

Research article**Analisis Pengaruh Variasi Tegangan Tabung dan mAs terhadap Kontras pada Sistem Digital Radiografi***Analysis of the effect of tube and mas voltage variations on contrast in digital radiographic systems***Purwanto^{1*}, Wenda Nastasia¹**¹Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Pencitraan Radiologi, Politeknik Sandi Karsa, Sulawesi Selatan, Indonesia**Article Info****Article History:**Received
2022-07-02Accepted
2022-10-10Published
2022-12-01**Key words:***densitas,
kontras radiografi,
miliampere-second (mas),
tegangan tabung (kV),**density,
milliampere-second,
radiographic contrast,
tube voltage.***Abstract****Pendahuluan:** Radiografi digital telah menjadi salah satu teknik diagnostik terpenting di bidang radiologi, menawarkan keunggulan dalam hal kualitas dan efisiensi gambar.**Tujuan:** Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi tegangan tabung (kV) dan miliampere detik (mAs) terhadap kontras dan kerapatan gambar pada sistem radiografi digital. Pemilihan faktor pencahayaan yang tepat merupakan prinsip dasar bagi radiografer untuk menghasilkan gambar yang berkualitas.**Metode:** Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan dua variabel: variasi tegangan tabung (46 kV, 50 kV, 55 kV, 60 kV, dan 66 kV) dengan nilai mAs tetap (8 mAs), serta variasi mAs (2 mAs, 4 mAs, 6 mAs, 8 mAs, dan 10 mAs) dengan tegangan tabung tetap (50 kV).**Hasil:** Penelitian menunjukkan bahwa variasi tegangan tabung berpengaruh signifikan terhadap nilai densitas citra. Tegangan tabung 46 kV menghasilkan densitas minimal 0,02 dan maksimal 3,22, sedangkan 66 kV menghasilkan densitas minimal 1,88 dan maksimal 2,68. Densitas meningkat seiring dengan meningkatnya tegangan tabung, tetapi kontras citra cenderung menurun, mengikuti hubungan eksponensial dengan nilai korelasi $R^2 = 0,90$. Sebaliknya, variasi mAs menunjukkan bahwa meskipun densitas meningkat secara linear, kontras citra tetap tidak terpengaruh.**Kesimpulan:** Penelitian ini menekankan pentingnya memahami pengaturan faktor paparan, di mana tegangan tabung memiliki pengaruh yang lebih besar pada kualitas gambar daripada mAs. Penelitian ini memberikan rekomendasi untuk regulasi optimal dalam praktik radiografi untuk mencapai hasil yang lebih baik.**ABSTRAC***Introduction: Digital radiography has become one of the most important diagnostic techniques in the field of radiology, offering advantages in terms of image quality and efficiency.**Objective: This study aims to analyze the effect of tube voltage (kV) and milliampere second (mAs) variations on contrast and image density in digital radiographic systems. The selection of the right exposure factor is a fundamental principle for radiographers to produce quality images.**Methods: This study uses an experimental method with two variables: tube voltage variations (46 kV, 50 kV, 55 kV, 60 kV, and 66 kV) with fixed mAs values (8 mAs), and mAs variations (2 mAs, 4 mAs, 6 mAs, 8 mAs, and 10 mAs) with fixed tube voltages (50 kV).**Result: The study showed that the variation of tube tension had a significant effect on the density value of the image. A tube voltage of 46 kV produces a minimum density of 0.02 and a maximum of 3.22, while a 66 kV produces a minimum density of 1.88 and a maximum of 2.68.*

The density increases as the tube tension increases, but the contrast of the image tends to decrease, following an exponential relationship with a correlation value of $R^2 = 0.90$. In contrast, the mAs variation shows that even though the density increases linearly, the contrast of the image remains unaffected.

Conclusion: This study emphasizes the importance of understanding the regulation of exposure factors, where tube voltage has a greater effect on image quality than mAs. This study provides recommendations for optimal regulation in radiography practice to achieve better results.

Corresponding author : Purwanto
Email : purwanto.wahidin@gmail.com

Pendahuluan

Digital radiografi telah menjadi salah satu teknik diagnostik yang penting dalam bidang radiologi, menawarkan keunggulan dalam hal kualitas citra dan efisiensi. Salah satu aspek kunci dalam penilaian kualitas citra adalah kontras, yang merujuk pada perbedaan dalam densitas atau derajat kehitaman antara berbagai bagian citra (E et al., 2023). Kontras yang optimal sangat penting untuk mendeteksi patologi, mengidentifikasi struktur anatomi, dan memberikan informasi diagnostik yang akurat (Tsalafoutas et al., 2008). Kontras dalam citra radiografi dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk tegangan tabung (kVp) dan arus eksposur (mAs). Pemilihan faktor eksposi ini merupakan prinsip fundamental yang harus dipahami oleh seorang radiografer untuk menghasilkan gambar dengan kualitas citra yang baik (Ching et al., 2014). Tegangan tabung yang lebih tinggi umumnya meningkatkan penetrasi sinar-X, yang dapat menghasilkan citra dengan kontras yang lebih rendah jika tidak diimbangi dengan parameter eksposur yang tepat (Brooke et al., 2023). Sebaliknya, mAs yang lebih tinggi dapat meningkatkan jumlah foton yang dihasilkan, sehingga meningkatkan kualitas citra tetapi juga berpotensi meningkatkan radiasi yang diterima oleh pasien (Yulianti et al., 2018). Oleh karena itu, pemilihan dan penyesuaian kVp dan mAs yang tepat sangat penting untuk mencapai keseimbangan antara kualitas citra dan keselamatan pasien (Afandy et al., 2024). Mengukur nilai kontras dalam penelitian ini, digunakan step wedge sebagai objek penelitian. Step wedge adalah alat yang memiliki variasi ketebalan dan densitas, yang memungkinkan analisis kontras dengan cara mengukur perbedaan densitas antara dua objek yang berbeda (Hamd et al., 2023). Dengan menggunakan step wedge, nilai kontras dapat dihitung berdasarkan perbedaan densitas antara dua titik dalam citra, yang diukur dengan rumus: $\text{Kontras} = \text{DensitasObjek1} - \text{DensitasObjek2}$.

