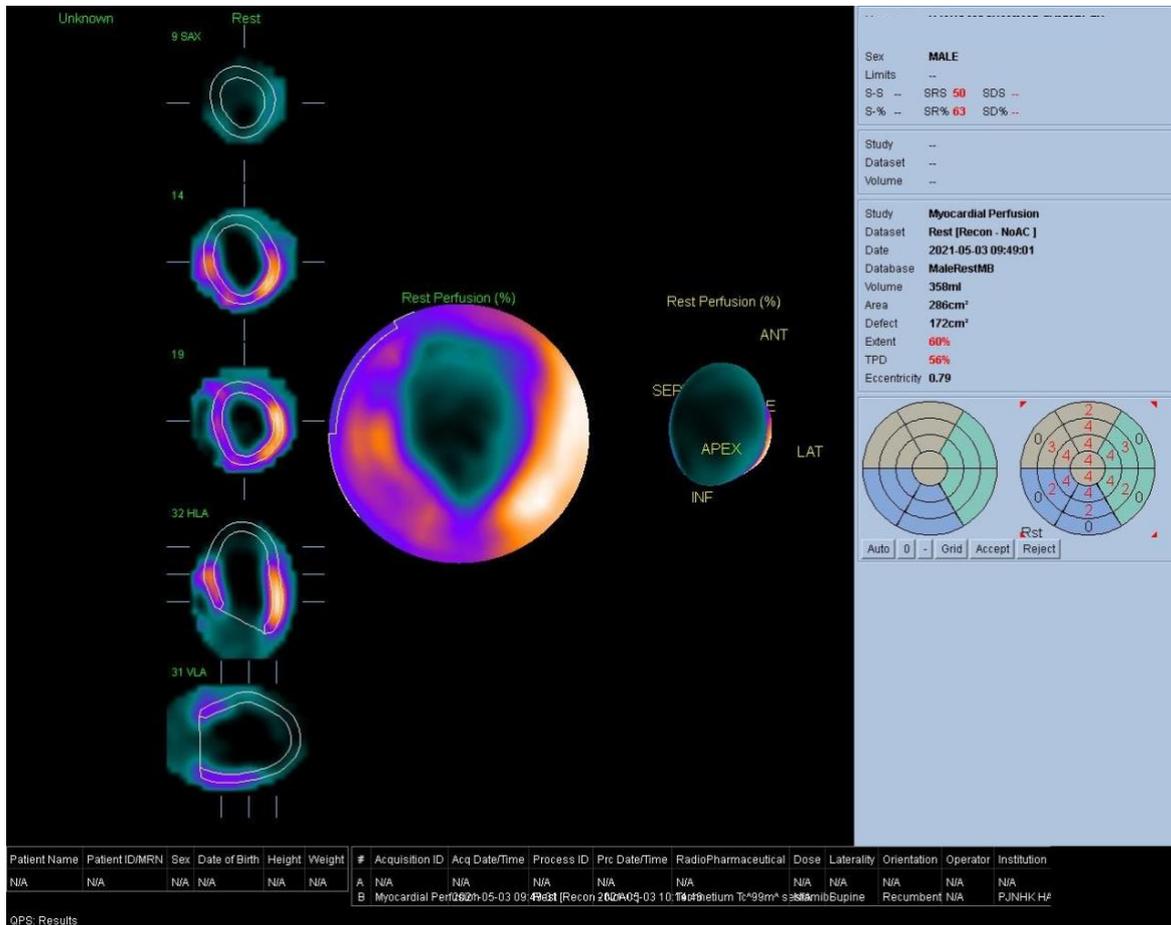
Impresi Klinis

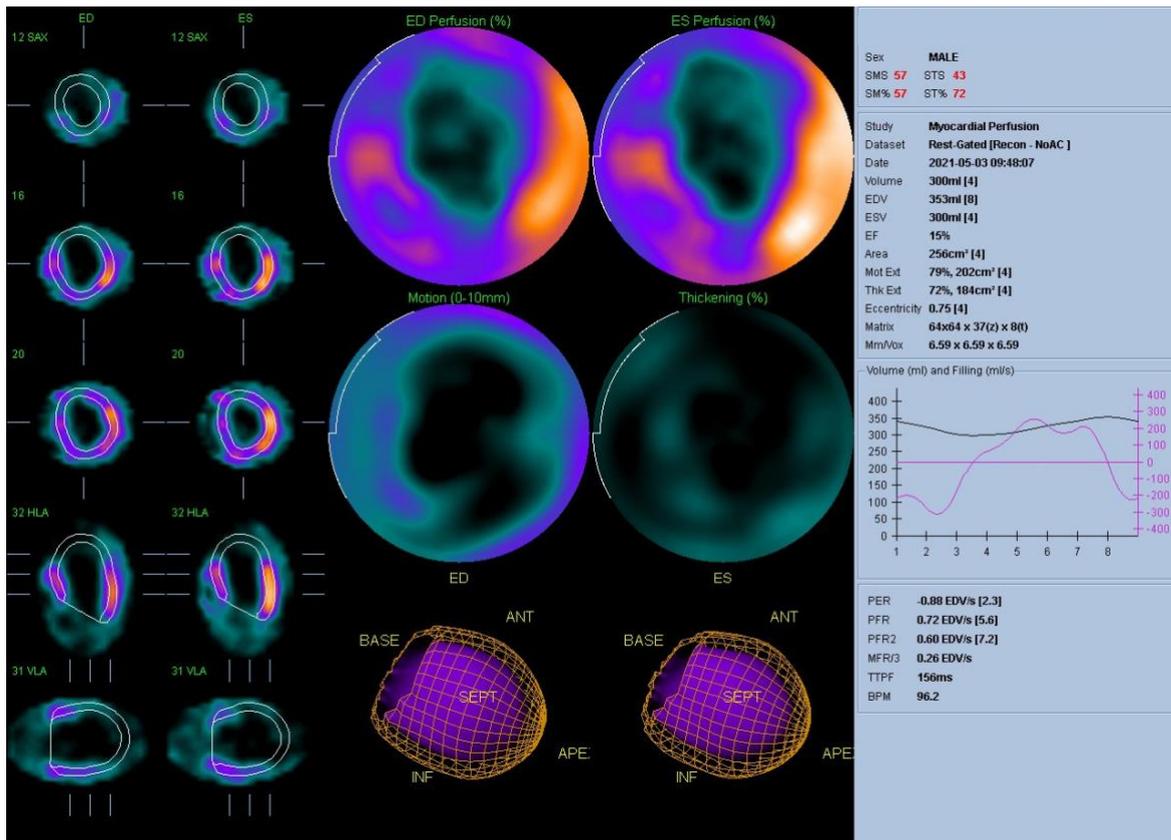
Iskemia sedang-berat (>10%) pada teritori LAD +/- LCx, RCA (pada 75% dari prediksi maksimum laju nadi)

Contoh Interpretasi 5

Protokol fase istirahat saja: radioisotop ^{99m}Tc tetrofosmin dengan dosis 15 mCi.
 TD 98/60, nadi 85 x/menit. EKG: SR, LAD, Q patologis di V2-V6, I-aVL.

Perangkat lunak pemrosesan: QPS Cedar Sinai dengan versi 20 segmentasi LV.
 Kualitas gambar: baik.





Temuan

- Defek perfusi berat saat istirahat (**severe rest perfusion defect**) pada apex, apicoseptal, mid anteroseptal, mid-apicoanterior, apicolateral, mid anterolateral, apicoinferior -- *non-viable*
- Defect perfusi sedang saat istirahat (**moderate rest perfusion defect**) pada mid anterolateral, mid inferolateral, mid inferior – *viable*
- SRS 50
- EDV 353 mL, ESV 300 mL, EF 15%; akinetik pada mid-apicoanterior, mid anteroseptal, apicoseptal, mid anterolateral, apicolateral, mid-apicoinferior; hypokinetic pada basal anterior, basal anteroseptal, basal-mid inferoseptal

