

Tinjauan Sistematis Teknik Reduksi Noise Pada Citra CT Scan Thoraks Untuk Peningkatan Kualitas Diagnostik

Wahyudi Wahyudi^{1*}, Jumardin Jumardin¹

¹Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar

Email: yudifomous@gmail.com

ABSTRACT:

The use of low-dose protocols in CT examinations is increasingly preferred to reduce radiation exposure in patients. However, this reduction in dose causes an increase in noise which results in a decrease in image quality and potentially interferes with diagnostic accuracy. To overcome this problem, various image reconstruction techniques have been developed, ranging from filtered back projection reconstruction, iterative reconstruction, hybrid iterative reconstruction, to artificial intelligence-based reconstruction. This study examined five journals that compared the performance of various reconstruction methods based on two objective parameters, namely the signal-to-noise ratio (SNR) and the contrast-to-noise ratio (CNR). The results show that filtered back projection reconstruction produces the lowest image quality because it does not have a noise control model, while iterative reconstruction is able to suppress noise but often produces images that are too smooth, resulting in reduced anatomical detail. In contrast, artificial intelligence-based reconstruction, especially high-level artificial intelligence, consistently provides the highest SNR and CNR, maintain fine anatomical details, and preserve edge sharpness even when radiation dose is significantly reduced. Based on the overall findings, high-level artificial intelligence-based reconstruction is the most effective and recommended method for improving low-dose CT image quality without compromising clinical assessment reliability.

Keywords : CT Scan; Diagnostic; Image; Reconstruction; Thorax

ABSTRAK:

Penggunaan protokol dosis rendah pada pemeriksaan CT semakin diutamakan untuk mengurangi paparan radiasi pada pasien. Namun, penurunan dosis ini menyebabkan peningkatan derau yang berakibat pada turunnya kualitas citra dan berpotensi mengganggu ketepatan diagnosis. Untuk mengatasi masalah tersebut, berbagai teknik rekonstruksi citra telah dikembangkan, mulai dari rekonstruksi proyeksi balik terfilter, rekonstruksi iteratif, rekonstruksi iteratif hibrida, hingga rekonstruksi berbasis kecerdasan buatan. Penelitian ini menelaah lima jurnal yang membandingkan kinerja berbagai metode rekonstruksi berdasarkan dua parameter objektif, yaitu rasio sinyal terhadap derau (SNR) dan rasio kontras terhadap derau (CNR). Hasil telaah menunjukkan bahwa rekonstruksi proyeksi balik terfilter menghasilkan kualitas citra paling rendah karena tidak memiliki model pengendalian derau, sedangkan rekonstruksi iteratif mampu menekan derau namun sering menimbulkan citra yang terlalu halus sehingga detail anatomi berkurang. Sebaliknya, rekonstruksi berbasis kecerdasan buatan khususnya tingkat tinggi secara konsisten memberikan nilai SNR dan

*email: yudifomous@gmail.com

CNR tertinggi, mampu mempertahankan detail anatomi halus, serta menjaga ketajaman tepi meskipun dosis radiasi sangat diturunkan. Berdasarkan keseluruhan temuan, rekonstruksi berbasis kecerdasan buatan tingkat tinggi merupakan metode yang paling efektif dan paling direkomendasikan untuk meningkatkan kualitas citra CT dosis rendah tanpa mengurangi keandalan penilaian klinis.

Kata Kunci: Citra; CT Scan; Diagnostik; Rekonstruksi; Thoraks

PENDAHULUAN

Pencitraan medis memainkan peran sentral dalam penegakan diagnosis karena mampu memvisualisasikan struktur internal tubuh secara *non-invasif* dengan waktu akuisisi yang cepat. Di antara berbagai modalitas, *Computed Tomography* (CT) menonjol karena memberikan *resolusi spasial* tinggi dan kontras jaringan yang baik, terutama pada organ thoraks seperti paru dan mediastinum. Dalam praktik klinis, kebutuhan untuk mengurangi risiko paparan radiasi telah mendorong peningkatan penggunaan *low-dose chest CT*, terutama selama pandemi COVID-19. Penurunan dosis radiasi ini secara langsung meningkatkan *noise* citra yang dapat mengganggu deteksi kelainan halus pada jaringan paru (Suliman dkk., 2023).

Noise pada citra CT terutama berasal dari variasi jumlah foton akibat pengurangan dosis, parameter akuisisi (mAs/kVp), morfologi pasien, serta karakteristik hamburan jaringan. Kondisi ini menurunkan *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) dan *Contrast-to-Noise Ratio* (CNR), membuat tepi anatomi tampak kabur dan struktur patologis berukuran kecil sulit dikenali. Reduksi *noise* tidak hanya ditujukan untuk memperbaiki metrik kuantitatif seperti *Peak Signal-to-Noise Ratio* (PSNR) dan *Structural Similarity Index Measure* (SSIM), tetapi juga untuk menjaga keterbacaan diagnostik citra oleh radiolog dalam konteks klinis nyata (Sadia dkk., 2024).

Pendekatan reduksi *noise* pada CT Thoraks umumnya terbagi menjadi tiga kategori utama: (1) Filter berbasis citra (misalnya *bilateral*, *non-local means*, *wavelet*, *BM3D*); (2) *Iterative Reconstruction* (IR) yang memodelkan proses fisis pencitraan CT; dan (3) *Deep Learning Reconstruction* (DLR) yang mempelajari pola *noise* dan struktur anatomi dari data dalam skala besar. Metode berbasis filter sederhana memang mudah diterapkan namun berpotensi menghilangkan detail halus, sedangkan IR dapat menghasilkan tekstur citra yang tampak terlalu halus atau. DLR mampu menjaga detail anatomis sekaligus menekan *noise* secara signifikan (Abuya dkk., 2025).