Tegangan tabung berperan besar dalam menentukan energi sinar-X yang dihasilkan. Pada tingkat kVp yang lebih tinggi, sinar-X memiliki energi yang lebih besar dan mampu menembus objek dengan lebih baik (Kusk & Lysdahlgaard, 2023). Akan tetapi, ini juga mengurangi kontras gambar karena penetrasi yang lebih tinggi pada jaringan lunak dan tulang menghasilkan perbedaan densitas yang lebih kecil pada gambar. Menghasilkan kontras yang optimal, tingkat kVp perlu disesuaikan agar cukup tinggi untuk memberikan detail yang jelas namun tetap mempertahankan perbedaan densitas antar jaringan (Velonis et al., 2023). Dalam sistem radiografi konvensional, hal ini dicapai dengan penyesuaian manual, tetapi dalam sistem digital, diharapkan adanya algoritma penyesuaian otomatis yang dapat mengoptimalkan kVp untuk setiap jenis pemeriksaan (Dabli et al., 2023). Pada sistem radiografi digital, variasi kVp kurang diperhatikan karena sebagian besar operator lebih fokus pada faktor mAs untuk kontrol eksposur. Hal ini menyebabkan kualitas kontras kurang optimal, terutama pada pemeriksaan yang memerlukan detail kontras tinggi seperti pemeriksaan jaringan lunak (K. Kim et al., 2024).

Melalui analisis pengaruh variasi tegangan tabung dan mAs terhadap kontras, penelitian ini

bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai bagaimana faktor-faktor ini saling berinteraksi dan memengaruhi kualitas citra dalam sistem digital radiografi. Temuan dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan panduan praktis bagi praktisi radiologi dalam mengoptimalkan parameter eksposur untuk mencapai kontras yang optimal, serta meningkatkan akurasi diagnostik dalam praktik klinis.

Metode

Penelitian ini dilakukan di bagian radiologi Rumah Sakit Stella Maris Makassar. Penelitian ini bersifat eksperimen dan dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi tegangan tabung dan miliampere-second (mAs) terhadap nilai kontras pada citra digital radiografi. Secara umum, eksperimen ini melibatkan dua variabel utama: tegangan tabung dan mAs. Eksperimen ini terdiri dari dua tahap utama: Pengaruh Variasi Tegangan Tabung terhadap Nilai Kontras. Untuk menilai pengaruh variasi tegangan tabung, dilakukan eksposi dengan variasi tegangan tabung yang terdiri dari 46 kV, 50 kV, 55 kV, 60 kV, dan 66 kV, dengan nilai mAs tetap yaitu 8 mAs. Variasi ini memungkinkan peneliti untuk mengamati bagaimana perubahan tegangan tabung memengaruhi kontras pada citra yang dihasilkan. Pengaruh Miliampere Second (mAs) terhadap Kontras. Untuk menilai pengaruh variasi mAs, dilakukan eksposi dengan variasi 2 mAs, 4 mAs, 6.4 mAs, 8 mAs, dan 10 mAs, dengan tegangan tabung tetap yaitu 50 kV. Melalui variasi ini, penelitian dapat mengeksplorasi dampak dari pengaturan mAs terhadap kontras citra.

Objek penelitian yang digunakan dalam eksperimen ini adalah step wedge, yang memiliki variasi ketebalan sebanyak 11 level. Step wedge dirancang untuk menghasilkan perbedaan densitas yang jelas pada citra radiografi, sehingga memudahkan analisis kontras. Pelaksanaan eksperimen dilakukan sebagai berikut: Persiapan: Objek step wedge ditempatkan tepat di tengah panel detektor berukuran 14 x 17 inci, Jarak fokus ke detektor diatur pada 90 cm untuk memastikan akurasi dalam pengukuran, Central ray diarahkan secara vertikal untuk mendapatkan pencitraan yang optimal, Lebar kolimasi disesuaikan dengan ukuran objek step wedge untuk memaksimalkan eksposur sinar-X. Eksposi: Eksposi dilakukan sesuai dengan variasi tegangan tabung dan mAs yang telah ditentukan untuk masing-masing tahap. Citra yang dihasilkan direkam oleh detektor digital, yang menggunakan produk merek Siemens. Post Processing: Setelah pemrosesan citra, film hasil citra step wedge dicetak menggunakan film merek Fuji berukuran 10 x 12 inci, Nilai densitas dari setiap level step wedge dihitung dan ditabulasi untuk diukur menggunakan alat densitometer lebih lanjut, Dari data yang dikumpulkan, dibuat kurva karakteristik dengan sumbu x merepresentasikan ketebalan step wedge dan sumbu y merepresentasikan densitas film, Karena respon terhadap plat panel detektor bersifat linier, masing-masing kurva linier dibuat untuk menggambarkan hubungan ini, dan nilai slope (kemiringan) kurva dihitung. Slope ini merupakan karakteristik dari kontras citra yang dihasilkan. Dengan mengikuti metode ini, penelitian bertujuan untuk mengevaluasi dengan tepat bagaimana variasi faktor eksposi mempengaruhi kualitas citra dalam digital radiografi, khususnya dalam hal kontras.

Hasil Penelitian

Variasi Kenaikan Nilai Tegangan Tabung kVp dan mAs Tetap 8 mAs terhadap Densitas

Dalam penelitian ini, variasi tegangan tabung (kV) dengan nilai mAs yang tetap (8 mAs) menghasilkan beragam nilai densitas pada citra digital radiografi. Hasil pengukuran densitas menunjukkan adanya perbedaan signifikan terkait tingkat kehitaman (densitas) gambar pada setiap variasi tegangan tabung yang digunakan. Berikut adalah hasil pengukuran densitas untuk setiap variasi tegangan tabung:

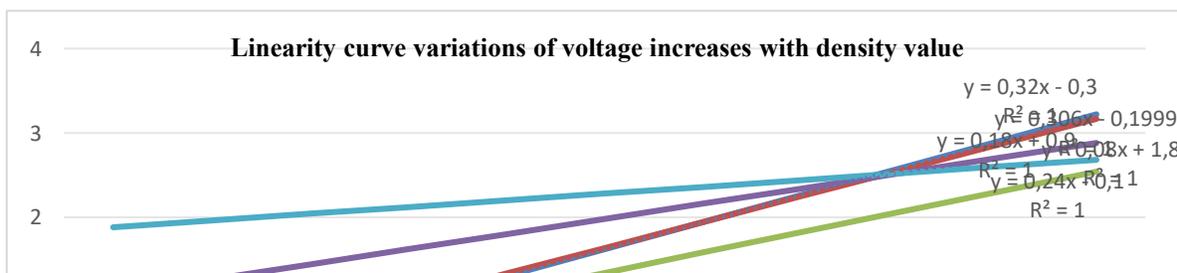
Tegangan Tabung 46 kV Pada tegangan 46 kV, nilai densitas yang terukur menunjukkan