Impresi Klinis

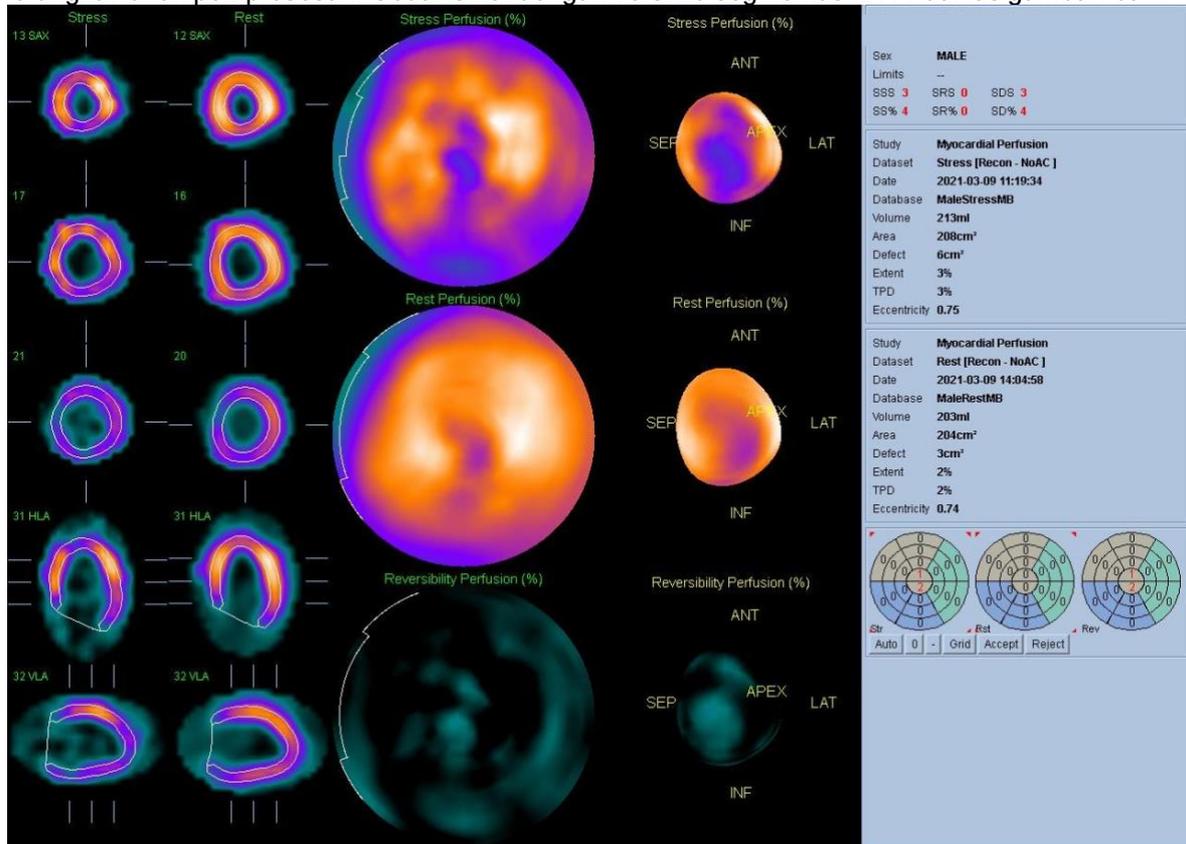
Kardiomiopati iskemik tanpa viabilitas pada sebagian besar teritori LAD, sebagian kecil teritori LCx dan RCA

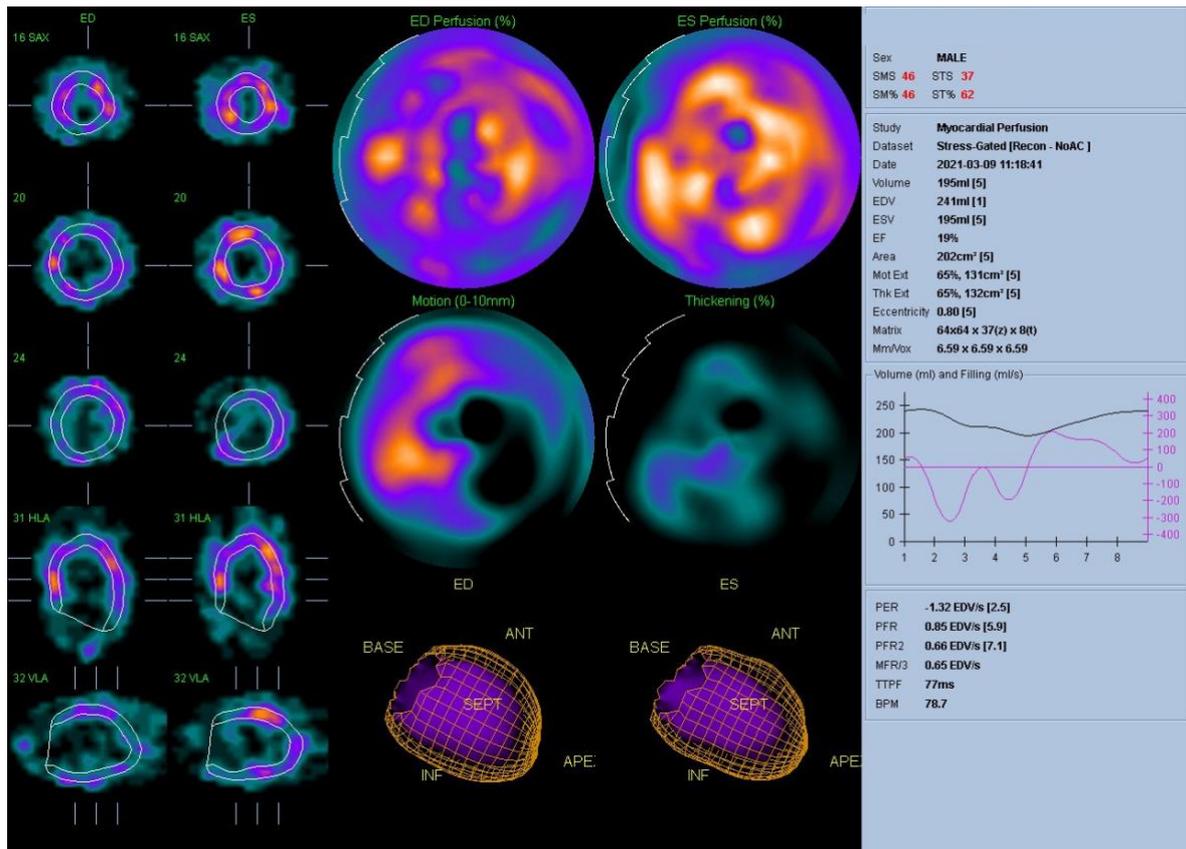
Contoh Interpretasi 6

Protokol fase uji beban-istirahat dalam dua hari: ^{99m}Tc tetrofosmin dengan dosis 18 mCi saat uji beban dan 18 mCi saat istirahat.

Fase uji beban dengan adenosin, dosis 140 mcg/kgBB/menit selama 6 menit: TD 160/93 → 152/92 mmHg, nadi 73 → 95 bpm, keluhan: sesak napas, perubahan EKG (-), aritmia (-).

Perangkat lunak pemrosesan: Cedar Sinai dengan versi 20 segmentasi LV. Kualitas gambar: baik.





Temuan

- Defek reversibel (*reversible defect*) di apex (LAD)
- **SSS 3**, SRS 0, SDS 3, beban iskemik 3,75%
- EDV 241 mL, ESV 195 mL, **EF 19%**, hipokinetik pada seluruh segmen
- Didapatkan TID dengan penilaian visual.

Impresi Klinis

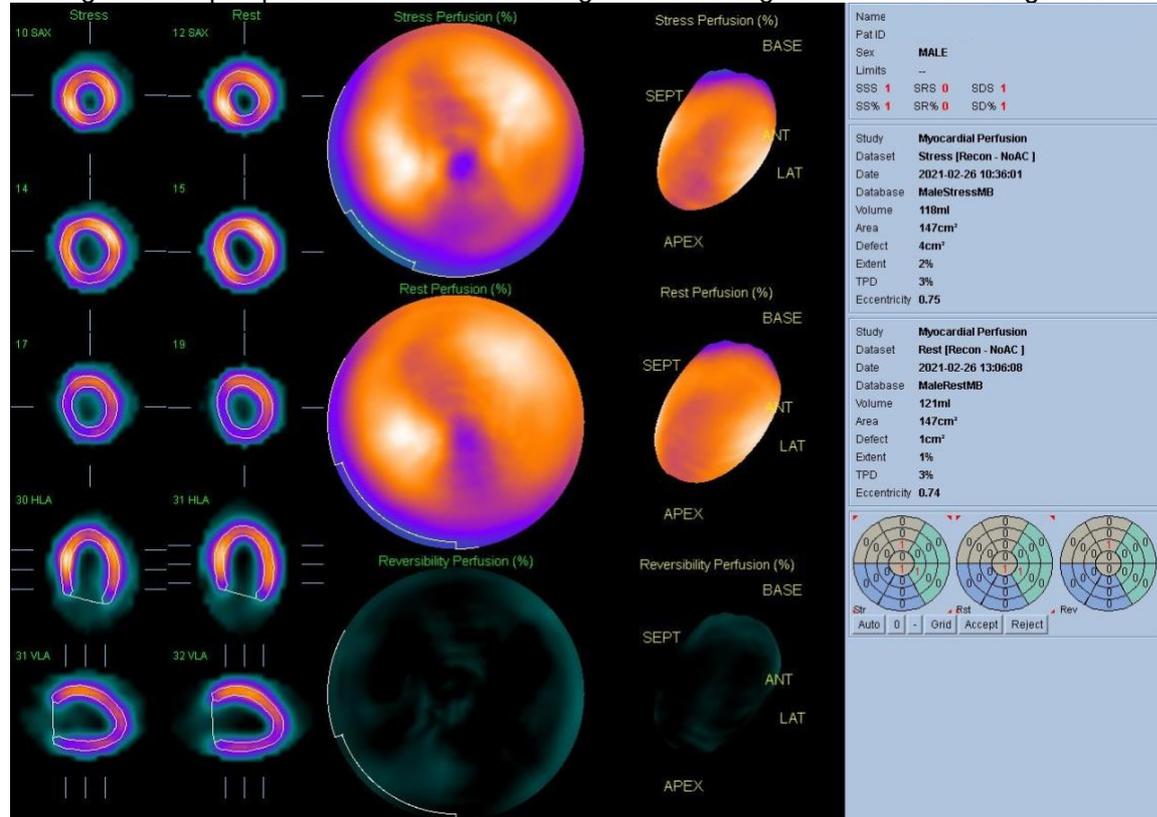
Kemungkinan PAK *multivessel* berat dengan *balanced ischemia* DD/: kardiomiopati non-iskemik