Studi klinis menunjukkan bahwa DLR memberikan peningkatan kualitas citra yang konsisten, terutama dalam *low-dose chest CT*, dengan peningkatan SNR, CNR, ketajaman tepi, dan *penilaian radiolog* yang lebih baik dibandingkan dengan teknik IR. Pada penelitian *Korean Journal of Radiology*, DLR terbukti mengurangi *noise* lebih efektif dibanding ASiR-V, serta mempertahankan tekstur paru yang natural, sehingga meningkatkan akurasi identifikasi lesi (Zhao dkk., 2022). Penelitian lanjutan pada model pasien dan *phantom* juga mendukung keunggulan DLR, terutama dalam skenario *ultra-low-dose*, yang menuntut keseimbangan antara keselamatan radiasi dan kualitas diagnostik. Model DLR mampu mempertahankan detail anatomi, bahkan pada *dose index* yang sangat rendah, tanpa

menghasilkan artefak tekstur (Tian dkk., 2022). Implementasi DLR masih menghadapi tantangan, seperti keterbatasan dataset pelatihan representatif, variasi protokol antar rumah sakit, dan kebutuhan validasi *lintas vendor scanner*. Generalisasi model merupakan isu penting agar metode DLR tidak hanya unggul dalam penelitian, tetapi juga stabil dalam praktik klinis sehari-hari (Kim dkk., 2024).

Penelitian terbaru mulai mengeksplorasi pendekatan *hybrid IR-DLR* untuk menggabungkan keunggulan pemodelan fisis dan pembelajaran *data-driven*, meskipun validasi klinis jangka panjang masih diperlukan (J. Wang dkk., 2025). Penelitian ini bertujuan untuk melakukan tinjauan sistematis terhadap berbagai teknik reduksi *noise* pada citra CT Thoraks yang dipublikasikan antara tahun 2020–2025, dengan mengevaluasi efektivitas pendekatan *filtering*, *Iterative Reconstruction* (IR), serta *Deep Learning Reconstruction* (DLR) berdasarkan parameter SNR, CNR, PSNR, SSIM, ketajaman tepi, tekstur anatomi, dan keterbacaan diagnostik citra, serta mengidentifikasi kelebihan, keterbatasan, dan rekomendasi implementasi dalam praktik klinis.

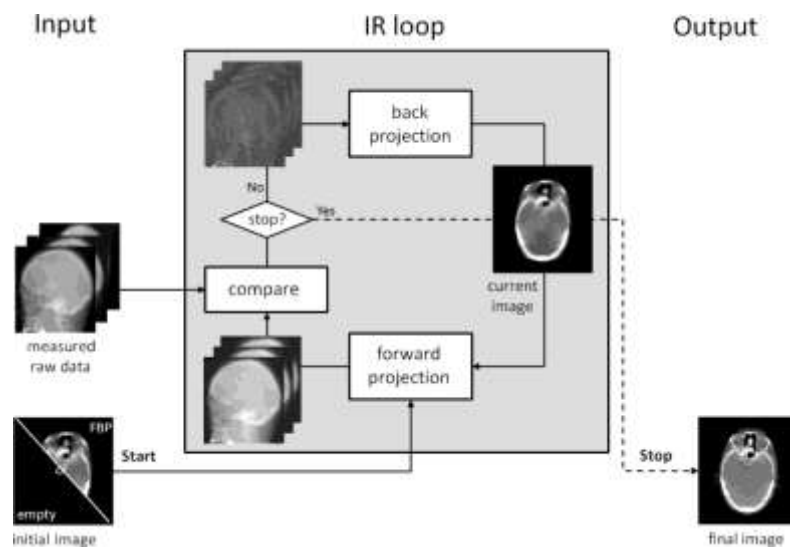
METODE PENELITIAN

Proses ekstraksi data dilakukan secara sistematis pada seluruh artikel yang telah memenuhi kriteria inklusi untuk selanjutnya disintesis dan dianalisis secara komparatif. Informasi yang diekstraksi dari setiap studi dikategorikan menjadi beberapa variabel kunci. Kategori pertama mencakup identitas studi (peneliti dan tahun) dan desain penelitian, seperti jenis dataset yang digunakan (pasien klinis atau *phantom*) serta *parameter akuisisi* CT (*kVp*, *mAs*, dan tingkat dosis radiasi). Kategori kedua berfokus pada *metode reduksi noise* yang diinvestigasi (*filtering*, *Iterative Reconstruction*, *Deep Learning Reconstruction*, atau *hybrid*). Kategori ketiga mengumpulkan *metrik kualitas citra* kuantitatif yang meliputi *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), *Contrast-to-Noise Ratio* (CNR).