rentang dari densitas minimum 0,02 hingga densitas maksimum 3,22. Rentang ini menunjukkan bahwa tegangan tabung yang rendah menghasilkan gambar dengan variasi densitas yang lebih ekstrem, dari area yang sangat terang hingga sangat gelap. Tegangan Tabung 50 kV. Pada tegangan 50 kV, nilai densitas terukur menunjukkan densitas minimum 0,106 dan densitas maksimum 3,166. Pada tegangan ini, meskipun densitas maksimum sedikit menurun dibandingkan dengan 46 kV, hasilnya menunjukkan distribusi densitas yang lebih stabil. Tegangan Tabung 55 kV Ketika tegangan dinaikkan menjadi 55 kV, nilai densitas yang terukur adalah densitas minimum 0,14 dan densitas maksimum 2,54. Pada tegangan ini, terlihat bahwa rentang densitas menyempit, dan densitas maksimum mengalami penurunan yang cukup signifikan.

Tegangan Tabung 60 kV, Pada tegangan 60 kV, rentang densitas terukur dari densitas minimum 1,08 hingga densitas maksimum 2,88. Tegangan yang lebih tinggi ini menunjukkan bahwa gambar yang dihasilkan memiliki area lebih terang dan lebih seimbang dibandingkan tegangan yang lebih rendah, dengan rentang densitas yang lebih terkonsentrasi. Tegangan Tabung 66 kV pada tegangan tertinggi yang diuji, yaitu 66 kV, nilai densitas terukur adalah densitas minimum 1,88 dan densitas maksimum 2,68. Tegangan yang tinggi ini menghasilkan gambar dengan rentang densitas yang semakin kecil, dan keseluruhan gambar menjadi lebih terang dengan variasi kontras yang lebih rendah. Berikut adalah tabel nilai densitas variasi kenaikan nilai tegangan tabung (kV) dan mAs yang tetap yaitu adalah 8 mAs

STEP	Variasi Nilai Tegangan Tabung (kV)				
	66	60	55	50	46
1	2.68 ± 0.01	2.88 ± 0.01	2.54 ± 0.00	3.166 ± 0.03	3.22 ± 0.01
2	2.60 ± 0.01	2.70 ± 0.01	2.30 ± 0.01	2.86 ± 0.03	2.90 ± 0.01
3	2.52 ± 0.01	2.52 ± 0.01	2.06 ± 0.00	2.554 ± 0.02	2.58 ± 0.00
4	2.44 ± 0.01	2.34 ± 0.01	1.82 ± 0.01	2.248 ± 0.02	2.26 ± 0.01
5	2.36 ± 0.01	2.16 ± 0.01	1.58 ± 0.01	1.942 ± 0.01	1.94 ± 0.02
6	2.28 ± 0.01	1.98 ± 0.02	1.34 ± 0.01	1.636 ± 0.01	1.62 ± 0.00
7	2.2 ± 0.01	1.80 ± 0.02	1.10 ± 0.02	1.331 ± 0.01	1.30 ± 0.01
8	2.12 ± 0.04	1.62 ± 0.02	0.86 ± 0.01	1.024 ± 0.01	0.98 ± 0.01
9	2.04 ± 0.03	1.44 ± 0.02	0.62 ± 0.01	0.718 ± 0.01	0.66 ± 0.00
10	1.96 ± 0.04	1.26 ± 0.03	0.38 ± 0.01	0.412 ± 0.01	0.34 ± 0.00
11	1.88 ± 0.04	1.08 ± 0.02	0.14 ± 0.01	0.106 ± 0.00	0.02 ± 0.01

Dalam penelitian ini, variasi tegangan tabung (kV) digunakan untuk menilai hubungan antara tegangan dan nilai densitas pada citra radiografi digital. Berdasarkan pengukuran yang dilakukan, nilai densitas pada citra bervariasi tergantung pada besarnya tegangan tabung yang digunakan. Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai hubungan ini, dibuat kurva linearitas yang menghubungkan tegangan tabung dengan nilai densitas. Dari data pengukuran yang diperoleh, tegangan tabung bervariasi dari 46 kV hingga 66 kV dengan nilai mAs tetap sebesar 8 mAs. Nilai densitas minimum dan maksimum untuk masing-masing variasi tegangan tabung telah diukur, dan hubungan antara nilai tegangan dan densitas ini divisualisasikan dalam bentuk grafik linearitas. Berikut adalah kurva linearitas variasi nilai tegangan tabung dengan nilai densitas.



Gambar 1. Kurva linearitas variasi kenaikan nilai tegangan tabung dan nilai densitas

Berdasarkan grafik atau gambar 1 terlihat pada tegangan 46 kV (Gradien 0,32 dan Intersepsi -0,3). Persamaan ini memiliki gradien 0,32, yang menunjukkan bahwa untuk setiap kenaikan satuan nilai ketebalan (x), densitas meningkat sebesar 0,32 satuan. Intersepsi -0,3 menunjukkan titik awal yang lebih rendah, di mana pada objek yang lebih tipis (ketebalan mendekati nol), nilai densitas masih rendah. Pada tegangan ini, kita dapat melihat bahwa rentang densitas cukup luas dengan gradien yang relatif tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa citra yang dihasilkan pada tegangan ini akan memiliki kontras yang tajam antara area terang dan gelap. Tegangan 50 kV (Gradien 0,306 dan Intersepsi -0,1999), Tegangan 50 kV sedikit menurunkan gradien menjadi 0,306. Ini menunjukkan bahwa perubahan densitas masih cukup signifikan dengan setiap kenaikan ketebalan, tetapi sedikit lebih kecil dibandingkan dengan tegangan 46 kV. Intersepsi -0,1999 menandakan bahwa pada titik awal ketebalan yang kecil, nilai densitas sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan tegangan 46 kV. Tegangan ini masih mampu menghasilkan kontras yang baik, tetapi dengan sedikit penurunan dibandingkan 46 kV. Tegangan 55 kV (Gradien 0,24 dan Intersepsi -0,1), Dengan tegangan 55 kV, gradien menurun lebih lanjut menjadi 0,24, yang menunjukkan bahwa perbedaan densitas antara ketebalan yang berbeda semakin berkurang. Intersepsi -0,1 menunjukkan bahwa densitas awal pada ketebalan kecil sedikit lebih tinggi. Penurunan gradien ini menandakan bahwa citra pada tegangan 55 kV akan memiliki kontras yang lebih rendah dibandingkan dengan tegangan 46 dan 50 kV, yang mengakibatkan gambar yang kurang tajam.

