

Analisis Informasi Anatomi MSCT Head Dengan Variasi IBHC dan Kernel Untuk Mengurangi Artefak *Beam Hardening*

Johan Kholid Wijaya¹, Yeti Kartikasari², Andrey Nino Kurniawan³
^{1,2,3} Jurusan Teknik Radiodiagnostik dan Radioterapi Poltekkes Kemenkes Semarang

Corresponding Author: Yeti Kartikasari
e-mail: yetikartikasari@poltekkes-smg.ac.id

ABSTRACT

Background: Beam hardening artifact is one of the limitations of Multi-Slice Computed Tomography (MSCT), occurring due to changes in the X-ray spectrum when passing through dense materials. This artifact often appears in the head region, particularly in the posterior fossa, and can interfere with anatomical information and pixel intensity evaluation in MSCT images. The Iterative Beam Hardening Correction (IBHC) technique is used to iteratively reduce these artifacts during the post-processing stage. This study aims to determine the differences in anatomical information and beam hardening artifacts in head MSCT with variations of kernel and IBHC, and to identify the most optimal protocol.

Methods: This study utilized a quantitative-experimental design with a sample of 10 patients who underwent non-contrast MSCT head examinations at Oetomo Hospital, Bandung. The raw data were reconstructed into four variations: Hr40 + IBHC On, Hr40 + IBHC Off, Hc40 + IBHC On, and Hc40 + IBHC Off. Three radiologists evaluated the resulting images using a questionnaire to assess anatomical information (petrous bone, cerebellum, mid brain, pons) and beam hardening artifacts. Data analysis was performed using the Friedman test.

Results: The Friedman test showed a significant difference in overall anatomical information ($p=0.000, p<0.05$) and beam hardening artifacts ($p=0.002, p<0.05$). The analysis per anatomical structure revealed significant differences in the cerebellum and mid brain, but not in the petrous bone. Based on the mean rank, the Hc40 + IBHC On kernel combination provided the best anatomical information (3.00), followed by Hr40 + IBHC On (2.94), Hc40 + IBHC Off (2.15), and Hr40 + IBHC Off (1.91). For beam hardening artifacts, the Hc40 + IBHC On combination yielded the lowest value (1.80), indicating the most optimal artifact reduction.

Conclusions: There are significant differences in anatomical information and beam hardening artifacts with variations in kernel and IBHC during MSCT head examinations. The Hc40 kernel with IBHC On is the most optimal protocol, as it provides the best anatomical visualization and effectively reduces beam hardening artifacts. **Keywords:** MSCT Head, Kernel, IBHC, Beam Hardening Artifact.

Keyword : MSCT Head, Kernel, IBHC, Beam Hardening Artifact

Pendahuluan

Multi Slice Computed Tomography (MSCT) adalah salah satu alat pemeriksaan radiologi diagnostik untuk mengevaluasi berbagai kelainan yang menghasilkan udara, jaringan dan struktur tulang yang sangat jelas, meskipun tidak semua kelainan dapat dideteksi menggunakan MSCT, tetapi MSCT hanya dapat dilakukan dengan alasan medis yang benar dengan dosis radiasi yang minimum (Seeram, 2016).

Namun, teknik ini tidak sepenuhnya bebas dari kekurangan, salah satunya adalah munculnya artefak pada gambar yang dihasilkan. Artefak dapat mengurangi informasi anatomi dan mempersulit evaluasi intensitas nilai pixel CT yang digunakan

untuk menentukan kondisi jaringan, apakah normal atau terdapat kelainan. Salah satu jenis artefak yang sering ditemukan adalah artefak *beam hardening*, yaitu artefak yang berbentuk garis akibat perubahan spektrum sinar-X ketika melewati material yang lebih padat seperti tambalan gigi, logam pada pembuluh darah, atau pelat pada tulang yang patah (Seeram, 2016). Artefak *beam hardening* sering terjadi pada daerah kepala khususnya pada daerah posterior fossa, serta besar ukuran dari tengkorak yang lebih tebal mempengaruhi *beam hardening* yang lebih tinggi (Cauley et al., 2021)