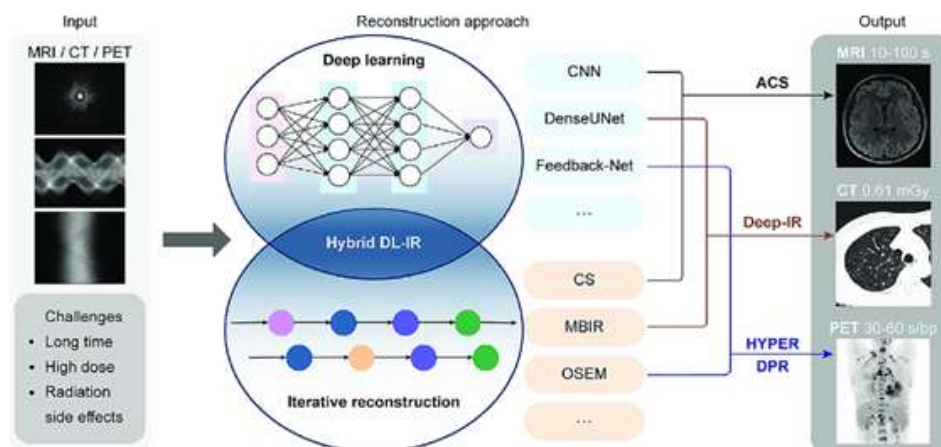
Iterative Reconstruction (IR) merupakan teknik rekonstruksi CT lanjutan yang bekerja secara berulang (*iterative loop*) untuk menghasilkan citra dengan *noise* yang lebih rendah dibanding *Filtered Back Projection* (FBP). Pada metode ini, data proyeksi terukur (*raw data*) dibandingkan dengan proyeksi sintesis yang dihasilkan dari citra tebakan awal melalui proses *forward projection*; selisih antara keduanya dihitung sebagai *error* lalu diproyeksikan kembali ke domain citra melalui *back projection* untuk memperbaiki estimasi citra. Siklus ini diulang hingga kriteria konvergensi terpenuhi, menghasilkan citra akhir yang lebih konsisten dengan data fisik dan memiliki kontrol *noise* yang lebih baik. Untuk menjaga keseimbangan antara reduksi *noise* dan pelestarian tepi anatomi, IR memasukkan *regularization* berbasis model statistik atau *edge-preserving priors*, sehingga *noise* berkurang tanpa menciptakan artefak tekstur yang berlebihan. Pada gambar skema IR *loop* seperti pada gambar 1 (Beister dkk., 2012).

Metode *Deep Learning Image Reconstruction* (DLIR) merupakan pendekatan rekonstruksi citra generasi terbaru yang memanfaatkan jaringan saraf dalam untuk mempelajari hubungan *non-linier* antara data dosis rendah dan citra referensi berkualitas tinggi, sehingga mampu menekan *noise*, mempertahankan tekstur anatomis, dan

meningkatkan ketepatan diagnostik secara lebih unggul dibandingkan metode rekonstruksi tradisional. DLIR bekerja dengan mengekstraksi *fitur multi-level* melalui arsitektur seperti CNN, *DenseUNet*, atau *Feedback-Net*, yang kemudian menghasilkan citra CT dengan keseimbangan optimal antara *noise suppression*, *edge preservation*, dan *texture fidelity*. Keunggulan DLIR ini mendorong pengembangan pendekatan hibrid seperti *Hybrid DL-IR*, yang menggabungkan kemampuan *data-driven learning* dari *deep learning* dengan konsistensi fisika dan stabilitas matematis dari iterative reconstruction konvensional, menghasilkan model yang lebih robust terhadap variasi dosis, artefak, dan kompleksitas anatomi. Konsep tersebut divisualisasikan pada Gambar 2 (Koetzier dkk., 2023; Szczykutowicz dkk., 2022)

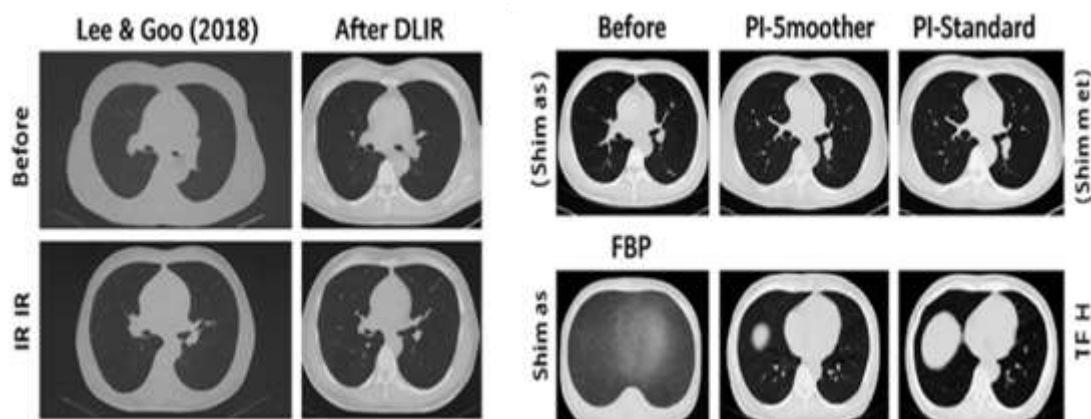


Gambar 1. Skema *IR loop* (Beister dkk., 2012)



Gambar 2. Integrasi *deep learning* dan *IR* (Koetzier dkk., 2023; Szczykutowicz dkk., 2022)

Untuk memberikan gambaran visual mengenai perbedaan kualitas citra antara metode rekonstruksi tradisional dan berbasis kecerdasan buatan, Gambar 3 menyajikan perbandingan citra CT thoraks sebelum rekonstruksi (FBP), setelah *Iterative Reconstruction* (IR), dan setelah *Deep Learning Image Reconstruction* (DLIR). Visualisasi ini menunjukkan bahwa DLIR mampu menekan *noise* secara signifikan sambil mempertahankan detail anatomi yang tidak dapat dipertahankan oleh IR konvensional



Gambar 3. Perbandingan Citra CT Sebelum dan Sesudah Rekonstruksi IR dan DLIR

Tabel 1. Ringkasan Penelitian Metode *Iterative Reconstruction* (IR) pada *Low-Dose CT Thoraks*

No	Dataset Pasien	Metode IR	Parameter CT	Temuan utama	Peneliti
1.	57 pasien CT dada (low-dose & standard-dose)	I30f (IR strength 1, 3, 5) (Sinogram-affirmed IR/SAFIRE)	Kernel B30f, IR strength 1/3/5, total 228 citra untuk analisis	IR menurunkan <i>noise</i> dan meningkatkan SNR & CNR dibanding FBP.	(Lee & Goo, 2018)
2.	90 pasien LDCT vs SDCT	ASIR-V, IMR, AIDR-3D (Iterative Reconstruction vendor-based)	LDCT: 20 mA; tegangan 120 kVp; potongan 1–1.25 mm	IR meningkatkan kualitas citra dibanding FBP; DL bahkan mengungguli IR namun IR tetap efektif untuk LDCT.	(Jiang dkk., 2022)