Tegangan 60 kV (Gradien 0,18 dan Intersepsi -0,9), Pada tegangan 60 kV, gradien semakin menurun menjadi 0,18. Ini menunjukkan bahwa setiap kenaikan ketebalan menghasilkan peningkatan densitas yang jauh lebih kecil. Intersepsi -0,9 menunjukkan bahwa densitas pada ketebalan kecil dimulai pada nilai yang lebih rendah, yang menunjukkan bahwa area yang tipis akan terlihat lebih terang. Pada tegangan ini, kontras citra mulai berkurang secara signifikan, dan gambar menjadi lebih terang secara keseluruhan dengan rentang densitas yang menyempit. Tegangan 66 kV (Gradien 0,08 dan Intersepsi +1,8), Pada tegangan tertinggi 66 kV, gradien menjadi yang terendah, yaitu 0,08, yang menunjukkan bahwa perubahan densitas sangat kecil seiring bertambahnya ketebalan. Intersepsi +1,8 menandakan bahwa densitas awal pada ketebalan rendah sudah cukup tinggi, sehingga area yang tipis akan tampak lebih gelap. Tegangan ini menghasilkan gambar dengan kontras yang sangat rendah, di mana perbedaan antara area terang dan gelap tidak begitu jelas, dan keseluruhan citra cenderung lebih terang. Dari persamaan linier tersebut, dapat dilihat bahwa semakin tinggi tegangan tabung (kV), gradien dari persamaan semakin menurun. Penurunan gradien ini menunjukkan bahwa perbedaan densitas antara ketebalan yang berbeda semakin kecil, yang berakibat pada menurunnya kontras pada citra radiografi. Pada tegangan rendah, seperti 46 kV dan 50 kV, gradien yang lebih tinggi menghasilkan kontras yang lebih baik dan gambar yang lebih tajam, sedangkan pada tegangan yang lebih tinggi, seperti 60 kV dan 66 kV, kontras menurun secara signifikan dan gambar menjadi lebih

terang.

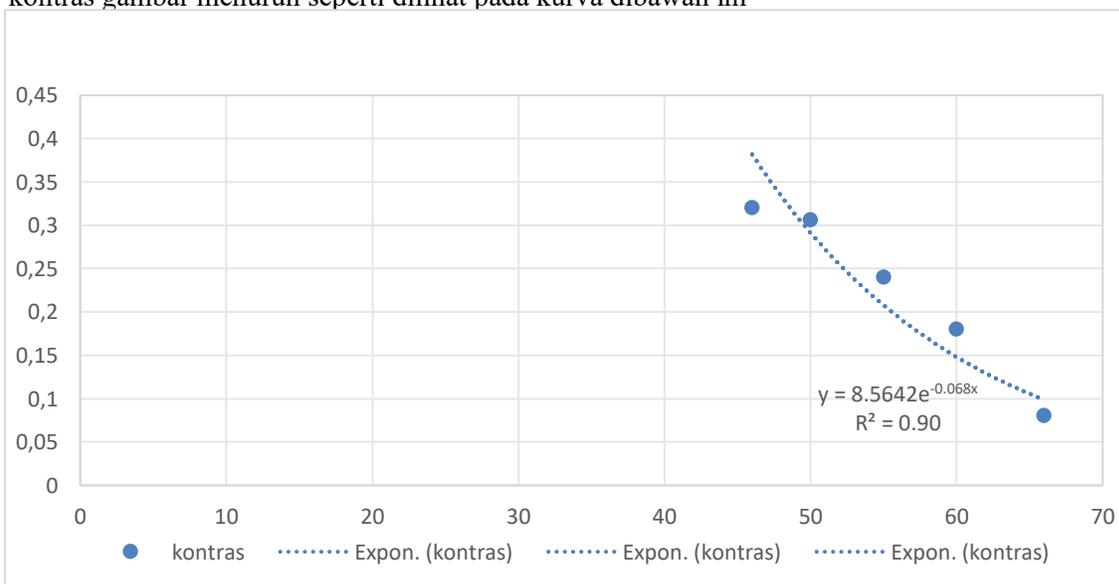
Tabel dibawah ini menunjukkan variasi kenaikan tegangan tabung terhadap nilai densitas yang menghasilkan persamaan linier dengan parameter gradien dan sudut kemiringan dari kurva yang dihasilkan

Tabel 2. variasi kenaikan tegangan tabung terhadap nilai densitas

No	Tegangan (kV)	Persamaan	Gradien	Sudut Kemiringan / Slope (*)
1	46	$y = 0.32x - 0.3$	0.32	17.74
2	50	$y = 0.306x - 0.1999$	0.306	17.01
3	55	$y = 0.24x - 0.1$	0.24	13.50
4	60	$y = 0.18x + 0.9$	0.18	10.50
5	65	$y = 0.08x + 1.8$	0.08	5

Dari tabel 2 menunjukkan hasil penelitian pada 46 kV Sudut kemiringan sebesar 17,74 derajat menunjukkan bahwa pada tegangan ini, terdapat respons yang baik terhadap perubahan densitas citra, menghasilkan kontras yang tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa pada tegangan rendah, citra yang dihasilkan cukup sensitif terhadap variasi densitas objek yang diperiksa. Pada 50 kV dengan sudut kemiringan 17,01 derajat, hasil ini masih menunjukkan respons yang baik terhadap variasi densitas, meskipun sedikit menurun dibandingkan dengan 46 kV. Hal ini menandakan bahwa peningkatan tegangan dapat membantu dalam mendapatkan kontras yang lebih baik, tetapi tidak seoptimal pada 46 kV. Pada 55 kV Sudut kemiringan yang lebih rendah, yaitu 13,50 derajat, menunjukkan bahwa kontras citra mulai menurun seiring dengan peningkatan tegangan. Ini mungkin disebabkan oleh peningkatan energi yang mengurangi sensitivitas terhadap perbedaan densitas antara objek yang berdekatan. Pada 60 kV dengan sudut kemiringan 10,5 derajat, terdapat penurunan lebih lanjut dalam kontras citra. Peningkatan tegangan yang lebih tinggi cenderung membuat citra lebih homogen, sehingga kontras yang dihasilkan menjadi lebih rendah. Pada 66 kV sudut kemiringan terendah, yaitu 5 derajat, menunjukkan bahwa pada tingkat tegangan ini, kontras citra menjadi sangat rendah. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan tegangan berlebihan dapat mengakibatkan hilangnya detail dalam citra, yang tidak ideal untuk analisis diagnostik.