Teknologi yang dikembangkan dan digunakan oleh Siemens yaitu *Iterative Beam Hardening Correction* (IBHC) dikembangkan untuk mengatasi

artefak *beam hardening*. IBHC bekerja dengan pendekatan iteratif untuk memperbaiki distorsi yang dihasilkan oleh perubahan spektrum sinar-X. IBHC terbukti lebih efektif dalam mereduksi artefak beam hardening dibandingkan metode konvensional, terutama pada kasus yang melibatkan material dengan densitas tinggi seperti logam (Siemens Healthineers, 2020)

Selain pengembangan teknologi *Beam Hardening Correction*, MSCT juga dilengkapi dengan kernel yang berbeda-beda sesuai kebutuhan klinis. Beberapa vendor salah satunya yaitu Siemens, dimana terdapat lima jenis filter yaitu H (*Head*) untuk kepala, U (*Ultra High Resolution*) untuk pemeriksaan khusus (osteo), B (*Body*) untuk thorax maupun abdomen, C (*Child Head*) untuk kepala anak-anak, dan S untuk *Special Application*. Seiring perkembangan jaman yang semakin modern dan *image* akuisisi yang semakin maju Siemens mengembangkan kernel, pengembangan kernel ini meliputi penambahan kernel maupun penamaan khususnya kepala yaitu H (*head*), yaitu Hr (*head regular*) kernel umum digunakan untuk menjalankan protokol kepala pada umumnya, Hp (*head pediatric*) kernel anak-anak digunakan untuk menjalankan protokol kepala pada anak-anak, Hc (*head crisp*) kernel crisp digunakan untuk opsi lain dari regular (Siemens Healthineers, 2020)

Berdasarkan Standar Prosedur Operasional di Instalasi RSUD Margono Soekarjo Paviliun Abiyasa Geriatri protokol yang digunakan pada protokol kepala menggunakan protokol Brain rutin abiyasa. Protokol tersebut digunakan sebagai protokol standar untuk keseluruhan pemeriksaan MSCT kepala dari scanning hingga rekonstruksi citra. Parameter rekon RSUD Margono Soekarjo Paviliun Abiyasa Geriatri yang digunakan pada pemeriksaan MSCT kepala yaitu menggunakan kernel Hr (*head regular*) dan menggunakan IBHC on. Meskipun IBHC dan kernel rekonstruksi telah banyak diteliti secara terpisah, masih terdapat keterbatasan penelitian yang mengkaji interaksi IBHC maupun kernel, terutama dalam konteks pengurangan artefak *beam hardening*. IBHC dan kernel yang tepat dapat memberikan peningkatan hasil informasi anatomi yang diberikan. Hal ini menjadi semakin penting mengingat peningkatan penggunaan MSCT dalam diagnosis modern dan kebutuhan diagnostik berkualitas tinggi sehingga penulis ingin meneliti lebih lanjut terkait adanya perubahan terkait penggunaan IBHC maupun kernel yaitu menggunakan kernel Hc (*Head crisp*) pada pemeriksaan kepala.

Penelitian ini meneliti pengurangan artefak *beam hardening* dalam pencitraan CT otak melalui optimasi dosis dan pemilihan kernel rekonstruksi. Kernel yang digunakan dalam penelitian ini mencakup H41s, H21s, dan H31f, yang masing-masing memiliki karakteristik berbeda dalam mempertajam atau menghaluskan gambar. Kernel dengan tingkat ketajaman rendah hingga sedang (H21s) lebih efektif dalam mengurangi BHA dibandingkan kernel yang lebih tajam (H31f) (Manimaran dkk, 2021).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan kernel konvolusi yang berbeda, yaitu FC17 dan FC03, menghasilkan nilai HU yang berbeda secara signifikan. Kernel FC17 cenderung memberikan nilai HU yang lebih tinggi dibandingkan FC03, namun FC03 lebih efektif dalam mengoreksi efek *beam-hardening* (Ivanov et al., 2020).