No	Dataset Pasien	Metode IR	Parameter CT	Temuan utama	Peneliti
3.	Phantom & pasien (evaluasi IR vs DLIR)	Hybrid IR (vendor-based)	80–120 kVp; low-dose protocol; slice 1–2 mm	Kualitas sebanding dengan dosis tinggi IR mengurangi <i>noise</i> tetapi menghasilkan tekstur yang lebih halus; DLIR menunjukkan peningkatan SNR & CNR di atas IR.	(Shim dkk., 2025)
4.	Pasien CT Dada (Standard vs Low-dose)	ClearView IR (20–80%)	Standard dose vs Low dose, 120 kVp	ClearView IR meningkatkan SNR & CNR pada LDCT	(Zhang dkk., 2025)
5.	Phantom & pasien (Airway / Lung)	AR50 (Iterative Reconstruction)	120 kVp, 25 mAs	IR menurunkan <i>noise</i> ; DLR & DLR+filter punya SNR/CNR jauh lebih tinggi	(Hwang dkk., 2024)

Tabel 2. Ringkasan Penelitian Metode *Deep Learning Reconstruction* (DLR) pada *Low-Dose CT Thoraks*

No	Dataset Pasien	Metode Reduksi Noise	Parameter CT	Temuan Utama	Peneliti
1.	Phantom thorax – nodul solid (Low-dose & ULDCT)	FBP, ASIR-V50/80, DLIR-L/M/H	Variasi mA; protokol ultra-low-dose	DLIR-H memberikan peningkatan SNR & CNR terbesar; kualitas terbaik dibanding FBP & ASIR-V	(Jung dkk., 2023a)
2.	Pasien CT thoraks – low-dose chest CT	IR (ASIR-V50) vs DLIR-L/M/H	Protokol low-dose; evaluasi paru	DLIR meningkatkan SNR & CNR secara signifikan dan	(Jiang dkk., 2022)

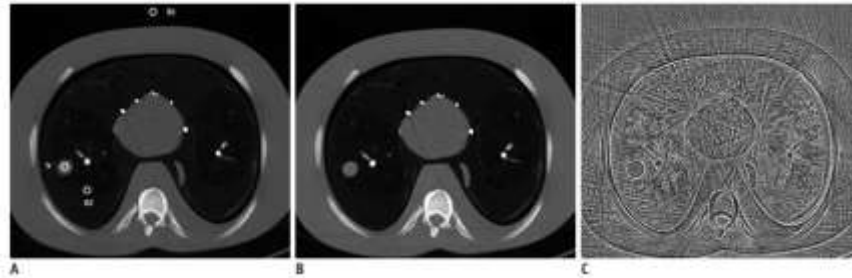
No	Dataset Pasien	Metode Reduksi Noise	Parameter CT	Temuan Utama	Peneliti
				mempertahankan tekstur paru lebih natural	
3.	Pasien CT abdomen – liver/pancreas/spleen	ASIR-V40 vs DLIR-L/M/H	Slice thickness 1.25 mm & 5 mm	DLIR-M/H meningkatkan SNR; hasil mendekati IR terutama pada pasien BMI tinggi	(Wang dkk., 2024)
4.	Pasien Pediatric Cardiac CT	ASIR-V vs DLIR-L/M/H	Dosis rendah; evaluasi RV, LV, aorta	DLIR-H menghasilkan SNR & CNR tertinggi untuk struktur jantung	(Cho dkk., 2024)
5.	Pasien CT Abdomen–Pelvis (BMI > 25)	IR vs DLIR	Low-dose protocol; evaluasi liver, pancreas, spleen	DLIR setara IR pada BMI tinggi; CE-Boost meningkatkan SNR & CNR signifikan	(Otgonbaatar dkk., 2025)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 3. Ringkasan Penelitian hasil *Iterative Reconstruction (IR)* pada *Low-Dose CT Thoraks*

No	Metode	SNR	CNR	Peneliti
1.	FBP	7,5	103,1	(Lee & Goo, 2018)
	IR Level 1	7,0	110,2	
	IR Level 3	5,9	128,5	
	IR Level 5	4,8	151,1	
2.	IR	16,4	2,218	(Jiang dkk., 2022)
	DLIR	23,7	3,318	
3.	Hybrid IR	74,65	379,21 – 470,64	(Shim dkk., 2025b)
	DLIR	115,0	524,22 – 560,03	
4.	Standard-dose	6,58 ± 1,70	175,96 ± 26,06	(Zhang dkk., 2025)
	Low-dose (IR 20–80%)	4,17 ± 1,02	141,23 ± 19,04	
5.	IR (AR50)	10,02 ± 1,65	9,80 ± 1,02	(Hwang dkk., 2024)
	DLIR	54,96 ± 23,67	60,50 ± 6,44	

Sebagai pendukung hasil kuantitatif pada Tabel 3 dan Gambar 4 menampilkan perbandingan visual citra CT thoraks hasil rekonstruksi FBP dan IR guna menunjukkan dampak reduksi noise dan efek pengaburan citra secara langsung.



Gambar 4. Perbandingan citra CT aksial fantom dada hasil rekonstruksi FBP dan *Iterative Reconstruction (IR)* pada 70 kVp.