Dari tabel 2 juga dapat dilihat nilai kontras yang ditunjukkan nilai gradien persamaan garis linear terdapat hubungan semakin meningkat nilai tegangan tabung yang digunakan maka nilai kontras gambar menurun seperti dilihat pada kurva dibawah ini



Gambar 2 grafik eksponensial yang menunjukkan hubungan variasi tegangan tabung dengan nilai gradient yang merupakan parameter kontras citra radiografi. Hasil penelitian mengenai hubungan antara variasi kenaikan tegangan tabung (kV) dan nilai kontras dalam digital radiografi menunjukkan pola yang menarik. Analisis data menghasilkan hubungan yang bersifat eksponensial, diwakili oleh persamaan $y=8.5642e^{-0.068x}$ $y=8.5642e^{-0.068x}$ $y=8.5642e^{-0.068x}$. Dalam konteks ini, y mewakili nilai kontras, sementara x mewakili tegangan tabung (kV). Persamaan eksponensial yang diperoleh menunjukkan bahwa nilai kontras cenderung menurun secara signifikan seiring dengan peningkatan tegangan tabung. Hal ini menggambarkan bahwa setiap kenaikan kecil pada tegangan tabung dapat mengakibatkan penurunan yang lebih besar dalam kontras citra yang dihasilkan. Dengan kata lain, setelah mencapai titik tertentu, peningkatan tegangan dapat menghasilkan pengurangan yang signifikan dalam kemampuan citra untuk membedakan antara berbagai densitas objek. Dengan nilai korelasi $R^2=0.90$ $R^2=0.90$ atau 90%, hubungan antara variasi tegangan tabung dan nilai kontras adalah sangat kuat. Nilai ini menunjukkan bahwa 90% variasi dalam nilai kontras dapat dijelaskan oleh variasi dalam tegangan tabung. Ini menunjukkan validitas yang tinggi dari model eksponensial yang diusulkan, dan menunjukkan bahwa faktor tegangan tabung adalah prediktor yang sangat baik untuk kontras citra dalam digital radiografi.

Variasi Kenaikan Nilai Miliampere mAs Terhadap Nilai Kontras Citra

Hasil penelitian mengenai pengaruh variasi faktor eksposi miliampere second (mAs) terhadap nilai densitas citra dalam digital radiografi dengan tegangan tabung tetap pada 50 kV menunjukkan pola yang menarik dan relevan. Berikut adalah deskripsi hasil penelitian berdasarkan data densitas yang terukur:

Pengaruh Variasi mAs terhadap Densitas : Penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan nilai mAs berbanding lurus dengan peningkatan densitas citra. Seiring dengan meningkatnya mAs, nilai densitas maksimum dan minimum yang terukur juga mengalami peningkatan yang konsisten. Ini mencerminkan bahwa mAs, yang mengontrol jumlah arus listrik yang mengalir melalui tabung sinar-X selama waktu tertentu, berpengaruh langsung terhadap jumlah radiasi yang dipancarkan dan, dengan demikian, berpengaruh pada kehitaman citra (densitas).

Nilai Densitas pada Berbagai Kondisi mAs : Pada **2 mAs**, densitas citra menunjukkan nilai minimal **0,04** dan maksimal **3,10**. Ketika mAs ditingkatkan menjadi **4 mAs**, nilai densitas minimum sedikit meningkat menjadi **0,06** dengan densitas maksimum yang tetap pada level yang hampir sama (**3,12**). Pada **6 mAs**, densitas minimum meningkat menjadi **0,08** dan densitas maksimum mencapai **3,14**. Dengan **8 mAs**, densitas minimum adalah **0,10**, sedangkan maksimum mencapai **3,16**. Akhirnya, pada **10 mAs**, densitas minimum menjadi **0,12**, dan densitas maksimum mencatat nilai tertinggi di **3,18**. Dari hasil tersebut, terlihat bahwa terdapat tren peningkatan yang stabil dalam nilai densitas seiring dengan peningkatan nilai mAs. Ini menunjukkan bahwa dengan lebih banyak mAs, citra yang dihasilkan semakin gelap (lebih tinggi densitas), yang dapat memberikan detail lebih baik dalam analisis radiologis. Namun, peningkatan densitas juga perlu diimbangi dengan penilaian terhadap potensi overexposure yang dapat mengaburkan detail. Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa pemilihan mAs yang tepat sangat penting dalam pengaturan eksposi pada digital radiografi. Radiografer perlu memahami bagaimana variasi mAs akan memengaruhi kualitas citra untuk mencapai keseimbangan antara mendapatkan kontras yang baik dan menghindari overexposure. Berikut adalah tabel nilai densitas variasi kenaikan nilai miliampere second (mAs) dan kV yang tetap yaitu adalah 50 kV.

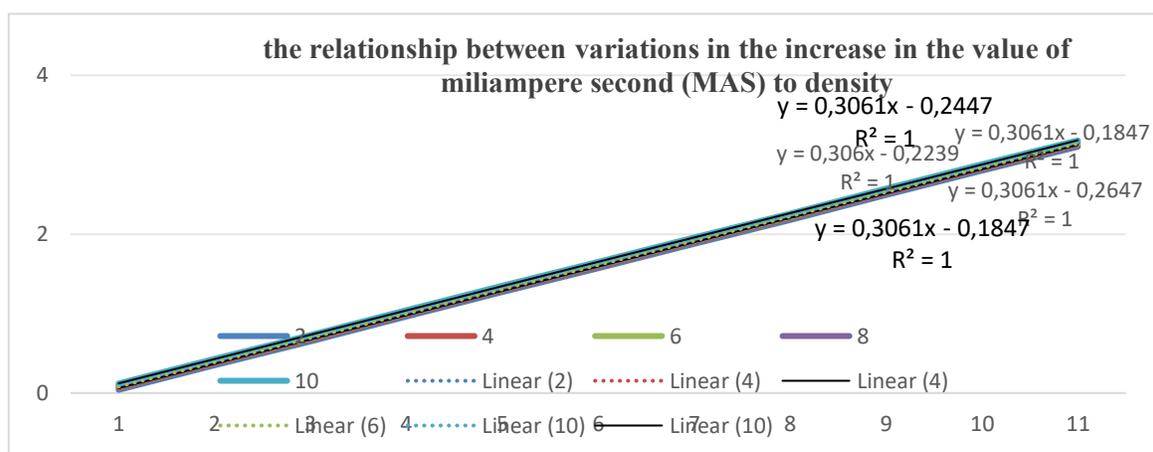
Tabel 3. nilai densitas variasi kenaikan nilai miliampere second (mAs) dan kV yang tetap yaitu adalah 50 kV