Penelitian ini menunjukkan bahwa *Iterative Model Reconstruction* (IMR-neuro) pada CT otak dapat meningkatkan deteksi stroke iskemik kecil di fossa posterior dengan meningkatkan kualitas gambar, mengurangi noise, dan meningkatkan *Contrast to Noise Ratio* (CNR). Salah satu faktor utama yang membuat IMR-neuro lebih unggul dibandingkan *Filtered Back Projection* (FBP) adalah kemampuannya dalam mengurangi artefak *beam hardening* (Inoue et al., 2017)

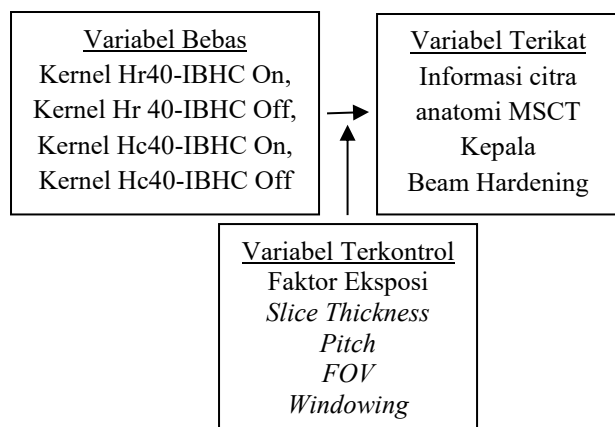
Berdasarkan studi pendahuluan di salah satu rumah sakit dengan menggunakan MSCT Siemens *go top 128* didapatkan bahwa penggunaan IBHC secara *default* sudah termasuk pada protokol rutin namun penggunaan pada kasus tertentu komputer *console* tidak mau merekonstruksi citra dan diharuskan menonaktifkan IBHC atau mengganti kernel *number*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbedaan informasi anatomi dan artefak *beam hardening* pada MSCT kepala dengan variasi kernel dan IBHC, serta menentukan kombinasi yang paling optimal dalam menghasilkan citra anatomi terbaik dan mengurangi artefak *beam hardening*.

Metode

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan eksperimental dan desain *cross-sectional* yang bertujuan menganalisis perbedaan kualitas informasi anatomi akibat variasi IBHC dan kernel rekonstruksi pada pemeriksaan MSCT Kepala. Data primer diperoleh dari hasil pemeriksaan MSCT Kepala tanpa kontras di RS periode Mei–Juni 2025 menggunakan MSCT Siemens Somatom Go Top 128 Slice, dengan

analisis dilakukan pada tahap *post-processing* tanpa memengaruhi prosedur pemindaian.

Pengumpulan data untuk variabel bebas dan variabel terikat dilakukan secara bersamaan, sehingga penelitian ini menggunakan konsep sebagai berikut:



Gambar 1. Kerangka Konsep Penelitian

Peneliti menggunakan data pasien MSCT Kepala di Rumah Sakit. Pemeriksaan MSCT Kepala dilakukan dengan parameter berikut :

Tabel 1. Parameter Akuisisi

No	Parameter	Keterangan
1	mAs	Auto mAs
2	KV	120
3	Slice Thickness	5 mm
4	Gantry Tilt	0

Tabel 2. Parameter Rekonstruksi

No	Parameter	Keterangan
1	Windowing	WW 80 WL 35
2	FoV	256 mm
3	Slice Thickness	0,60 mm
4	Rekonstruksi algoritma	Hr40,Hc40

Kualitas citra dinilai oleh responden menggunakan kuesioner tervalidasi pada potongan *axial area petrous bone, cerebellum, midbrain, pons*, serta artefak *beam hardening*. Analisis data meliputi uji *Kappa* untuk menilai kesepakatan antar *reviewer*, uji signifikansi atau uji *Friedman* bila data tidak berdistribusi normal, serta uji *Mean Rank* untuk menentukan variasi IBHC dan *kernel* yang menghasilkan kualitas informasi anatomi terbaik dan artefak paling minimal.

Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini melibatkan sepuluh pasien yang menjalani pemeriksaan MSCT Kepala tanpa kontras dengan empat variasi rekonstruksi, yaitu *Hr40*

IBHC On, *Hr40 IBHC Off*, *Hc40 IBHC On*, dan *Hc40 IBHC Off*. Distribusi usia, jenis kelamin, dan klinis pasien ditunjukkan pada Tabel 3–5, dengan mayoritas klinis berupa *stroke non-hemorrhagic (SNH)*. Penilaian kualitas informasi citra dilakukan oleh tiga dokter spesialis radiologi yang berpengalaman, dan uji reliabilitas antar-penilai menggunakan uji *Cohen's Kappa* menunjukkan kesepakatan kuat ($\kappa \geq 0,6$), sehingga data layak dianalisis lebih lanjut secara statistik (Tabel 6).

Tabel 3. Pasien Berdasarkan Usia

Usia	Jumlah	Persentase
45 – 65	5	50%
66 - 79	5	50%
Total	10	100%

Tabel 4. Pasien berdasarkan Jenis Kelamin

Jenis Kelamin	Jumlah	Persentase
Laki-Laki	4	40%
Perempuan	6	60%
Total	10	100%

Tabel 5. Pasien berdasarkan Klinis

Klinis	Jumlah	Persentase
SNH	6	60%
CVA Stroke	2	20%
Vertigo	1	10%
Paralisis Nervous	1	10%
Total	10	100%

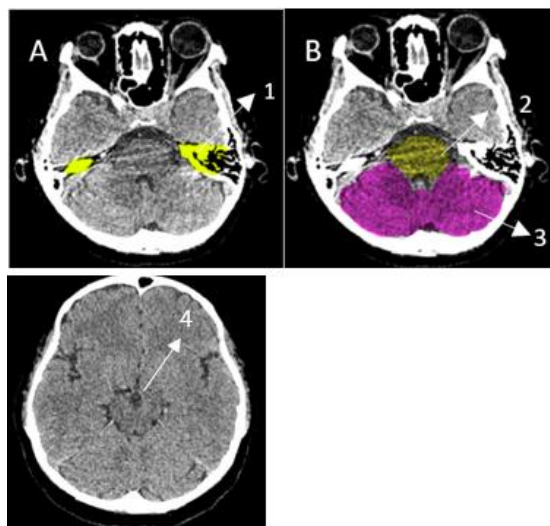
Tabel 6. Hasil Uji Cohen's Kapa

Responden	Value	Keterangan
1 dengan 2	0.644	Kesepakatan Kuat
1 dengan 3	0.742	Kesepakatan Kuat
2 dengan 3	0.639	Kesepakatan Kuat

Hasil rekonstruksi citra MSCT Kepala menunjukkan perbedaan tampilan anatomi dan artefak *beam hardening* pada setiap variasi *kernel* dan IBHC (Gambar 2). Anatomi yang dievaluasi meliputi *petrous bone, cerebellum, midbrain*, dan *pons*, serta keberadaan artefak *beam hardening* yang berpotensi mengganggu interpretasi citra (Gambar 3 dan Gambar 4). Secara visual, variasi dengan *IBHC On* memperlihatkan citra yang lebih homogen dibandingkan variasi *IBHC Off*, yang menunjukkan artefak garis atau pita terutama di sekitar tulang temporal dan sphenoid.