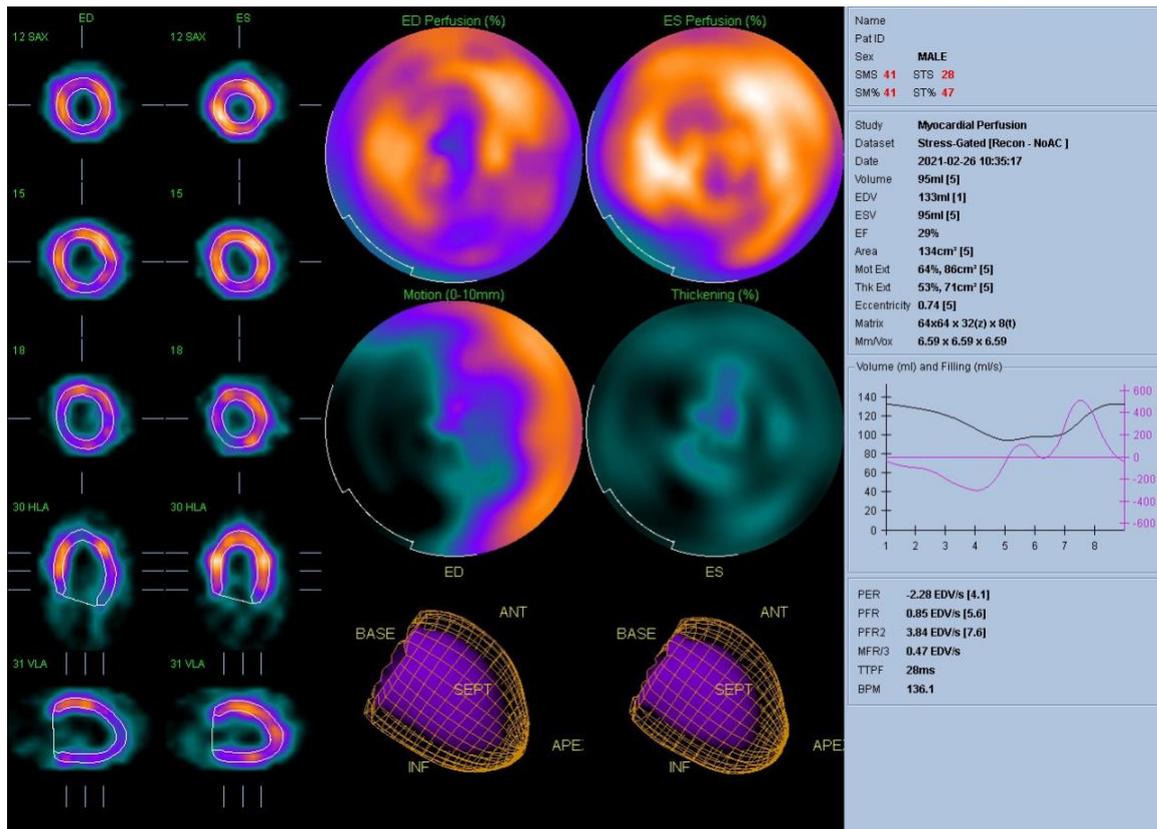
Contoh Interpretasi 7

Protokol fase uji beban-istirahat dalam satu hari: ^{99m}Tc tetrofosmin dengan dosis 8 mCi saat uji beban dan 24 mCi saat istirahat.

Fase uji beban dengan adenosin, dosis 140 mcg/kgBB/menit selama 6 menit: TD 136/85 → 125/80 mmHg, nadi 86 → 98 bpm, keluhan: sesak nafas, perubahan EKG (-), aritmia (-).

Perangkat lunak pemrosesan: Cedar Sinai dengan versi 20 segmentasi LV. Kualitas gambar: baik.





Temuan

- Defek menetap ringan (*mild fixed defect*) pada apex (LAD) dan apicolateral (LCx)
- Defek reversibel (*reversible defect*) di apicoanterior (LAD)
- **SSS 3**, SRS 2, SDS 1, beban iskemik 1,25%
- EDV 135 mL, ESV 95 mL, **EF 29%**, Akinetik pada basal inferoseptal, hipokinetik pada segmen lainnya
- Ditemukan TID dengan penilaian secara visual

Impresi Klinis

Kemungkinan PAK *multivessel* berat dengan *balanced ischemia* DD/: kardiomiopati non-iskemik

BAB III

TINJAUAN PENCITRAAN PERFUSI MIOKARDIUM DENGAN *POSITRON EMISSION TOMOGRAPHY*

PET memungkinkan evaluasi jumlah aliran darah miokardium, fungsi dan metabolisme secara non invasif menggunakan radiofarmaka yang mengemisikan positron, seperti karbon, oksigen, nitrogen dan fluorin. Pengukuran aliran darah miokardium secara kuantitatif memperluas kemampuan pencitraan perfusi miokardium dari deteksi PAK tahap lanjut yang telah menimbulkan gangguan aliran epikardial hingga deteksi tahap awal aterosklerosis atau disfungsi mikrovaskular dan penilaian penurunan aliran miokardium yg seimbang (balanced) pada ketiga teritori koroner. Resolusi spasial PET (4-6 mm) lebih tinggi karena radiofarmaka PET lebih stabil mengemisikan positron dan positron yang dideteksi adalah sepasang yang bergerak berlawanan arah. Resolusi temporal PET juga lebih tinggi karena alat pencitraan yang digunakan bersifat statis dimana pada SPECT gantrinya berputar (rotasi).

3.1 Radiofarmaka

Radiofarmaka untuk PET tersebut memiliki waktu paruh yg lebih pendek daripada radiofarmaka untuk SPECT. Terdapat 3 radiofarmaka yang biasa digunakan untuk pencitraan perfusi miokardium dengan PET yaitu Oksigen-15, Ammonia N-13, dan Rubidium-82. Radiofarmaka dengan emisi positron dapat dihasilkan dengan menggunakan siklotron (contoh: ^{18}F -fluoro-2-deoxyglucose) atau menggunakan generator (contoh: Rubidium-82).

Radiofarmaka untuk pencitraan perfusi miokardium

Radiofarmaka Rubidium-82 (^{82}Rb) adalah analog kationik monovalen dari kalium dan diekstrak oleh miokardium melalui pompa Na-K ATPase. Radiofarmaka ini diproduksi dalam generator yang tersedia secara komersial yang berasal dari peluruhan Strontium-82 (^{82}Sr) yang melekat pada kolom elusi dimana ^{82}Sr memiliki waktu paruh 25,5 hari dan meluruh menjadi ^{82}Rb dengan waktu paruh 75 detik melalui emisi beberapa kemungkinan positron berenergi sangat tinggi. Generator yang mengandung ^{82}Sr tersedia secara komersial dan dapat diganti setiap 6 minggu, sehingga tidak membutuhkan siklotron. Generator terisi penuh setiap 10 menit.

Meskipun waktu paruh yang pendek dari ^{82}Rb menjadi sebuah tantangan bagi kinerja dari pemeriksaan dengan PET, namun profil tersebut memfasilitasi pemeriksaan perfusi miokardium pada fase uji beban dan istirahat dilakukan secara cepat. Radiofarmaka ^{82}Rb diekstraksi ke dalam miosit dengan melewati pompa Na/K adenosin trifosfat. Ekstraksi *first-pass* lebih rendah daripada ^{13}N -ammonia, dan menurun dengan cepat pada peningkatan aliran darah, asidosis, hipoksia dan iskemia. Dosis radiasi ^{82}Rb bervariasi sekitar 1,1-3,5 mSv untuk injeksi sebanyak 60 mCi pada masing-masing studi uji beban dan studi istirahat. Dengan alat PET yang lebih mutakhir, gambar PET yang baik dapat dihasilkan dari pemakaian ^{82}Rb sebanyak 20-40 mCi untuk masing-masing studi uji beban dan studi istirahat sehingga paparan radiasi lebih rendah. Keterbatasan intrinsik ^{82}Rb energi tinggi dari positron yang dipancarkan memperburuk resolusi spasial yang berpengaruh terhadap kualitas pencitraan perfusi miokardium dan serapan miokardium secara non-linier pada aliran darah tinggi yang membatasi ketepatan kuantifikasi aliran darah miokardium pada saat uji beban.

Radiofarmaka Ammonia N-13 (^{13}N -amonia) merupakan agen yang baik untuk mengukur laju aliran darah miokardium absolut dan relatif. Pada kondisi pH yang fisiologis, ^{13}N -amonia memiliki waktu paruh sebesar 10 menit. Karena waktu paruhnya yang pendek, radiofarmaka ini memerlukan siklotron. Radiofarmaka ^{13}N -amonia meluruh dengan mengemisikan positron sehingga menghasilkan Carbon-13 (^{13}C) yang bersifat stabil. Ambilan miokardium terhadap ^{13}N -amonia bergantung pada aliran darah, ekstraksi dan retensi. Radiasi dari 20 mCi ^{13}N -amonia adalah sebesar 1,48 mSv dengan kandung kemih merupakan organ yang menerima radiasi sebesar 6 mSv dari dosis radiofarmaka tersebut.