STEP

Variasi Nilai mAS

	mAs 10	mAs 8	mAs 6,4	mAs 4	mAs 2
1	3.18 ± 0.01	3.16 ± 0.03	3.14 ± 0.01	3.12 ± 0.01	3.10 ± 0.01
2	2.88 ± 0.00	2.86 ± 0.03	2.84 ± 0.02	2.82 ± 0.01	2.80 ± 0.01
3	2.57 ± 0.01	2.55 ± 0.02	2.53 ± 0.02	2.51 ± 0.01	2.49 ± 0.01
4	2.26 ± 0.01	2.24 ± 0.02	2.22 ± 0.00	2.20 ± 0.02	2.18 ± 0.01
5	1.96 ± 0.01	1.94 ± 0.03	1.92 ± 0.01	1.90 ± 0.01	1.88 ± 0.00
6	1.65 ± 0.01	1.63 ± 0.01	1.61 ± 0.01	1.59 ± 0.01	1.57 ± 0.01
7	1.35 ± 0.01	1.33 ± 0.02	1.31 ± 0.00	1.29 ± 0.01	1.27 ± 0.00
8	1.04 ± 0.01	1.02 ± 0.01	1.00 ± 0.01	0.98 ± 0.01	0.96 ± 0.00
9	0.73 ± 0.01	0.71 ± 0.01	0.69 ± 0.01	0.67 ± 0.01	0.65 ± 0.00
10	0.43 ± 0.00	0.41 ± 0.01	0.39 ± 0.01	0.37 ± 0.01	0.35 ± 0.00
11	0.12 ± 0.01	0.10 ± 0.00	0.08 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.04 ± 0.00

Dari tabel 3 berikut grafik persamaan linear hubungan variasi nilai miliampere second (mAs) dengan nilai kontras pada tegangan tetap 50kV



Gambar 3 grafik persamaan linier hubungan variasi kenaikan nilai miliampere second (mAs) terhadap nilai kontras dengan nilai tegangan tetap 50 kV. Berdasarkan persamaan linier yang dihasilkan dari variasi miliampere second (mAs) terhadap nilai densitas citra pada digital radiografi, kita dapat menarik beberapa kesimpulan dan analisis yang signifikan mengenai hubungan antara faktor eksposi dan kualitas citra. Berikut adalah deskripsi hasil penelitian berdasarkan persamaan yang diberikan: Nilai kemiringan (slope) dari setiap persamaan menunjukkan kekonsistenan, di mana nilai kemiringan berkisar di sekitar **0.3061** hingga **0.306**. Hal ini menunjukkan bahwa setiap peningkatan unit pada variabel independen (x) berkontribusi secara signifikan terhadap peningkatan densitas citra. Konsistensi nilai kemiringan ini menandakan bahwa perubahan mAs memiliki dampak yang stabil terhadap densitas citra, memberikan bukti bahwa peningkatan arus (mAs) berperan dalam peningkatan kegelapan citra yang dihasilkan. Nilai intercept (titik potong dengan sumbu y) untuk setiap persamaan menunjukkan penurunan yang progresif seiring dengan peningkatan mAs: **2 mAs:** Intercept -0.2647 , **4 mAs:** Intercept -0.2447 , **6 mAs:** Intercept -0.2239 , **10 mAs:** Intercept -0.1847 . Penurunan intercept ini menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai mAs, semakin tinggi densitas dasar (awal) citra yang dapat dicapai. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak radiasi yang diterapkan, semakin tinggi kegelapan citra yang dihasilkan, bahkan pada nilai x yang sama.

Dari hasil penelitian ini, dapat dilihat bahwa terdapat tren peningkatan yang signifikan dalam

densitas citra seiring dengan peningkatan nilai mAs. Penurunan intercept dan stabilitas nilai kemiringan menunjukkan bahwa faktor eksposi mAs bukan hanya berfungsi untuk meningkatkan kehitaman (densitas) citra, tetapi juga membantu dalam mencapai kinerja citra yang optimal. Dari gambar 3 menunjukkan variasi kenaikan nilai miliampere second mAs menghasilkan nilai gradien yang tetap pada **0,31**, menunjukkan bahwa setiap peningkatan unit dalam mAs menghasilkan peningkatan densitas citra yang proporsional. Nilai gradien yang konsisten ini menandakan bahwa hubungan antara mAs dan densitas citra bersifat linier, dimana peningkatan arus yang digunakan untuk eksposi (mAs) berkontribusi langsung terhadap peningkatan kehitaman citra yang dihasilkan. Kenaikan nilai mAs yang tidak mengubah nilai kontras pada kondisi tegangan tabung tetap menunjukkan bahwa meskipun densitas citra meningkat dengan peningkatan mAs, rasio antara area terang dan gelap dalam citra (kontras) tetap stabil. Hal ini berarti bahwa meskipun terdapat perubahan pada kehitaman / densitas citra, detail dan perbedaan antara struktur yang berbeda dalam citra tetap dapat dikenali dengan baik. Berikut adalah tabel lengkap yang menunjukkan persamaan linier beserta nilai gradient serta slope kemiringan kurva dari penelitian variasi nilai mAs terhadap nilai kontras citra

Tabel 4

No	Miliampere Second (mAs)	Persamaan	Gradien	Sudut Kemiringan / Slope (*)
1	2	$y = 0.3061x - 0.2647$	0.31	17.01
2	4	$y = 0.3061x - 0.2447$	0.31	17.01
3	6	$y = 0.306x - 0.2239$	0.31	17.01
4	8	$y = 0.3061x - 0.2055$	0.31	17.01
5	10	$y = 0.3061x - 0.1847$	0.31	17.01