Penelitian (Lee & Goo, 2018) menunjukkan bahwa metode *rekonstruksi Filtered Back Projection (FBP)* menghasilkan nilai SNR paling rendah (7,5) dibandingkan metode lain, yang dapat dipahami karena FBP tidak memiliki mekanisme reduksi derau berbasis model dan hanya mengandalkan operasi linier yang sangat sensitif terhadap fluktuasi jumlah foton. Pada kondisi dosis radiasi rendah, jumlah foton yang mencapai detektor menurun sehingga quantum noise meningkat secara signifikan, menyebabkan sinyal menjadi tidak stabil dan detail anatomi sulit dibedakan, sehingga FBP tidak ideal untuk protokol *low-dose CT*. Temuan kuantitatif ini diperkuat secara visual pada Gambar 4, yang memperlihatkan pengaruh penerapan *Iterative Reconstruction (IR)* pada citra CT fantom dada pada dosis referensi dan tegangan tabung 70 kVp. Pada panel A, citra FBP menunjukkan derau tinggi terutama pada area paru dan latar belakang udara, meskipun nodul paru masih dapat dikenali dan lokasi *region of interest (ROI)* untuk evaluasi kuantitatif dapat diidentifikasi. Pada panel B, rekonstruksi menggunakan *sinogram-affirmed IR* dengan kekuatan level 5 menunjukkan penurunan derau yang jelas dibandingkan FBP, namun disertai peningkatan efek pengaburan citra (*image blurring*) pada batas tepi struktur fantom akibat proses *smoothing* iteratif, sementara artefak *beam hardening* dari simulasi arteri koroner relatif tidak berubah. Selanjutnya, panel C yang merupakan citra hasil pengurangan antara FBP dan IR (B30f – I30f_5) menampilkan perbedaan halus yang sulit dikenali secara visual langsung, termasuk perubahan pola derau dan batas struktur fantom, yang menjelaskan terjadinya pengaburan citra akibat IR. Secara keseluruhan, hasil visual dan kuantitatif ini menegaskan bahwa meskipun IR efektif dalam menurunkan derau dan meningkatkan CNR, peningkatan tersebut tidak selalu diikuti oleh peningkatan ketajaman anatomi, sehingga keterbatasan IR ini menjadi dasar penting bagi pengembangan dan penerapan metode rekonstruksi berbasis *deep learning (DLIR)* yang bertujuan menekan derau secara optimal sambil mempertahankan detail anatomi.

Pada dataset yang sama, metode *Iterative Reconstruction (IR)* tingkat 1 hingga 5 menunjukkan pola yang menarik. Nilai CNR meningkat dari 110 menjadi 151 seiring

peningkatan level IR, namun SNR justru menurun dari 7,0 menjadi 4,8. Fenomena ini disebabkan oleh karakteristik IR yang menghaluskan citra secara progresif untuk menekan *noise*. Walaupun *smoothing* tersebut menghasilkan peningkatan CNR, proses ini secara bersamaan menurunkan ketajaman tepi dan detail frekuensi tinggi, sehingga nilai SNR mengalami penurunan. Sebagaimana disampaikan (Jiang dkk., 2022) IR pada level tinggi dapat menyebabkan citra tampak terlalu halus atau menyerupai tekstur plastik, yang dapat mengurangi akurasi identifikasi struktur halus pada paru.

Sebaliknya, *Deep Learning Image Reconstruction* (DLIR) menunjukkan performa yang sangat unggul pada hampir semua jurnal. Pada penelitian Jiang dkk., (2022), peralihan dari IR ke DLIR menghasilkan peningkatan SNR dari 16,4 menjadi 23,7 dan CNR dari 2,218 menjadi 3,318. Peningkatan signifikan ini terjadi karena DLIR memanfaatkan jaringan saraf dalam yang dilatih dengan ribuan citra *full-dose* untuk mempelajari hubungan antara citra *noise* dan citra berkualitas tinggi. Dengan demikian, DLIR mampu menekan *noise* secara adaptif sembari mempertahankan struktur anatomi yang halus, seperti bronkiolus, pleura, dan nodul subsolid. Hal ini sejalan dengan temuan Zhao dkk., (2022) yang melaporkan bahwa DLIR dapat merekonstruksi tekstur paru secara lebih natural dibandingkan IR maupun *hybrid* IR.

Selanjutnya, studi Shim dkk.,(2025) memperlihatkan bahwa meskipun metode *hybrid* IR mampu menghasilkan CNR 379–470, hasil tersebut masih berada di bawah performa DLIR, yang mencapai CNR 524–560 dan SNR hingga 115,0. *Hybrid IR* menggabungkan pendekatan iteratif dan statistik, namun tetap memiliki keterbatasan *smoothing* yang serupa dengan IR konvensional. Di sisi lain, DLIR tidak hanya mengurangi *noise*, tetapi juga mempertahankan tekstur alami jaringan paru dan mediastinum, sehingga menghindari artefak permukaan yang sering muncul pada IR.

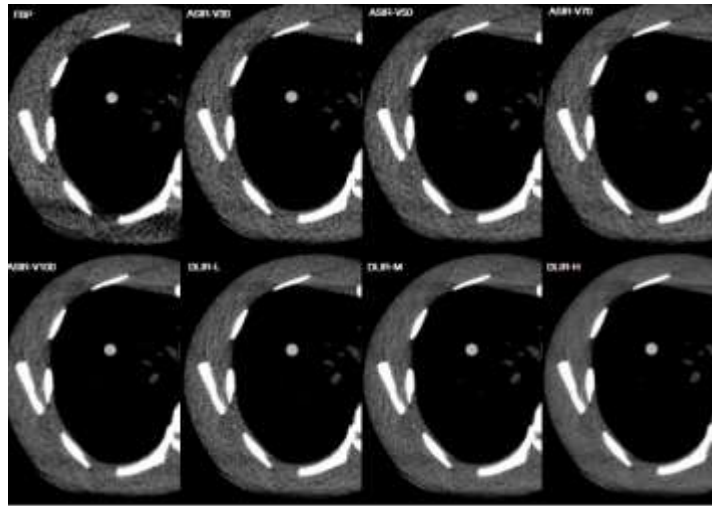
Penelitian Zhang dkk., (2025) menguatkan temuan tersebut dengan menunjukkan bahwa pada *standard-dose* CT, nilai SNR mencapai 6,58 dan CNR 175,96. Namun, ketika dosis diturunkan dengan IR (20–80%), nilai SNR menurun menjadi 4,17 dan CNR menjadi 141,23. Hal ini menandakan bahwa IR tidak lagi mampu mempertahankan kualitas citra yang memadai pada *ultra-low-dose* CT. Sebaliknya, studi Hwang dkk., (2024) memperlihatkan bahwa DLIR mampu meningkatkan SNR hampir lima kali lipat (10,02 menjadi 54,96) dan CNR hampir enam kali lipat (9,80 menjadi 60,50) pada *low-dose pediatric cardiac* CT, sehingga menunjukkan ketahanannya terhadap degradasi akibat penurunan dosis radiasi.