Radiofarmaka ^{13}N -amonia telah digunakan sebagai agen perfusi miokardium sejak sekitar tahun 1970-an. Radiofarmaka ^{13}N -amonia diproduksi dengan siklotron. Radiofarmaka ini memiliki energi positron yang relatif rendah (1,19 MeV), dengan *loss resolution* rendah (sekitar 0,2 mm) dan waktu paruh 9,96 menit, yang dapat menghasilkan gambar berkualitas lebih tinggi dibandingkan dengan radiofarmaka lainnya, meskipun memerlukan waktu akuisisi sedikit lebih lama dibandingkan dengan ^{15}O dan ^{82}Rb . Dalam darah, ^{13}N -amonia terutama hadir sebagai ion amonium (NH_4^+), yang dapat melintasi membran sel melalui sistem pertukaran natrium-kalium, sementara ^{13}N -amonia berdifusi secara pasif karena lipofilisitasnya. Ambilan miokardium dipengaruhi oleh beberapa variabel, termasuk aliran, fraksi ekstraksi, dan

status metabolik. ^{13}N -amonia dapat digunakan secara efektif untuk evaluasi perfusi miokardium dan telah terbukti lebih unggul dari SPECT dalam hal sensitivitas dan spesifisitas. Radiofarmaka ^{13}N -amonia juga sangat penting dalam pengukuran aliran darah miokardium absolut.

Radiofarmaka Oksigen-15 (^{15}O) dianggap sebagai referensi pengukuran aliran darah miokardium in vivo secara non-invasif karena secara metabolik bersifat inert, dapat berdifusi secara bebas dan memiliki fraksi ekstraksi yang tinggi. Waktu paruh radioaktif ^{15}O sangat singkat yakni 122 detik sehingga ^{15}O hanya dapat digunakan di rumah sakit yang mempunyai siklotron. Energi positron ^{15}O maksimum sebesar 1,7 MeV lebih tinggi daripada ^{13}N -amonia, namun jauh lebih rendah daripada ^{82}Rb , sehingga tingkat resolusi spasial yang dihasilkan diantara ^{13}N -amonia dan ^{82}Rb . Radiofarmaka ^{15}O seringkali dianggap sebagai radiofarmaka yang ideal untuk menghitung aliran darah miokardium secara kuantitatif. Radiofarmaka ^{15}O belum disetujui oleh FDA penggunaannya pada praktek klinis di Amerika Serikat, namun digunakan pada pencitraan klinik di Eropa. Di sisi lain, studi awal dengan ^{18}F -Flurpiridaz pada manusia menunjukkan akurasi diagnostik yang sangat baik untuk deteksi PAK yang signifikan.

Radiofarmaka untuk pencitraan metabolisme miokardium

Radiofarmaka Fluorodeoxyglucose F-18 (^{18}F -FDG) dihasilkan dalam siklotron dengan waktu paruh 110 menit. Ambilan terhadap radiofarmaka ini menggambarkan ambilan glukosa secara keseluruhan. Radiasi untuk 10 mCi ^{18}F -FDG adalah sebesar 7 mSv dengan organ kandung kemih menerima radiasi sebesar 48 mSv sehingga berkemih setiap 1-3 jam sangat dianjurkan paska pemberian FDG untuk mengurangi paparan radiasi.

3.2 Persiapan pasien

Persiapan pasien untuk pencitraan perfusi miokardium

Persiapan pasien untuk pencitraan perfusi miokardium mirip dengan persiapan untuk pencitraan perfusi miokardium dengan SPECT. Hal ini meliputi puasa selama 6 jam atau lebih, namun pasien diperbolehkan untuk minum air putih. Untuk persiapan pasien menjalani uji beban jantung (baik dengan uji latihan, agen vasodilator, ataupun dobutamin), juga sama dengan persiapan uji beban pada pemeriksaan SPECT.

Persiapan pasien untuk pencitraan metabolisme glukosa (penilaian viabilitas miokardium)

Pembatasan diet karbohidrat sejak 24 jam sebelum pemeriksaan, puasa 6-12 jam sebelum pemeriksaan. Metode pembebanan glukosa yang paling umum adalah dengan beban oral 25-100 gram karena mudah untuk dilakukan (**Tabel 3.1** dan **3.2**). Pembebanan glukosa secara intravena juga dapat digunakan untuk menghindari potensi masalah akibat waktu penyerapan gastrointestinal bervariasi atau ketidakmampuan untuk mentolerir dosis oral. Kita juga perlu memperhatikan apakah pasien menggunakan obat yang dapat menghambat atau mempotensiasi efek insulin atau tidak.

Pada pasien diabetes, metode puasa dan pembebanan glukosa per oral yang sederhana seringkali tidak efektif pada pasien diabetes karena terbatasnya kemampuan produksi insulin endogen atau kurangnya sensitivitas terhadap stimulasi insulin. Sehingga penggunaan insulin bersama dengan pemantauan ketat glukosa darah memberikan hasil yang baik. Pada pasien diabetes, obat antidiabetes tidak digunakan sejak 12 jam sebelum pemeriksaan, dan insulin tidak digunakan sejak 4 jam sebelum pemeriksaan.

Gambar ^{18}F -FDG yang ditingkatkan juga dapat dilihat ketika akuisisi gambar dilakukan 2-3 jam setelah injeksi dosis ^{18}F -FDG. Hal ini dapat meningkatkan peluruhan radiofarmaka saat akuisisi gambar. Teknik alternatif adalah klem euglikemik-hiperinsulinemia, yang menghasilkan kualitas gambar yang sangat baik pada sebagian besar pasien. Prosedur pembebanan glukosa/insulin IV selama 30 menit juga telah digunakan dengan beberapa keberhasilan.

Tabel 3.1 Perbandingan radiofarmaka yang tersedia untuk PET perfusi kuantitatif

Parameter	Oksigen-15	¹³ N-amonia	Rubidium-82	¹⁸ F-Flurpiridaz
Waktu paruh Radiofarmaka	122 detik	9.96 detik	75 detik	109.8 detik
Ketersediaan	Siklotron on-site	Siklotron on-site	Generator	Siklotron
Rentang rata-rata positron dalam air (mm)	2,5	1.5	5,9	0,6
Hubungan dengan MBF	Ideal (berdifusi bebas)	Fraksi ekstraksi tinggi	Fraksi ekstraksi non-linear	Fraksi ekstraksi tinggi
Kualitas gambar	Hanya MBF parametrik	Bagus-tinggi	Cukup-bagus	Sangat tinggi
Pencitraan <i>gated</i>	Memungkinkan dari <i>first pass</i>	Kualitas tinggi	Kualitas bagus	Kualitas tinggi
Waktu pemeriksaan	Sangat terbatas	Ada interval antara istirahat dan stress	Sangat terbatas	Terpisah antara stress dan istirahat
Penelitian sebelumnya	Digunakan terutama dalam penelitian dan dengan pencitraan hibrida	Banyak digunakan secara kualitatif dan kuantitatif	Banyak digunakan secara kualitatif dan kuantitatif	Sementara masih uji coba fase III

Tabel 3.2 Prosedur pemeriksaan metabolisme miokardium dengan [¹⁸F]Fluorodeoxyglucose

Prosedur	Langkah standarisasi
Puasa	Langkah-1: puasa 6-12 jam
Pembebanan glukosa	Langkah-2: Cek glukosa darah (GD) dan berikan glukosa, pilih salah satu metode berikut:
	Pilihan-1: pembebanan glukosa oral Jika GD puasa <250 mg/dL: berikan glukosa 25-50 gram per oral (lihat Tabel 11) → monitor GD (lihat Tabel 2) Jika GD puasa >250 mg/dL (lihat Tabel 2)
	Pilihan-2: infus dekstrosa/insulin intravena
Injeksi ¹⁸F-FDG	Pilihan-3: pemberian acipimox 250 mg per oral
	Langkah-3: Pemberian [¹⁸ F]Fluorodeoxyglucose Waktu pemberian tergantung metode pembebanan glukosa yg dipilih Cara standar pemberian [¹⁸ F]Fluorodeoxyglucose intravena (lihat Tabel 3.6)
Akuisisi gambar PET	Lihat Tabel 3.6

Tabel 3.3 Panduan pengendalian glukosa darah. Setelah pemberian glukosa, kadar glukosa darah dipertahankan senilai 100-140 mg/dL saat penyuntikan [¹⁸F]Fluorodeoxyglucose untuk ambilan radiofarmaka yg optimal di miokardium.

Kadar glukosa darah saat 45-60 menit setelah pemberian glukosa	Tindakan restorasi
130-140 mg/dL	1 U insulin regular intravena
140-160 mg/dL	2 U insulin regular intravena
160-180 mg/dL	3 U insulin regular intravena
180-200 mg/dL	4 U insulin regular intravena
>200 mg/dL	Sesuai petunjuk dokter

3.3 Uji beban

Pelaksanaan uji beban jantung sama dengan pelaksanaan uji beban pada pemeriksaan SPECT. Perbedaannya adalah uji beban jantung dilakukan dengan pasien sudah berada di dalam alat scanner (karena waktu paruh radiofarmaka yang pendek) dengan mempertahankan posisi tangan terletak diatas kepala pada suatu struktur penyokong tanpa adanya gerakan (menghindari terbentuknya artefak), sehingga uji beban jantung yang digunakan umumnya adalah agen farmakologis.

3.4 Akuisisi

Posisi pasien

Idealnya pasien ditempatkan dalam posisi terlentang dengan lengan keluar dari lapang pandang kamera dengan penyangga tangan diatas kepala. Pada pasien dengan arthritis berat sehingga lengannya tidak dapat diposisikan di luar lapang pandang kamera, gambar jantung harus diperoleh dengan lengan pasien bertumpu pada sisinya. Pada kondisi ini, waktu pemindaian dapat menjadi lebih lama, dan perlu diperhatikan bahwa lengan tidak bergerak saat pemindaian agar tidak timbul artefak. Namun pada pasien yang menjalani pencitraan PET/CT, lengan yang diletakkan di dalam lapang pandang akan menghasilkan artefak *beam-hardening* pada pemindaian transmisi berbasis CT, yang biasanya menyebabkan artefak *streak* pada pemindaian emisi yang dikoreksi.