Pembahasan

Faktor eksposi dalam radiografi merupakan kombinasi dari beberapa parameter penting yang mempengaruhi kualitas citra yang dihasilkan, termasuk tingkat detail, kontras, dan densitas gambar (Davidson, 2006). Dalam konteks radiografi digital, dua parameter utama yang sering dibahas adalah **tegangan tabung (kV)** dan **miliampere-second (mAs)**. Tegangan tabung, diukur dalam kilovolt (kV), menentukan energi dan penetrasi sinar-X yang dihasilkan. Peningkatan tegangan tabung akan meningkatkan energi foton sinar-X, yang memungkinkan sinar-X untuk menembus jaringan tubuh yang lebih padat. Hal ini menghasilkan citra dengan kegelapan yang lebih tinggi dan dapat meningkatkan kontras antara jaringan yang berbeda (Veldkamp, 2006). Namun, penggunaan tegangan yang terlalu tinggi dapat mengakibatkan hilangnya detail dan berisiko meningkatkan dosis radiasi yang diterima pasien. Miliampere-second (mAs) adalah ukuran jumlah total radiasi yang dipancarkan selama prosedur. Kombinasi miliampere (mA) dan waktu eksposi (detik) menentukan berapa banyak radiasi yang diterima oleh pasien dan seberapa banyak sinar-X yang digunakan untuk menghasilkan citra (Alsleem et al., 2014). Peningkatan nilai mAs umumnya akan meningkatkan densitas citra, sehingga gambar menjadi lebih gelap. Namun, dalam penelitian ini, ditemukan bahwa peningkatan mAs tidak secara signifikan mengubah nilai kontras citra ketika tegangan tabung tetap, yang menunjukkan bahwa parameter ini perlu dikelola dengan bijaksana untuk mencapai hasil yang optimal (Karal & Tokgoz, 2023). Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi kenaikan tegangan tabung (kV) memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap nilai kontras dan densitas citra dalam

digital radiografi. Pengaruh ini dapat dianalisis dari dua aspek utama: hubungan antara tegangan tabung dan densitas citra serta dampak tegangan tabung terhadap kontras citra (Mohammad Sayed et al., 2023).

Dalam penelitian ini, nilai densitas yang terukur pada berbagai variasi tegangan tabung menunjukkan hasil yang konsisten dengan teori fisika radiografi. Sebagai contoh, ketika tegangan tabung ditingkatkan dari 46 kV hingga 66 kV, densitas citra mengalami perubahan yang signifikan: Tegangan 46 kV menghasilkan densitas minimal 0,02 dan maksimal 3,22. Tegangan 50 kV menunjukkan peningkatan dengan densitas minimum 0,106 dan maksimum 3,166. Penambahan lebih lanjut pada 60 kV dan 66 kV mencatat densitas yang lebih tinggi, dengan nilai maksimum mencapai 2,88 dan 2,68, masing-masing. Kenaikan densitas ini menunjukkan bahwa dengan peningkatan tegangan tabung, energi sinar-X yang dipancarkan juga meningkat, sehingga memungkinkan penetrasi yang lebih baik pada jaringan padat dan memberikan gambar yang lebih jelas (H. J. Kim et al., 2024). Faktor kuantitas sinar-X, yang berkaitan dengan intensitas sinar-X yang dihasilkan, juga dipengaruhi oleh tegangan tabung ini. Dengan kata lain, semakin tinggi tegangan tabung, semakin tinggi intensitas sinar-X yang dihasilkan, yang pada gilirannya berkontribusi pada peningkatan densitas citra (Talik Sisni et al., 2024). Dari hasil analisis persamaan linier yang diperoleh, kemiringan (slope) dari grafik densitas terhadap variasi tegangan tabung menunjukkan penurunan nilai kontras seiring dengan meningkatnya tegangan (Chierici et al., 2024). Misalnya, sudut kemiringan untuk tegangan 46 kV adalah 17,74 derajat, sedangkan untuk 66 kV, sudut kemiringan menurun menjadi 5 derajat. Ini menunjukkan bahwa meskipun densitas citra meningkat dengan tegangan yang lebih tinggi, kontras cenderung menurun. Kurva yang dihasilkan memiliki hubungan eksponensial yang kuat, seperti yang ditunjukkan oleh persamaan $y = 8.5642e^{-0.068x}$ dengan nilai korelasi $R^2 = 0.90$. Nilai ini menunjukkan bahwa hubungan antara tegangan tabung dan kontras citra sangat signifikan, dengan 90% variabilitas kontras dapat dijelaskan oleh perubahan dalam tegangan tabung (Zhang et al., 2023).

Selain itu, penting untuk dicatat bahwa tegangan tabung tidak hanya berpengaruh pada **faktor kuantitas** sinar-X, tetapi juga pada **aspek kualitas** sinar-X itu sendiri. Kualitas sinar-X mencakup energi dan penetrasi sinar-X yang dapat mempengaruhi interaksi dengan jaringan tubuh. Tegangan yang lebih tinggi dapat menghasilkan sinar-X dengan energi yang lebih besar, yang memungkinkan penetrasi lebih dalam ke jaringan yang lebih padat dan mengurangi pembentukan radiasi scatter yang dapat mengurangi kontras gambar (Buranurak et al., 2023). Dengan kata lain, meskipun densitas meningkat, jika kontras berkurang, kualitas keseluruhan gambar dapat terpengaruh, mempengaruhi akurasi diagnosis. Hasil penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa variasi nilai arus tabung dalam bentuk miliampere second (mAs) memiliki dampak yang berbeda pada nilai kontras citra dibandingkan dengan pengaruhnya terhadap densitas citra (Lockwood & Mitchell, 2023). Temuan ini dapat dianalisis dalam dua aspek utama: pengaruh mAs terhadap kontras citra dan pengaruhnya terhadap densitas citra. Berdasarkan hasil penelitian, variasi nilai mAs tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap nilai kontras citra. Ini berarti bahwa perubahan dalam nilai mAs, dalam batasan yang diteliti, tidak cukup untuk mengubah tingkat kontras yang terlihat dalam citra radiografi (M Sayed et al., 2024). Meskipun mAs berperan dalam menentukan jumlah total radiasi yang diterima oleh detektor, pengaruhnya terhadap perbedaan densitas antara berbagai area dalam citra (kontras) tetap minimal (Nocetti et al., 2023). Hal ini dapat dipahami dari aspek fisika radiografi. Kontras citra umumnya lebih dipengaruhi oleh perbedaan kepadatan jaringan yang diperiksa dan energi sinar-X yang digunakan (tegangan tabung/kV) daripada jumlah total radiasi yang diterima (Sá dos Reis et al., 2023). Oleh karena itu, meskipun mAs berkontribusi pada kecerahan citra, hal ini tidak berkontribusi pada perbedaan yang cukup antara area yang berbeda dalam gambar, sehingga mengakibatkan kontras yang serupa (Bushra et al., 2023).