Gambar 2. Hasil Citra MSCT Kepala gambar (A) variasi Hr40 IBHC on, gambar (B) variasi Hr40 IBHC Off, gambar (C) variasi Hc40 IBHC On, gambar (D) variasi Hc40 IBHC Off



Keterangan gambar 3:

1. Petrous Bone
2. Pons
3. Cerebellum
4. Mid brain

Gambar 3. Penjelasan Citra MSCT Kepala



Gambar 4. Tampak Artefak Beam Hardening (lingkaran merah)

Tabel 1 Jumlah penilaian responden berdasarkan median

Perlakuan	PB	C	MB	P	A
Hr40 IBHC On	35	28	27	27	26
Hr40 IBHC Off	31	23	19	20	30
Hc40 IBHC On	36	30	26	29	24
Hc40 IBHC Off	31	23	23	23	33

Keterangan Tabel 7:

- PB : Petrous Bone
 C : Cerebellum
 MB : Mid Brain
 P : Pons
 A : Artefak

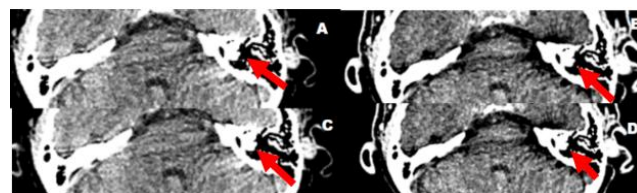
Tabel 7 menunjukkan hasil penjumlahan nilai median dari tiga responden (R1, R2, dan R3) terhadap kualitas tampilan anatomi pada citra MSCT otak dengan empat variasi *kernel* dan *IBHC*. Pada variasi *Hr40 IBHC On*, diperoleh nilai penilaian untuk anatomi *petrous bone* sebesar 35, *cerebellum* sebesar 28, *midbrain* sebesar 27, *pons* sebesar 27, dan artefak *beam hardening* sebesar 26. Variasi *Hr40 IBHC Off* menunjukkan nilai penilaian

anatomi *petrous bone* sebesar 31, *cerebellum* sebesar 23, *midbrain* sebesar 19, *pons* sebesar 20, serta artefak *beam hardening* sebesar 30. Pada variasi *Hc40 IBHC On*, nilai penilaian anatomi *petrous bone* sebesar 36, *cerebellum* sebesar 30, *midbrain* sebesar 26, *pons* sebesar 29, dan artefak *beam hardening* sebesar 24. Sementara itu, variasi *Hc40 IBHC Off* menunjukkan nilai penilaian anatomi *petrous bone* sebesar 31, *cerebellum* sebesar 23, *midbrain* sebesar 23, *pons* sebesar 23, dan artefak *beam hardening* sebesar 33.

Pada anatomi *petrous bone*, uji *Friedman* menunjukkan tidak terdapat perbedaan signifikan antar variasi *kernel* dan *IBHC* ($p = 0,132$) (Tabel 8), meskipun secara visual variasi *Hc40 IBHC On* dan *Hr40 IBHC On* memperlihatkan tepi tulang yang lebih tegas dibandingkan variasi *IBHC Off* (Gambar 5). *Kernel* tulang dan *soft tissue* memiliki karakteristik algoritma yang berbeda, sehingga evaluasi struktur tulang yang sangat padat seperti *petrous bone* relatif kurang sensitif terhadap variasi koreksi *beam hardening* (Weiss et al., 2011).

Tabel 2. Hasil Pengujian Friedman Anatomi petrous bone

No	Anatomi	Variasi	p-value
1	Petrous bone	A	0.132
		B	
		C	
		D	



Keterangan gambar 5

- A : Hr40 dan IBHC On
 B : Hr40 dan IBHC Off
 C : Hc40 dan IBHC On
 D : Hc40 dan IBHC Off

Gambar 5. Hasil Citra MSCT anatomi Petrous Bone (bertanda panah merah)

Sebaliknya, pada anatomi *cerebellum*, *midbrain*, dan *pons* ditemukan perbedaan yang signifikan antar variasi *kernel* dan *IBHC* masing-masing dengan nilai $p = 0,022$; $0,024$; dan $0,007$ (Tabel 9–11). Variasi *Hc40 IBHC On* dan *Hr40 IBHC On* secara konsisten menampilkan kontras jaringan yang lebih optimal dan detail anatomi yang lebih jelas dibandingkan variasi *IBHC Off*, yang cenderung menunjukkan citra hipodens atau *over-sharpening* (Gambar 6–8). Hasil ini selaras dengan teori (Seeram, (2016) dan Jiang dkk, (2023) yang

menyatakan bahwa *kernel sharp* meningkatkan resolusi spasial namun berisiko meningkatkan *noise*, sehingga diperlukan koreksi artefak untuk menjaga keseimbangan kontras dan ketajaman citra.