Secara keseluruhan, temuan dari seluruh jurnal secara konsisten menunjukkan bahwa DLIR, terutama pada level High (DLIR-H), merupakan metode rekonstruksi yang paling unggul dalam menekan *noise* sekaligus mempertahankan detail anatomi. DLIR tidak hanya memberikan peningkatan SNR dan CNR yang paling besar, tetapi juga menjaga tekstur citra tetap natural dan stabil pada berbagai tingkat penurunan dosis. Dengan demikian, DLIR-H adalah metode rekonstruksi yang paling direkomendasikan untuk aplikasi klinis berbasis *low-dose* maupun *ultra-low-dose* CT.

Tabel 4. Ringkasan Penelitian hasil *Deep Learning Reconstruction (DLR)* pada *Low-Dose CT Thoraks*

No	Metode	Roi	SNR	CNR	Peneliti
1	FBP	Nodul solid	$1,15 \pm 0,18$	$15,46 \pm 0,50$	(Jung dkk., 2023)
	ASIR-V 50		$2,36 \pm 0,77$	$25,20 \pm 1,61$	
	ASIR-V 80		$4,25 \pm 1,46$	$34,08 \pm 2,93$	
	DLIR-L		$7,32 \pm 0,71$	$74,35 \pm 6,52$	
	DLIR-M		$9,70 \pm 0,74$	$101,25 \pm 18,17$	
	DLIR-H		$15,00 \pm 0,22$	$165,72 \pm 11,06$	
2.	IR (ASIR-V50)	Paru	$6,32 \pm 1,41$	$12,43 \pm 2,11$	(Jiang dkk., 2022)
	DLIR-L		$10,28 \pm 2,15$	$18,65 \pm 3,44$	
	DLIR-M		$12,93 \pm 2,67$	$22,11 \pm 3,98$	
	DLIR-H		$14,21 \pm 2,74$	$24,93 \pm 4,21$	
3	ASIR-V40 (1.25 mm)	Liver	$2,60 \pm 0,63$	-	(Wang dkk., 2023)
	DLIR-L (1.25 mm)		$3,70 \pm 0,78$	-	
	DLIR-M (1.25 mm)		$5,64 \pm 1,20$	-	
	DLIR-H		$5,64 \pm 1,20$	-	
4	ASIR-V	RV wall	14,28	16,92	(Cho dkk., 2024)
	DLIR-L		16,50	17,02	
	DLIR-M		17,92	17,60	
	DLIR-H		18,83	18,83	
5.	IR	Liver	8,32	12,41	(Otgonbaatar dkk., 2025)
	DLIR		7,87	11,93	
	IR	Pancreas	7,82	10,32	
	DLIR		7,43	9,80	
	IR	Spleen	10,69	14,90	
	DLIR		10,11	14,32	

Temuan kuantitatif pada Tabel 4 diperkuat oleh visualisasi pada Gambar 5, yang menampilkan perbandingan langsung citra CT nodul paru hasil rekonstruksi menggunakan (FBP), ASiR-V pada berbagai tingkat rekonstruksi,(DLIR) pada level rendah hingga tinggi (L–H) pada protokol CT dosis rendah.



Gambar 5. Perbandingan citra nodul CT dosis rendah (25 mAs, 120 kVp) menggunakan FBP, ASiR-V, dan DLIR.

Pada penelitian Jung dkk.,(2023), metode Filtered Back Projection (FBP) menghasilkan nilai SNR dan CNR terendah, masing-masing sebesar $1,15 \pm 0,18$ dan $15,46 \pm 0,50$, yang mencerminkan keterbatasan fundamental FBP pada protokol CT dosis rendah. Kondisi ini terjadi karena FBP tidak memiliki mekanisme pemodelan derau, sehingga proses rekonstruksi yang sepenuhnya bersifat linier sangat sensitif terhadap fluktuasi jumlah foton; penurunan dosis menyebabkan peningkatan quantum noise yang signifikan dan berujung pada rendahnya kontras nodul terhadap jaringan paru sekitarnya. Penerapan rekonstruksi iteratif ASIR-V pada tingkat 50% dan 80% menunjukkan peningkatan bertahap nilai SNR (2,36 menjadi 4,25) dan CNR (25,20 menjadi 34,08) akibat kemampuan metode ini dalam menghaluskan derau, namun pada level tinggi efek *smoothing* menjadi semakin dominan sehingga tekstur paru tampak kurang natural dan detail struktural frekuensi tinggi mulai tereduksi. Fenomena ini juga tercermin secara visual pada perbandingan citra nodul paru yang direkonstruksi pada dosis rendah 25 mAs dan 120 kVp, di mana FBP menampilkan pola derau granular yang jelas, sementara ASIR-V menekan derau secara progresif tetapi disertai penurunan ketajaman tepi nodul. Sebaliknya, rekonstruksi berbasis pembelajaran mendalam (DLIR) pada level rendah hingga tinggi memperlihatkan penurunan derau yang signifikan tanpa mengorbankan detail anatomi, dengan DLIR-H menghasilkan kombinasi paling optimal berupa SNR tertinggi ($15,00 \pm 0,22$), CNR tertinggi ($165,72 \pm 11,06$), tepi nodul yang tajam, serta tekstur paru yang tetap alami. Secara keseluruhan, baik hasil kuantitatif maupun evaluasi visual pada gambar menunjukkan bahwa performa rekonstruksi meningkat secara konsisten dari FBP ke ASIR-V dan mencapai kualitas terbaik pada DLIR, khususnya pada level tinggi, sehingga DLIR menjadi metode yang paling unggul untuk evaluasi nodul paru pada CT dosis rendah.