Alat Pemindai

Terdapat 2 jenis alat pemindai yaitu 2D (septa-in) dan 3D (septa-out). Dengan alat pemindai 3D direkomendasikan untuk menggunakan dosis kecil radiofarmaka untuk menghasilkan gambar yang baik. Beberapa jenis sistem kristal yang digunakan pada alat pemindai antara lain: bismuth germanate (BGO), lutetium oxyorthosilicate (LSO), lutetium yttrium orthosilicate (LYSO), dan gadolinium oxyorthosilicate (GSO). Standar prosedur pemeriksaan perfusi dengan PET dijabarkan pada **Tabel 3.4, 3.5, dan 3.6** serta **Gambar 3.1 dan 3.2**.

Tabel 3.4 Pencitraan perfusi dengan radiofarmaka Rubidium-82

Profil	Sistem BGO	Sistem LSO (LYSO)	Sistem GSO
Uji beban		Agen farmakologis	
Dosis radiofarmaka			
2D scanner	40-60 mCi		
3D scanner	10-20 mCi	30-40 mCi	20 mCi
Kecepatan injeksi		Bolus ≤ 30 detik	
Waktu akuisisi gambar setelah injeksi radiofarmaka		LVEF > 50%: 70-90 detik LVEF <50% atau tidak diketahui: 90-130 detik <i>List mode: segera</i> Waktu yg lebih panjang harus digunakan bila <i>count rate</i> pada waktu diatas melebihi nilai maksimum dari alat yg digunakan	
Posisi pasien			
PET		Scout scan: 10-20 mCi (standar)	
PET/CT		Scan transmisi (opsional) CT scout	
Jenis gambar	Gated/dinamik - tanpa penundaan setelah injeksi (preferensi)		
	Akuisisi gated – dengan penundaan setelah injeksi (opsional)		
Durasi pengambilan gambar		3-6 menit (standar) 3-10 menit (opsional)	
Koreksi atenuasi	Koreksi atenuasi sebelum atau sesudah		
Metode rekonstruksi	FBP atau OSEM	3D-RAMLA	
Filter rekonstruksi	Cukup mencapai resolusi yg diinginkan, stress-rest berimbang		-
Ukuran pixel rekonstruksi	2-3 mm	4 mm	

Tabel 3.5 Pencitraan perfusi dengan radiofarmaka Ammonia N-13

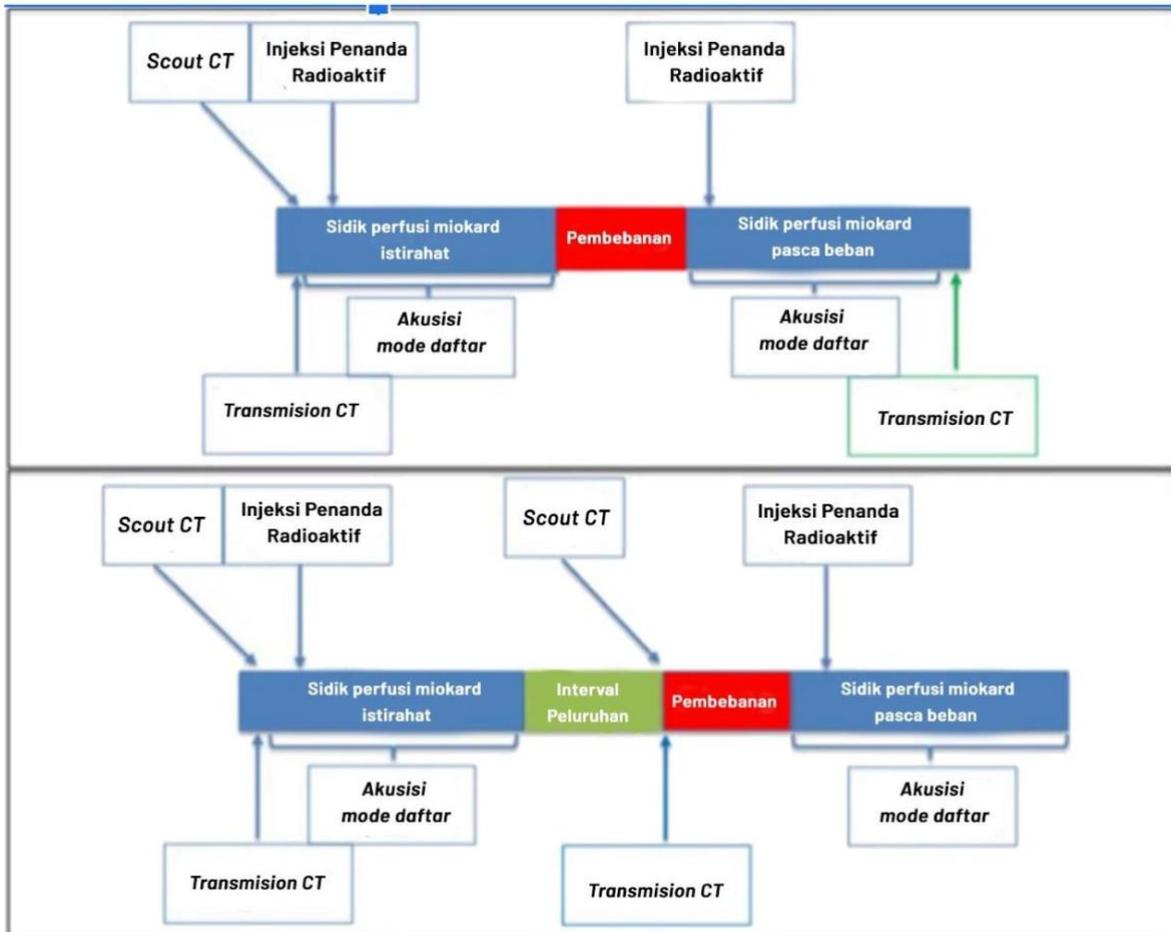
Profil	Metode
Uji beban	Agen farmakologis
Dosis radiofarmaka	
2D or 3D scanner	10-20 mCi
Kecepatan injeksi	20-30 detik
Waktu akuisisi gambar statik	1,5-3 menit setelah injeksi radiofarmaka selesai
Waktu akuisisi gambar dinamik	Pengambilan gambar dimulai sebelum injeksi radiofarmaka
Posisi pasien	
PET	Scout scan: 1-2 mCi (standar) Scan transmisi (opsional)
PET/CT	CT scout
Jenis gambar	ECG gated miokardium (preferensi) Statik (opsional) <i>List mode: gated-dinamik (preferensi)</i>
Durasi pengambilan gambar	10-15 menit (standar)
Koreksi atenuasi	Koreksi atenuasi sebelum atau sesudah
Metode rekonstruksi	FBP atau OSEM
Filter rekonstruksi	Cukup mencapai resolusi yg diinginkan, stress-rest berimbang
Ukuran pixel rekonstruksi	2-3 mm (preferensi) 4 mm (opsional)

Tabel 3.6 Pencitraan metabolisme dengan radiofarmaka [¹⁸F]Fluorodeoxyglucose

Profil	Metode
Dosis radiofarmaka 2D or 3D scanner	5-15 mCi
Kecepatan injeksi statik	Bolus sampai 2 menit (standar)
Kecepatan injeksi dinamik	Bolus untuk kuantifikasi glukosa (opsional)
Waktu akuisisi gambar	45-60 menit setelah injeksi radiofarmaka
Posisi pasien	
PET	¹⁸ F-FDG scout scan (opsional) Scan transmisi (standar)
PET/CT	CT scout (standar)
Jenis gambar	2D atau 3D (standar) Statik atau list mode (standar) Dinamik (opsional)
Durasi pengambilan gambar	10-30 menit (tergantung count rate dan dosis)
Koreksi atenuasi	Koreksi atenuasi sebelum atau segera sesudah scan
Metode rekonstruksi	FBP atau OSEM
Filter rekonstruksi	Cukup mencapai resolusi yg diinginkan, studi konsekutif yang berimbang
Ukuran pixel rekonstruksi	2-3 mm (preferensi) 4-5 mm (akseptabel)
Catatan: bila pencitraan metabolisme dikombinasikan dengan pencitraan perfusi PET, parameter yang sama digunakan untuk posisi pasien, koreksi atenuasi, dan rekonstruksi gambar	

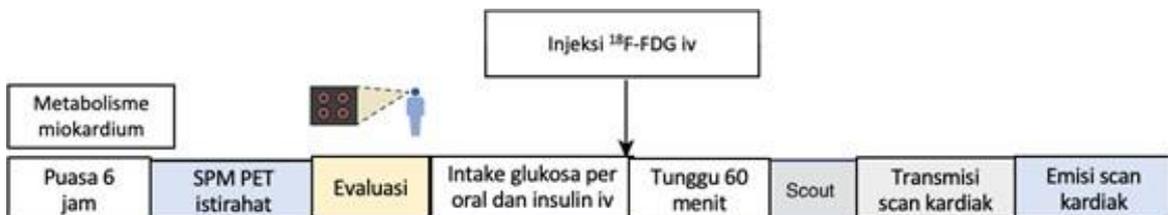
Skema Protokol

Perfusi miokardium



Gambar 3.1 Protokol evaluasi perfusi kuantitatif PET kardiak saat istirahat dan uji beban. Panel atas merupakan protokol radiofarmaka dengan waktu paruh pendek (Oksigen-15 dan Rubidium-82). Panel bawah merupakan protokol radiofarmaka dengan waktu paruh yang lebih panjang (Ammonia N-13 dan Fluorin-18). Protokol pada ¹³N-amonia dapat dilakukan lebih singkat dengan menggunakan koreksi aktivitas residual.