Tabel 9. Hasil Pengujian Friedman Anatomi Cerebellum

No	Anatomi	Variasi	p-value
1	Cerebellum	A	0.22
		B	
		C	
		D	

Keterangan tabel 9:

A : Hr40 dan IBHC On

B : Hr40 dan IBHC Off

C : Hc40 dan IBHC On

D : Hc40 dan IBHC Off

Tabel 10. Hasil Pengujian Friedman Anatomi Midbrain

No	Anatomi	Variasi	p-value
1	Midbrain	A	0.024
		B	
		C	
		D	

Keterangan tabel 10:

A : Hr40 dan IBHC On

B : Hr40 dan IBHC Off

C : Hc40 dan IBHC On

D : Hc40 dan IBHC Off

Tabel 11. Hasil Pengujian Friedman Anatomi Pons

No	Anatomi	Variasi	p-value
1	Pons	A	0.007
		B	
		C	
		D	

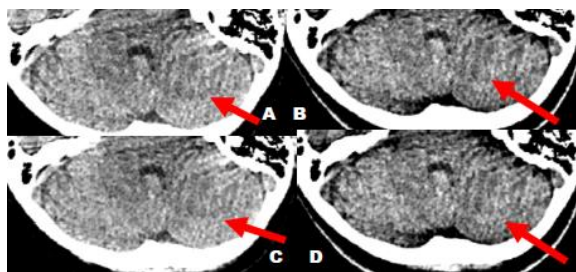
Keterangan tabel 11:

A : Hr40 dan IBHC On

B : Hr40 dan IBHC Off

C : Hc40 dan IBHC On

D : Hc40 dan IBHC Off



Keterangan Gambar 6:

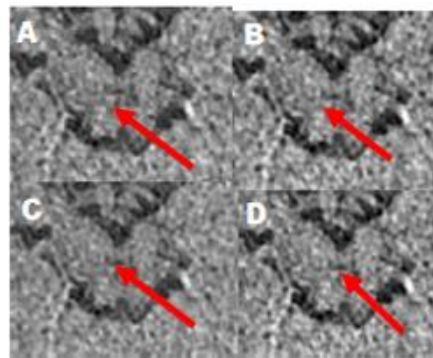
A : Hr40 dan IBHC On

B : Hr40 dan IBHC Off

C : Hc40 dan IBHC On

D : Hc40 dan IBHC Off

Gambar 6. Gambar Citra MSCT Cerebellum (tanda panah merah)



Keterangan Gambar 7:

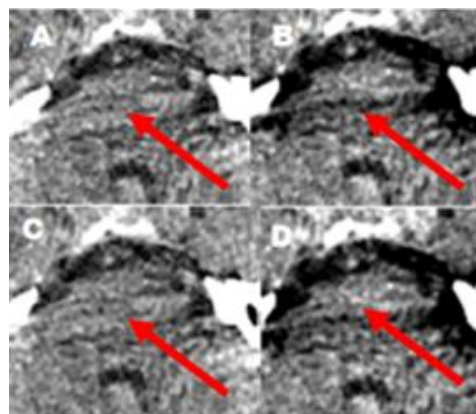
A : Hr40 dan IBHC On

B : Hr40 dan IBHC Off

C : Hc40 dan IBHC On

D : Hc40 dan IBHC Off

Gambar 7. Gambar Citra MSCT Mid Brain (bertanda panah merah)



Keterangan Gambar 8:

A : Hr40 dan IBHC On

B : Hr40 dan IBHC Off

C : Hc40 dan IBHC On

D : Hc40 dan IBHC Off

Gambar 8. Gambar Hasil citra MSCT Pons (bertanda panah merah)