Tren serupa terlihat pada penelitian paru oleh Jiang dkk., (2022). Pada IR ASIR-V50, nilai SNR $6,32 \pm 1,41$ dan CNR $12,43 \pm 2,11$ masih menunjukkan keterbatasan IR untuk mempertahankan kualitas citra pada protokol *low-dose*. Namun, penggunaan DLIR-L hingga DLIR-H secara konsisten meningkatkan SNR ($10,28 \rightarrow 14,21$) dan CNR ($18,65 \rightarrow 24,93$). Kenaikan ini menggambarkan bahwa deep learning dapat merekonstruksi tekstur paru secara lebih natural dan stabil dibanding IR konvensional, terutama untuk lesi kontras rendah seperti *ground-glass opacity*.

Pada organ liver Wang dkk., (2023), ASIR-V40 menghasilkan SNR $2,60 \pm 0,63$. DLIR-L dan DLIR-M meningkatkan SNR hingga 5,64, hampir dua kali lipat dibandingkan IR. CNR tidak tersedia, tetapi peningkatan SNR menunjukkan bahwa DLIR mampu mempertahankan gradien kontras intraparenkim, suatu aspek yang penting dalam evaluasi lesi hipodens hati. DLIR-H mempertahankan nilai SNR tertinggi, meskipun sama dengan level M karena keterbatasan protokol tertentu. Hasil penelitian Cho dkk., (2024) pada dinding ventrikel kanan (*RV wall*) menunjukkan fenomena menarik: ASIR-V menghasilkan SNR 14,28 dan CNR 16,92, namun DLIR-H menghasilkan peningkatan SNR tertinggi (18,83) dan CNR tertinggi (18,83). DLIR konsisten memberikan tekstur citra yang lebih natural, mengurangi artefak *smoothing*, dan menjaga definisi batas miokardium yang merupakan faktor penting untuk evaluasi struktur anatomi jantung.

Data dari Otgonbaatar dkk., (2025) memperlihatkan bahwa IR masih mampu menghasilkan nilai SNR dan CNR yang cukup tinggi pada beberapa organ abdomen, misalnya SNR 10,69 dan CNR 14,90 pada *spleen*. Namun, DLIR memberikan hasil lebih stabil antar organ, meskipun pada liver dan pancreas nilai SNR sedikit lebih rendah dibanding IR. Hal ini diduga terkait dengan karakteristik organ solid yang memiliki tekstur lebih homogen, sehingga algoritma IR kadang memberikan efek *smoothing* yang tidak terlalu merusak tekstur anatomis. Meski demikian, DLIR tetap memberikan citra yang lebih natural, mengurangi *over-smoothing*, dan mempertahankan tepi anatomi dengan lebih baik.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil sintesis dari lima jurnal mengenai rekonstruksi citra CT dosis rendah, dapat disimpulkan bahwa kualitas citra sangat ditentukan oleh kemampuan metode dalam menekan *noise* tanpa menghilangkan detail anatomi. FBP menunjukkan performa paling rendah karena tidak memiliki mekanisme pengendalian *noise*, sementara *Iterative Reconstruction* (IR) memberikan peningkatan CNR namun sering menghasilkan citra yang terlalu halus akibat *smoothing* berlebih. Sebaliknya, *Deep Learning Image Reconstruction* (DLIR) khususnya DLIR-H secara konsisten memberikan nilai SNR dan CNR tertinggi pada berbagai organ thoraks dan abdomen, menunjukkan kemampuan superior dalam mempertahankan tekstur anatomi, meningkatkan ketajaman tepi, dan menjaga stabilitas kualitas citra pada protokol *low-dose* hingga *ultra-low-dose*. Dengan demikian, DLIR-H merupakan metode rekonstruksi yang paling efektif dan direkomendasikan sebagai pilihan utama dalam praktik klinis yang menuntut keseimbangan optimal antara reduksi dosis radiasi dan kualitas diagnostik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abuya, T., Rimiru, R., & Okeyo, G. (2025). Adversarial Content–Noise Complementary Learning Model for Image Denoising and Tumor Detection in Low-Quality Medical Images. *Signals*, 6(2), 17. <https://doi.org/10.3390/signals6020017>
- Beister, M., Kolditz, D., & Kalender, W. A. (2012). Iterative reconstruction methods in X-ray CT. *Physica Medica*, 28(2), 94–108. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2012.01.003>
- Cho, H.-H., Lee, S. M., & You, S. K. (2024). Assessment of deep learning image reconstruction (DLIR) on image quality in pediatric cardiac CT datasets type of manuscript: Original research. *PLOS ONE*, 19(8), e0300090. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300090>
- Hwang, M.-H., Kang, S., Lee, J. W., & Lee, G. (2024). Deep Learning-Based Reconstruction Algorithm With Lung Enhancement Filter for Chest CT: Effect on Image Quality and Ground Glass Nodule Sharpness. *Korean Journal of Radiology*, 25(9), 833. <https://doi.org/10.3348/kjr.2024.0472>
- Jiang, J.-M., Miao, L., Liang, X., Liu, Z.-H., Zhang, L., & Li, M. (2022). The Value of Deep Learning Image Reconstruction in Improving the Quality of Low-Dose Chest CT Images. *Diagnostics*, 12(10), 2560. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12102560>
- Jung, Y., Hur, J., Han, K., Imai, Y., Hong, Y. J., Im, D. J., Lee, K. H., Desnoyers, M., Thomsen, B., Shigemasa, R., Um, K., & Jang, K. (2023a). Radiation dose reduction using deep learning-based image reconstruction for a low-dose chest computed tomography protocol: A phantom study. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, 13(3), 1937–1947. <https://doi.org/10.21037/qims-22-618>
- Jung, Y., Hur, J., Han, K., Imai, Y., Hong, Y. J., Im, D. J., Lee, K. H., Desnoyers, M., Thomsen, B., Shigemasa, R., Um, K., & Jang, K. (2023b). Radiation dose reduction using deep learning-based image reconstruction for a low-dose chest computed tomography protocol: A phantom study. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, 13(3), 1937–1947. <https://doi.org/10.21037/qims-22-618>
- Kim, W., Jeon, S.-Y., Byun, G., Yoo, H., & Choi, J.-H. (2024). A systematic review of deep learning-based denoising for low-dose computed tomography from a perceptual quality perspective. *Biomedical Engineering Letters*, 14(6), 1153–1173. <https://doi.org/10.1007/s13534-024-00419-7>
- Koetzier, L. R., Mastrodicasa, D., Szczykutowicz, T. P., Van Der Werf, N. R., Wang, A. S., Sandfort, V., Van Der Molen, A. J., Fleischmann, D., & Willemink, M. J. (2023). Deep Learning Image Reconstruction for CT: Technical Principles and Clinical Prospects. *Radiology*, 306(3), e221257. <https://doi.org/10.1148/radiol.221257>
- Lee, K. B., & Goo, H. W. (2018). Quantitative Image Quality and Histogram-Based Evaluations of an Iterative Reconstruction Algorithm at Low-to-Ultralow Radiation Dose Levels: A Phantom Study in Chest CT. *Korean Journal of Radiology*, 19(1), 119. <https://doi.org/10.3348/kjr.2018.19.1.119>
- Otgonbaatar, C., Jeon, S.-H., Cha, S.-J., Shim, H., Kim, J. W., & Ahn, J.-H. (2025). Image quality and radiation dose of reduced-dose abdominopelvic computed tomography (CT) with silver filter and deep learning reconstruction. *Scientific Reports*, 15(1), 25757. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11184-7>
- Sadia, R. T., Chen, J., & Zhang, J. (2024). CT image denoising methods for image quality improvement and radiation dose reduction. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 25(2), e14270. <https://doi.org/10.1002/acm2.14270>
- Shim, J., Lee, Y., & Kim, K. (2025a). Quantitative Evaluation of Low-Dose CT Image Quality Using Deep Learning Reconstruction: A Comparative Study of Philips