Metabolisme miokardium



Gambar 3.2 Protokol evaluasi metabolisme miokardium dengan Fluorodeoxyglucose F-18.

3.5 Pemrosesan

Sebelum dilakukan rekonstruksi data, koreksi perlu dilakukan terhadap sebaran, *dead time*, atenuasi, dan peluruhan. Pada sistem PET lama, metode rekonstruksi standar yang dilakukan adalah *filtered backprojection* (FBP). Sistem PET baru menggunakan metode rekonstruksi iteratif (seperti *ordered subset expectation maximization* [OSEM]). Koreksi atenuasi sangat perlu dilakukan pada pencitraan dengan PET. Koreksi atenuasi dapat dilakukan dengan suatu cincin khusus dalam sistem PET atau secara hibrid dengan CT atau MRI. Setelah atenuasi koreksi dan rekonstruksi, gambaran miokard harus diorientasikan kembali sepanjang aksis miokardium seperti yang biasa dilakukan untuk pencitraan perfusi miokardium. Penting untuk memeriksa pandangan transaksial, koronal, dan sagital untuk menilai keselarasan gambar emisi yang diperoleh selama stres, istirahat, dan metabolisme, serta gambar transmisi.

Tampilan gambar sama halnya seperti pada SPECT. Gambar ditampilkan dalam tampilan *short axis view*, *vertical long axis view*, dan *horizontal long axis view* dan secara berdampingan antara gambar fase uji beban dan fase uji istirahat. Untuk interpretasi dan perbandingan gambar perfusi dan metabolisme, gambar ditampilkan secara berdekatan pada posisi potongan yang serupa. Gambar juga dapat ditampilkan dalam bentuk 3D. Masing-masing studi perfusi dinormalisasi terhadap nilai maksimumnya. Gambar metabolisme dinormalisasi terhadap *count* pada regio miokardium yang sama pada studi perfusi istirahat. Nilai kuantitatif dari aliran darah miokardium saat istirahat dapat digunakan untuk menentukan area dengan aliran darah miokardium absolut tertinggi dari data metabolisme.

3.6 Interpretasi

3.6.1 Analisis dan interpretasi perfusi miokardium dengan PET

Dokter yang menginterpretasi harus mencatat apakah ada pembesaran ventrikel kanan atau ventrikel kiri saat istirahat atau apakah ada dilatasi ventrikel kiri yang dicetuskan oleh uji beban yang sifatnya sementara. Ukuran ventrikel kanan dan kiri, serta setiap perubahan yang terkait dengan uji beban, biasanya dijelaskan secara kualitatif. Beberapa peranti lunak yang awalnya dikembangkan untuk SPECT, memiliki kemampuan untuk evaluasi volume ventrikel kiri, tetapi tidak semua peranti lunak tersebut telah divalidasi pada PET. Sebab, gambar uji beban pada PET

diperoleh pada saat puncak uji beban farmakologis, berbeda dengan SPECT yang gambarnya diperoleh 15-45 menit setelah uji beban.

Berikutnya dilakukan evaluasi penyerapan paru-paru. Peningkatan aktivitas radiofarmaka di paru-paru juga dievaluasi secara kualitatif, dan jika penyerapannya berat, maka mencerminkan disfungsi ventrikel kiri berat yang disertai peningkatan tekanan diastolik dan kapiler ventrikel kiri. Gambaran ini juga dapat mencerminkan penyakit infiltratif paru, misalnya pada perokok. Peningkatan serapan paru dapat mempengaruhi kualitas gambar, dan khususnya dapat mengganggu interpretasi dinding lateral ventrikel. Untuk mencegahnya, jeda antara injeksi dan akuisisi gambar diperpanjang dari 4-5 menit menjadi 7-8 menit.

Penyerapan radiofarmaka oleh ventrikel kanan penting dievaluasi secara kualitatif. Peningkatan serapan radiofarmaka oleh ventrikel kanan dapat dilihat pada gambar perfusi dan metabolisme. Hal ini terjadi jika terdapat hipertensi pulmonal yang disertai atau tanpa hipertrofi ventrikel kanan. Peningkatan serapan ventrikel kanan biasanya dinilai sebagai perbandingan relatif terhadap serapan ventrikel kiri. Penilaian peningkatan serapan ventrikel kanan harus dibandingkan dengan daerah selain septum ventrikel kiri karena septum memiliki komponen kedua ventrikel. Terdapat beberapa kemungkinan penyebab peningkatan serapan ventrikel kanan, yaitu PAK dengan tiga pembuluh darah, *left main disease*, dan *balanced ischemia* (adanya penurunan relatif perfusi ventrikel kiri).

Visualisasi kumpulan darah persisten pada salah satu gambaran perfusi atau metabolisme biasanya merupakan tanda kurangnya *uptake* radiotracer oleh miokardium, waktu pengambilan radiotracer ke dalam miokardium kurang, atau berkurangnya *wash-out* radiotracer dari darah. Penyebab peningkatan aktivitas kumpulan darah, terutama pada pencitraan perfusi dengan ^{82}Rb , adalah disfungsi sistolik ventrikel kiri sehingga memperpanjang waktu sirkulasi.

Aktivitas radiofarmaka ekstrakardiak diperiksa melalui gambar tomografi, terutama paru-paru dan mediastinum. *Uptake* ekstrakardiak dapat menunjukkan suatu keganasan dan/atau proses inflamasi. Evaluasi *uptake* ekstrakardiak sangat baik dilakukan dengan mode proyeksi intensitas maksimum 3D yang dapat dirotasi. Gambaran efusi pleura/perikardium, kalsifikasi koroner dan/atau aorta, payudara, mediastinum, atau paru-paru, massa, dan lain-lain sebaiknya ditinjau menggunakan PET/CT.

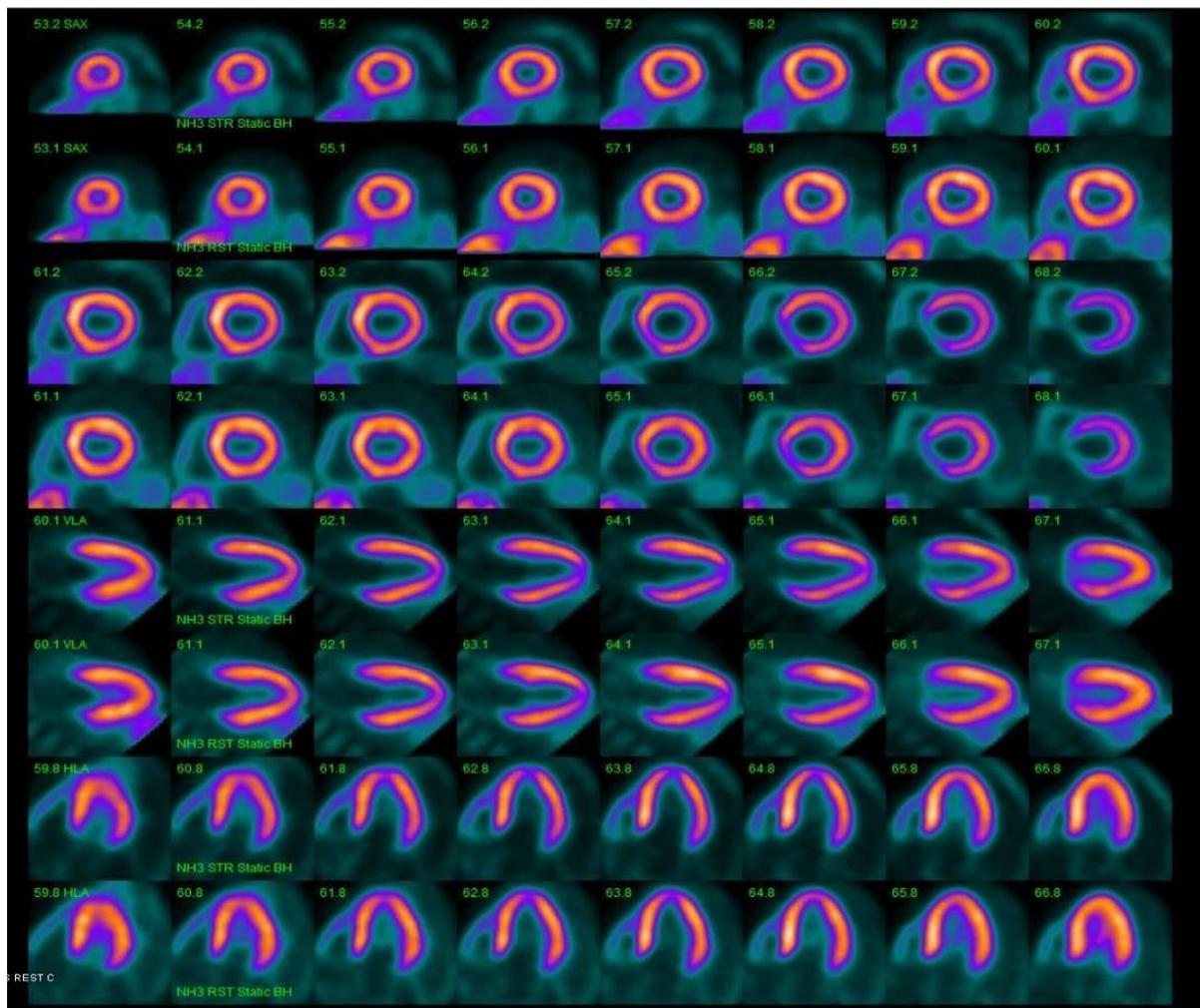
Penurunan *uptake* radiofarmaka yang menetap (baik saat uji beban maupun istirahat) dapat terjadi pada apeks dan merupakan varian normal. Hal ini terjadi akibat artefak volume parsial yang disebabkan dinding apikal relatif lebih tipis dibandingkan dinding miokardium lainnya. Gambaran ini dapat terlihat pada penggunaan radiofarmaka ^{82}Rb atau ^{13}N -amonia dan lebih sering kali lebih terlihat pada penggunaan ^{13}N -amonia dan kamera TOF. Penurunan aktivitas radiofarmaka yang menetap juga dapat terjadi pada dinding lateral ventrikel yang berukuran dan berfungsi normal, terutama pada penggunaan ^{13}N -amonia. Hal ini disebabkan oleh perbedaan retensi atau gerakan dinding lateral dibandingkan septum.