Analisis keseluruhan anatomi menggunakan uji *Friedman* menunjukkan perbedaan signifikan antar variasi *kernel* dan *IBHC* ($p = 0,000$) (Tabel 12). Hasil uji *mean rank* menunjukkan bahwa variasi *Hc40 IBHC On* memiliki nilai tertinggi dalam menampilkan informasi anatomi secara keseluruhan, diikuti *Hr40 IBHC On*, sementara variasi *IBHC Off* berada pada peringkat terendah (Tabel 13). Temuan ini mendukung konsep bahwa kombinasi *kernel* dengan karakteristik resolusi tinggi dan koreksi *beam hardening* berbasis iteratif mampu meningkatkan kualitas visualisasi jaringan otak.

Tabel 12. tabel hasil uji friedman keseluruhan anatomi

No	Variasi	p-value
1	Hr40 IBHC On	0,000
2	Hr40 IBHC Off	
3	Hc40 IBHC On	
4	Hc40 IBHC Off	

Tabel 13. Hasil mean rank Keseluruhan Anatomi

No	Anatomi	Variasi	Mean Rank
1	Petrous bone	A	2.75
		B	2.20
		C	2.95
		D	2.10
2	Cerebellum	A	3.00
		B	1.95
		C	3.05
		D	2.00
3	Mid Brain	A	3.05
		B	1.75
		C	2.90
		D	2.30
4	Pons	A	2.95
		B	1.75
		C	3.10
		D	2.20

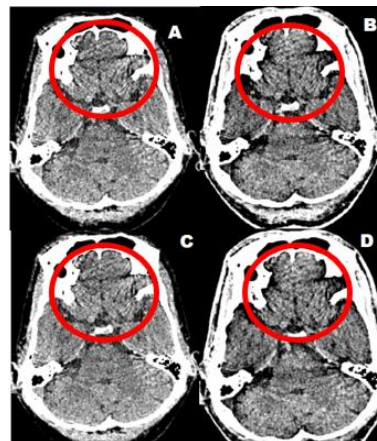
Keterangan tabel 13:

A : Hr40 dan IBHC On
 B : Hr40 dan IBHC Off
 C : Hc40 dan IBHC On
 D : Hc40 dan IBHC Off

Pada evaluasi artefak *beam hardening*, uji *Friedman* menunjukkan perbedaan signifikan antar variasi ($p = 0,002$) (Tabel 14). Variasi *IBHC Off* memperlihatkan artefak paling dominan dan mengganggu interpretasi citra, sedangkan variasi *IBHC On* menunjukkan reduksi artefak yang jelas (Gambar 9). Hasil *mean rank* terendah pada variasi *Hc40 IBHC On* menunjukkan bahwa kombinasi tersebut paling efektif dalam menurunkan artefak *beam hardening* tanpa mengorbankan informasi anatomi (Tabel 15). Temuan ini sejalan dengan teori (Zhao dan Li, 2015) serta Shi et al., (2017)) yang menyatakan bahwa *iterative beam hardening correction* mampu memodelkan polikromatisme spektrum sinar-X secara lebih akurat sehingga mengurangi distorsi citra.

Berdasarkan keseluruhan hasil dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa variasi *Hc40 IBHC On* merupakan kombinasi paling optimal dalam meningkatkan kualitas informasi anatomi dan menurunkan artefak *beam hardening* pada pemeriksaan *MSCT* Kepala. Meskipun *Hr40 IBHC On* masih banyak digunakan sebagai protokol default, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa

Hc40 IBHC On dapat menjadi alternatif yang lebih unggul, terutama pada kondisi di mana dibutuhkan visualisasi anatomi yang lebih detail dengan artefak minimal, sebagaimana juga direkomendasikan dalam literatur teknis (Siemens Healthineers, 2020)



Keterangan Gambar 9:

A : Hr40 IBHC On
 B : Hr40 IBHC Off
 C : Hc40 IBHC On
 D : Hc40 IBHC Off

Gambar 9. Hasil Citra MSCT artefak Beam hardening

Tabel 14. Hasil Pengujian Friedman beam hardening

No	Variasi	p-value
1	Hr40 IBHC On	0,002
2	Hr40 IBHC Off	
3	Hc40 IBHC On	
4	Hc40 IBHC Off	

Tabel 15. Hasil mean rank terhadap artefak beam hardening.