- Precise Image and GE TrueFidelity. *Journal of Imaging*, 11(9), 317. <https://doi.org/10.3390/jimaging11090317>
- Shim, J., Lee, Y., & Kim, K. (2025b). Quantitative Evaluation of Low-Dose CT Image Quality Using Deep Learning Reconstruction: A Comparative Study of Philips Precise Image and GE TrueFidelity. *Journal of Imaging*, 11(9), 317. <https://doi.org/10.3390/jimaging11090317>
- Suliman, I. I., Khouqeer, G. A., Ahmed, N. A., Abuzaid, M. M., & Sulieman, A. (2023). Low-Dose Chest CT Protocols for Imaging COVID-19 Pneumonia: Technique Parameters and Radiation Dose. *Life*, 13(4), 992. <https://doi.org/10.3390/life13040992>
- Szczykutowicz, T. P., Toia, G. V., Dhanantwari, A., & Nett, B. (2022). A Review of Deep Learning CT Reconstruction: Concepts, Limitations, and Promise in Clinical Practice. *Current Radiology Reports*, 10(9), 101–115. <https://doi.org/10.1007/s40134-022-00399-5>
- Tian, Q., Li, X., Li, J., Cheng, Y., Niu, X., Zhu, S., Xu, W., & Guo, J. (2022). Image quality improvement in low-dose chest CT with deep learning image reconstruction. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 23(12), e13796. <https://doi.org/10.1002/acm2.13796>
- Wang, H., Li, X., Wang, T., Li, J., Sun, T., Chen, L., Cheng, Y., Jia, X., Niu, X., & Guo, J. (2023). The value of using a deep learning image reconstruction algorithm of thinner slice thickness to balance the image noise and spatial resolution in low-dose abdominal CT. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, 13(3), 1814–1824. <https://doi.org/10.21037/qims-22-353>
- Wang, J., Zhu, Z., Pan, Z., Tan, W., Han, W., Zhou, Z., Hu, G., Ma, Z., Xu, Y., Ying, Z., Sui, X., Jin, Z., Song, L., & Song, W. (2025). Deep learning reconstruction improves computer-aided pulmonary nodule detection and measurement accuracy for ultra-low-dose chest CT. *BMC Medical Imaging*, 25(1), 200. <https://doi.org/10.1186/s12880-025-01746-6>
- Zhang, H., Kondowe, B., Zhang, J., Xie, X., Song, Q., Niu, G., & Shang, J. (2025). Impact of reconstruction techniques on low dose chest CT image quality: Comparison of FBP, Clear View at Mzuzu Central Hospital, Malawi. *Malawi Medical Journal*, 36(5), 328–332. <https://doi.org/10.4314/mmj.v36i5.7>
- Zhao, R., Sui, X., Qin, R., Du, H., Song, L., Tian, D., Wang, J., Lu, X., Wang, Y., Song, W., & Jin, Z. (2022). Can deep learning improve image quality of low-dose CT: A prospective study in interstitial lung disease. *European Radiology*, 32(12), 8140–8151. <https://doi.org/10.1007/s00330-022-08870-9>