3.6.1.1 Penilaian secara kualitatif (visual)

Pertama-tama evaluasi defek perfusi diidentifikasi melalui analisis visual. Defek perfusi harus dijabarkan luasnya, derajat keparahan, lokasi berdasarkan teritorial miokardium tertentu, menggunakan standar nomenklatur. Defek perfusi ventrikel kanan juga harus dievaluasi. Luasnya defek harus dievaluasi secara kualitatif dengan menggambarkan lokasi segmen abnormal yang terlibat (misalnya, anterior, inferior, atau lateral) serta luas ventrikel kiri (misalnya, memanjang dari basal ke apeks). Luas defek juga dapat dikategorikan sebagai kecil (5 sampai 10% dari ventrikel kiri), sedang (10 sampai 20%), atau besar (>20%). Defek lebih dari 10% memiliki risiko kejadian kardiovaskular yang tinggi. Derajat keparahan defek perfusi biasanya dinyatakan secara kualitatif sebagai ringan, sedang, atau berat. Defek dianggap berat jika memiliki konsentrasi radiofarmaka yang sama atau mirip dengan aktivitas latar belakang, dan defek sedang jika aktivitas radiofarmaka di miokardium lebih tinggi daripada latar belakang. Defek dikatakan ringan jika terdapat sedikit penurunan serapan pada regio miokardium tertentu.

Perfusi miokardium saat uji beban dan istirahat dibandingkan untuk menentukan keberadaan, luas, dan tingkat keparahan defek perfusi yang diinduksi uji beban dan untuk menentukan apakah defek tersebut mewakili suatu iskemia atau infark. Daerah yang normal saat istirahat dan memiliki kelainan perfusi yang diinduksi uji beban disebut defek perfusi reversibel dan menunjukkan adanya iskemia. Kelainan perfusi pada uji beban, yang menetap pada saat istirahat, disebut defek ireversibel atau menetap, dan menunjukkan adanya infark miokardium. Jika terdapat iskemia dan

infark secara bersamaan, maka akan tampak defek reversible parsial atau tidak lengkap.



Gambar 3.3 Penilaian visual. Evaluasi gambar tomografi dilakukan pada tiga set potongan, yaitu sumbu pendek (*short axis*), sumbu panjang horizontal (*horizontal long axis*), dan sumbu panjang vertikal (*vertical long axis*)

3.6.1.2 Penilaian semikuantitatif

Penilaian defek perfusi juga harus dilakukan secara semikuantitatif menggunakan 5 skala (**Tabel 3.7**) Gambar minimal yang harus dilaporkan adalah tiga *slice* sumbu pendek (apikal, mid, dan basal) dan satu *slice* sumbu panjang vertikal untuk mewakili apex ventrikel kiri. Evaluasi defek perfusi uji beban dan istirahat, serta perkiraan luasnya infark dan iskemia, dapat dilakukan dengan menghitung jumlah segmen. Evaluasi semikuantitatif juga sebaiknya melakukan perhitungan pada skor total seperti halnya SPM SPECT. Adapun skor yang dinilai adalah SSS, SRS, dan SDS, dengan sistem penghitungan yang serupa dengan SPECT.

Tabel 3.7 Sistem skor semikuantitatif

Tingkat	Interpretation	Skor
Hitungan radioaktif normal	Perfusi normal	0
Penurunan ringan hitungan radioaktif	Abnormalitas ringan	1
Penurunan sedang hitungan radioaktif	Abnormalitas signifikan	2
Penurunan berat hitungan radioaktif	Abnormalitas signifikan	3
Tidak ada hitungan radioaktif	Abnormalitas signifikan	4

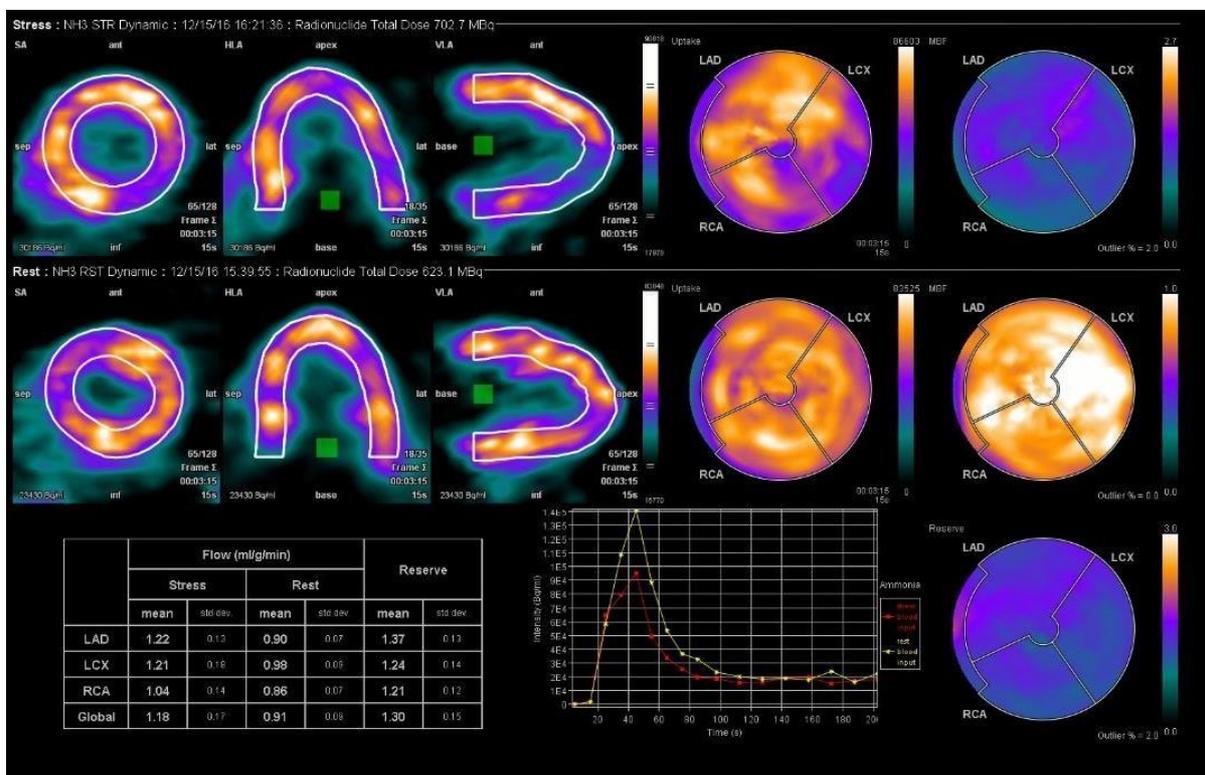
Sebelum menilai, dokter yang menafsirkan perlu mengetahui variasi normal perfusi miokardium pada PET. Perfusi menggunakan radiofarmaka ^{82}Rb , dapat menimbulkan artefak berupa defek ringan di apeks dan basal ventrikel kiri yang konsisten dengan artefak segmental dan/atau penipisan miokardium di segmen tersebut. Sedangkan, penggunaan radiofarmaka ^{13}N -amonia dapat menimbulkan *uptake* yang lebih rendah pada dinding lateral dan seringkali direferensikan sebagai area normal. Selain itu, penipisan apikal tampak lebih jelas dengan pencitraan ^{13}N -amonia.

3.6.1.3 Penilaian kuantitatif

Penilaian kuantitatif dilakukan untuk evaluasi aliran darah koroner. Penilaian aliran darah kuantitatif / *myocardial blood flow* (MBF) memberikan interpretasi objektif yang reproduibilitasnya lebih tinggi daripada analisis visual. Kuantifikasi absolut dapat membantu menilai signifikansi stenosis arteri koroner, terutama jika stenosis moderat. Kuantifikasi relatif maupun absolut sangat berguna untuk membandingkan perubahan antara dua studi pada pasien yang sama. Keunggulan pengukuran MBF kuantitatif adalah dapat mengidentifikasi “*balanced ischemia*” akibat PAK *multivessel* ataupun disfungsi mikrovaskular difus.

Pengukuran MBF kuantitatif memiliki keunggulan dibandingkan dengan analisis defek perfusi dalam hal:

1. Diagnosis PAK epikardial
2. Penilaian luas dan keparahan PAK epikardial
3. Stratifikasi risiko
4. Menentukan pasien untuk intervensi koroner dan/atau terapi medis
5. Diagnosis penyakit mikrovaskular koroner
6. Konfirmasi uji beban farmakologis yang adekuat pada pasien yang mungkin tidak berespons terhadap agen uji beban farmakologis.