No	Variasi	Mean Rank
1	Hr40 IBHC On	2.10
2	Hr40 IBHC Off	2.80
3	Hc40 IBHC On	1.80
4	Hc40 IBHC Off	3.30

Simpulan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan pada variasi *kernel* dan *IBHC* terhadap kualitas informasi anatomi (*petrous bone*, *cerebellum*, *midbrain*, dan *pons*) serta terhadap artefak *beam hardening* pada pemeriksaan *MSCT* kepala, di mana kombinasi *kernel Hc40* dengan *IBHC On* memberikan hasil paling optimal dalam menampilkan informasi anatomi secara keseluruhan sekaligus menurunkan artefak *beam hardening*, sehingga berpotensi mendukung kualitas interpretasi citra yang lebih baik pada praktik radiologi klinis.

Daftar Pustaka

- Cauley, K.A., Yorks, P.J., Flora, S., Fielden, S.W., 2021. The effects of the skull on CT imaging of the brain: a skull and brain phantom study 1.
- Inoue, T., Nakaura, T., Yoshida, M., Yokoyama, K., Hirata, K., Kidoh, M., Oda, S., Utsunomiya, D., Harada, K., Yamashita, Y., 2017. Diagnosis of small posterior fossa stroke on brain CT: effect of iterative reconstruction designed for brain CT on detection performance. *Eur Radiol* 27, 3710–3715. <https://doi.org/10.1007/s00330-017-4773-4>
- Ivanov, D. V., Kirillova, I. V., Kossovich, L.Y., Bessonov, L. V., Petraikin, A. V., Dol, A. V., Ahmad, E.S., Morozov, S.P., Vladzimirsky, A. V., Sergunova, K.A., Kharlamov, A. V., 2020. Influence of Convolution Kernel and Beam-Hardening Effect on the Assessment of Trabecular Bone Mineral Density Using Quantitative Computed Tomography. *Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Mathematics. Mechanics. Informatics* 20, 205–219. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2020-20-2-205-219>
- Jiang, C., Jin, D., Ni, M., Zhang, Y., Yuan, H., 2023. Influence of image reconstruction kernel on computed tomography-based finite element analysis in the clinical opportunistic screening of osteoporosis—A preliminary result. *Front Endocrinol (Lausanne)* 14, 1–8. <https://doi.org/10.3389/fendo.2023.1076990>
- Manimaran dkk, 2021. An observational study on dose optimization in diagnostic computed tomography (CT) imaging of brain to reduce beam hardening artefact (BHA).
- Seeram, 2016. *Computed Tomography Physical Principles, Clinical Applications, and Quality Control, Fourth Edition*, W.B. Saunders Company, Philadelphia, Medical Imaging and Radiation Sciences University of Sydney; Monash University; Charles Sturt University Australia.
- Shi, H., Yang, Z., Luo, S., 2017. Reduce beam hardening artifacts of polychromatic X-ray computed tomography by an iterative approximation approach. *J Xray Sci Technol* 25, 417–428. <https://doi.org/10.3233/XST-16187>
- Siemens Healthineers, 2020. SOMATOM Drive: Drive precision for all. SIEMENS Healthineers.
- Weiss, K.L., Cornelius, R.S., Greeley, A.L., Sun, D., Chang, I.Y.J., Boyce, W.O., Weiss, J.L., 2011. Hybrid convolution kernel: Optimized CT of the head, neck, and spine. *American Journal of Roentgenology* 196, 403–406. <https://doi.org/10.2214/AJR.10.4425>
- Zhao, Y., Li, M., 2015. Iterative beam hardening correction for multi-material objects. *PLoS One* 10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144607>