Gambar 3.4. Penilaian kuantitatif myocardial blood flow (MBF) dan myocardial flow reserve (MFR)

Nilai total defek perfusi saat uji beban, istirahat, dan reversibilitas (iskemia) dapat dihitung pada PET, tetapi penggunaan parameter ini secara klinis belum divalidasi. Nilai absolut MBF hiperemia (mL/menit/gram jaringan) dan cadangan aliran darah/*myocardial flow ratio* (MFR), rasio MBF saat uji beban dan istirahat, berpotensi memiliki nilai prognostik yang baik. Nilai MBF dan MFR dapat mendeteksi adanya *balanced ischemia* pada studi dengan hasil negatif terhadap adanya defek perfusi.

Beberapa hal yang harus diperhatikan saat interpretasi kualitatif adalah; kontrol kualitas teknik pemeriksaan, perangkat lunak yang digunakan, dan potensi *pitfall* yang mungkin terjadi. Interpretasi perfusi PET harus dilakukan dengan seksama karena dapat memberikan gambaran ambigu pada beberapa kondisi, seperti:

1. Pasien pasca CABG yang mengalami penurunan MBF difus meskipun graft paten.
2. Pasien dengan infark transmural luas karena dapat menyebabkan MBF uji beban meningkat mendekati normal.
3. Pasien dengan gagal ginjal kronis berat yang seringkali mengalami PAK *multivessel*.
4. Pasien dengan disfungsi ventrikel kiri berat.

Nilai MFR dapat bervariasi bergantung pada radiofarmaka dan peranti lunak yang digunakan dan dapat diinterpretasikan sebagai berikut:

1. MFR $>2,3$ menunjukkan prognosis yang baik (dengan catatan tidak terdapat nilai rendah pada masing-masing segmen).
2. MFR $<1,5$ menunjukkan penurunan cadangan aliran darah signifikan dan memiliki risiko kardiovaskular tinggi (terutama bila tidak disertai peningkatan aliran darah saat istirahat).

Penilaian MBF kuantitatif dalam unit absolut (satuan: mL/menit/gram jaringan) telah terstandarisasi dengan menggunakan agen ^{13}N -amonia dan ^{15}O dan membutuhkan akuisisi gambar secara dinamis. Kuantifikasi MBF menggunakan agen ^{82}Rb lebih sulit karena waktu paruhnya hanya 75 detik.

Evaluasi PET dengan *gated*-EKG diperlukan untuk menilai fungsi ventrikel secara akurat. Seperti halnya pada SPECT, *gated*-EKG PET juga dapat menilai fungsi ventrikel saat uji beban dan istirahat, namun bedanya akuisisi gambar uji beban pada PET dilakukan saat puncak uji beban/vasodilatasi sehingga memberikan informasi tambahan mengenai perubahan fungsi dan volume ventrikel kiri saat uji beban dengan lebih tepat.

3.6.2 Analisis dan interpretasi metabolisme miokardium dengan PET

Pencitraan metabolisme miokardium menilai adanya metabolisme glukosa pada miokardium menggunakan radiofarmaka ^{18}F -FDG sebagai sumber glukosa eksogen. Konsentrasi ambilan ^{18}F -FDG oleh miokardium dibandingkan dengan perfusi miokardium untuk menilai viabilitas. Terdapat tiga kemungkinan interpretasi perbandingan perfusi dan metabolisme (**Tabel 3.8**), yaitu;

1. *mismatch* perfusi-metabolisme
2. *reverse mismatch* perfusi-metabolisme
3. *match* perfusi-metabolisme

Ambilan radiofarmaka pada pemeriksaan perfusi istirahat juga dapat menilai viabilitas miokardium. Area dengan perfusi yang baik namun terdapat penurunan ambilan ^{18}F -FDG, menandakan area miokardium yang terancam namun masih viabel, karena radiofarmaka perfusi juga menunjukkan adanya metabolisme yang aktif. Nilai perfusi saat istirahat dibandingkan dengan nilai perfusi maksimum dan dilaporkan dalam bentuk persentase (nilai ambilan tertinggi dianggap 100% dan piksel lainnya dibandingkan dengan nilai tersebut). Segmen miokardium dengan ambilan radiofarmaka >60% dianggap masih viabel, jika ambilan <40% maka dianggap tidak viabel, dan jika berada di antara 40-60%, maka sebaiknya dilakukan pemeriksaan viabilitas lebih lanjut.

Tabel 3.8 Interpretasi viabilitas berdasarkan perbandingan perfusi dan metabolisme dengan [¹⁸F]Fluorodeoxyglucose

Aliran darah miokardium	Ambilan [¹⁸ F]Fluorodeoxyglucose	Interpretasi
Normal	Normal	Normal
Menurun	Tetap atau meningkat	<i>Perfusion-metabolism mismatch</i> <i>Reversed perfusion-metabolism mismatch</i>
Normal atau hampir normal	Menurun	Dapat terjadi pada septum pasien dengan LBBB
Menurun proporsional	Menurun proporsional	<i>Perfusion-metabolism match</i>

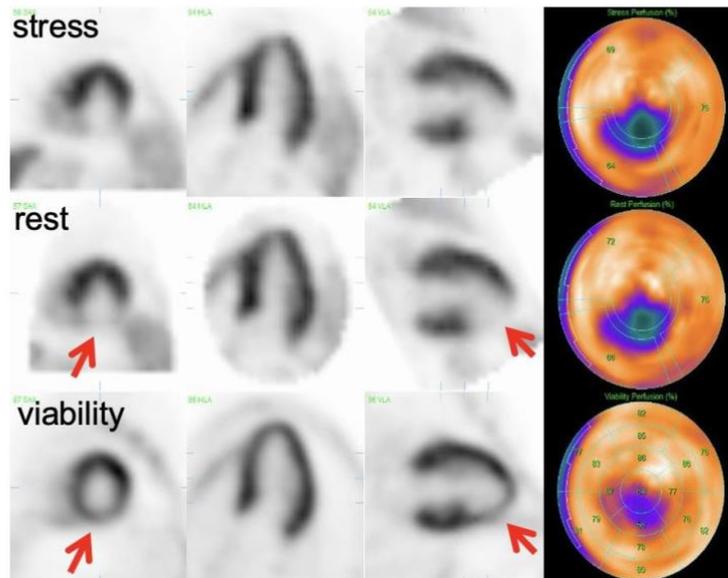
Tiga pola pertama menunjukkan adanya miokardium yang viabel.
Hanya pola yang terakhir, dimana defek perfusi dan defek metabolisme sesuai, menunjukkan adanya jaringan skar (non-viabel)

CASE 75yo F

HD(+), ASO(+), DM(-), HT(+), HL(+), smoking(-)

2010/7/27 PCI #7

Ammonia



FDG

Gambar 3.5 Interpretasi viabilitas berdasarkan perbandingan perfusi (aliran darah miokardium) dan metabolisme (ambilan ¹⁸F-Fluorodeoxyglucose). Didapatkan defek perfusi dan defek metabolisme yang sesuai menunjukkan adanya jaringan skar (non-viabel)

DAFTAR PUSTAKA

1. Dorbala S, Ananthasubramaniam K, Armstrong IS, Chareonthaitawee P, DePuey EG, Einstein AJ, et al. ASNC SPECT Imaging guidelines/Single photon emission computed tomography (SPECT) myocardial perfusion imaging guidelines: instrumentation, acquisition, processing, and interpretation. *J Nucl Cardiol*. 2018. doi:10.1007/s12350-018-1283-y.
2. Henzlova MJ, Duvall WL, Einstein AJ, Travin MI, and Verberne HJ. ASNC imaging guidelines for SPECT nuclear cardiology procedures: Stress, protocols, and tracers. *J Nucl Cardiol*. 2016. doi:10.1007/s12350-015-0387-x
3. Dorbala S and Di Carli MF. Nuclear Cardiology. Twelve edition Braunwald's Heart Disease; A textbook of cardiovascular medicine. Chapter 18. 2021.
4. Slomka PJ, Berman DS, and Germano G. Normal limits for transient ischemic dilation with 99mTc myocardial perfusion SPECT protocols. *J Nucl Cardiol* 2017;24:1709-11.
5. Dilsizian V, Bacharach SL, Beanlands RS, Bergmann SR, Delbeke D, Gropler RJ, et al. ASNC imaging guidelines/SNMMI procedure standard for positron emission tomography (PET) nuclear cardiology procedures. *J Nucl Cardiol*. 2016. doi:10.1007/s12350-016-0522-3.
6. Sciagrà R, Lubberink M, Hyafil F, Saraste A, Slart RHJA, Agostini D, et al. EANM procedural guidelines for PET/CT quantitative myocardial perfusion imaging. *J Nucl Med Mol Imaging*. 2021;48(4):1040-1069. doi: 10.1007/s00259-020-05046-9. Epub 2020 Nov 2.
7. Elkholy KO, Hegazy O, Okunade A, Aktas S, Ajibawo T. Regadenoson Stress Testing: A Comprehensive Review With a Focused Update. *Cureus*. 2021. doi: 10.7759/cureus.12940.

ISBN 978-623-6311-39-4 (PDF)



9 786236 311394



Secretariat

INDONESIAN HEART ASSOCIATION

Pengurus Pusat Perhimpunan Dokter spesialis Kardiovaskular Indonesia (PP PERKI)
Heart House, Jl. Katalila Raya No.5, Kota Bambu Utara Jakarta Barat 11430 - Indonesia

Phone: (62)(21)5681149 - Fax : (62)(21) 5684220,

E-mail: secretariat@inaheart.org

Website: www.inaheart.org