On the other hand, the results show that the variation of the mAs value has a significant effect on the density value of the image, with a linear relationship. As the mAs value increases, the density of the image also increases proportionally. For example, when mAs increases from 2 mAs to 10 mAs, the measured image density shows a consistent increase, ranging from a minimum density of 0.04 to a maximum of 3.18. This linear relationship reflects that the increase in mAs results in more X-ray photons being emitted to the detector, thereby increasing the amount of radiation absorbed and producing images with higher density. This is especially important in radiographic practice, as the right density is required to obtain sufficiently bright and detailed images.

Simpulan dan Saran

Dapat disimpulkan bahwa pengaruh tegangan tabung (kV) terhadap kontras dan kerapatan gambar Penelitian menunjukkan bahwa variasi tegangan tabung (kV) memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai kontras dan kerapatan gambar pada radiografi digital. Peningkatan tegangan tabung meningkatkan intensitas sinar-X, yang memiliki efek positif pada kepadatan gambar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi tegangan tabung, semakin tinggi nilai kerapatan gambar yang dihasilkan, sedangkan nilai kontras menunjukkan penurunan seiring dengan meningkatnya tegangan, yang mencerminkan hubungan eksponensial. Pengaruh miliampere detik (mas) pada kontras dan kerapatan gambar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi mAs tidak memiliki pengaruh yang signifikan pada nilai kontras gambar, meskipun peningkatan nilai mAs menyebabkan peningkatan kerapatan gambar linier. Meskipun jumlah radiasi yang diterima oleh detektor meningkat seiring dengan meningkatnya mA, kontras gambar tetap stabil karena kontras lebih dipengaruhi oleh kepadatan jaringan dan energi sinar-X. Pentingnya memahami radiografer Memahami pengaturan faktor paparan, terutama tegangan tabung dan mAs, merupakan prinsip dasar bagi radiografer dalam menghasilkan gambar yang berkualitas. Meskipun mA dapat digunakan untuk meningkatkan kerapatan gambar, radiografer perlu memprioritaskan pengaturan tegangan tabung untuk mencapai kontras yang optimal. Rekomendasi untuk Praktek Radiografi dari penelitian ini merekomendasikan bahwa radiografer lebih fokus pada pengaturan tegangan tabung untuk meningkatkan kontras gambar, sementara mA dapat disesuaikan untuk mencapai kepadatan yang diinginkan. Penelitian lebih lanjut diharapkan dapat mengeksplorasi interaksi antara faktor eksposur lainnya serta pengaruhnya terhadap kualitas gambar dalam konteks yang lebih luas.

Daftar Rujukan

- Afandy, A. N., Tori, M. B., Binalib, S. O., & Soh, B. L. P. (2024). Threshold in breast compression reduction for full-field digital mammography and digital breast tomosynthesis. *Radiography*, 30(1), 217–225. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radi.2023.11.008>
- Alsleem, H., Paul, U., Mong, K. S., & Davidson, R. (2014). Effects of radiographic techniques on the low-contrast detail detectability performance of digital radiography systems. *Radiologic Technology*, 85(6), 614–622.
- Brooke, N., Elliott, J., Murphy, T., & Vera Stimpson, L. (2023). Development of a radiographic technique for porcine head ballistic research. *Radiography*, 29(6), 980–983. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radi.2023.08.001>
- Buranurak, S., Pong-Inwong, V., Hanpanich, P., Wongwiwatchai, J., Ahooja, A., & Pungkun, V. (2023). Al₂O₃:C optically stimulated luminescence dosimetry for evaluation of potential factors contributing to entrance skin doses received by liver cancer patients undergoing Transarterial Chemoembolization. *Radiation Physics and Chemistry*, 202, 110570. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110570>
- Bushra, A., Sulieman, A., Edam, A., Tamam, N., Babikir, E., Alrihaima, N., Alfaki, E., Babikir, S., Almujaally, A., Otayni, A., Alkhorayef, M., Abdelradi, A., & Bradley, D. A. (2023). Patient's

- effective dose and performance assessment of computed radiography systems. *Applied Radiation and Isotopes*, 193, 110627. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110627>
- Chierici, A., Ciolini, R., Nascimento, D. S., & d'Errico, F. (2024). A novel silicon PIN photodiode device for radiation exposure monitoring in dental CBCT. *Radiation Measurements*, 177, 107258. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2024.107258>
- Ching, W., Robinson, J., & McEntee, M. (2014). Patient-based radiographic exposure factor selection: a systematic review. *Journal of Medical Radiation Sciences*, 61(3), 176–190.
- Dabli, D., Durand, Q., Frandon, J., de Oliveira, F., Pastor, M., Beregi, J. P., & Greffier, J. (2023). Impact of the automatic tube current modulation (ATCM) system on virtual monoenergetic image quality for dual-source CT: A phantom study. *Physica Medica*, 109, 102574. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2023.102574>
- E, A., A, Y., & T, O. (2023). Effect of varying X-ray tube voltage and additional filtration on image quality and patient dose in digital radiography system. *Applied Radiation and Isotopes*, 199, 110893. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110893>
- Hamd, Z. Y., Alrebd, H. I., Osman, E. G., Awwad, A., Alnawwaf, L., Nashri, N., Alfnekh, R., & Khandaker, M. U. (2023). Optimization of chest X-ray exposure factors using machine learning algorithm. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 16(1), 100518. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jrras.2022.100518>
- Karal, O., & Tokgoz, N. (2023). Dose optimization and image quality measurement in digital abdominal radiography. *Radiation Physics and Chemistry*, 205, 110724. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110724>
- Kim, H. J., Kim, H. H., Eom, H. J., Choi, W. J., Chae, E. Y., Shin, H. J., Cha, J. H., Choi, Y. W., Choi, Y. J., Kim, K. H., Min, J., Shim, W. H., Lee, S., & Cho, S. (2024). Optimizing angular range in digital breast tomosynthesis: A phantom study investigating lesion detection across varied breast density and thickness. *Physica Medica*, 124, 103419. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2024.103419>
- Kim, K., Cho, E. Il, Jeong, H.-W., & Lee, Y. (2024). Performance and usefulness evaluation of a software-based scatter correction technique for mammographic images. *Heliyon*, 10(2), e24862. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24862>
- Kusk, M. W., & Lysdahlgaard, S. (2023). The effect of Gaussian noise on pneumonia detection on chest radiographs, using convolutional neural networks. *Radiography*, 29(1), 38–43. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radi.2022.09.011>
- Lockwood, P., & Mitchell, M. (2023). An assessment of the dose and image quality difference between AP and PA positioned adult radiographic knee examinations. *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*, 54(1), 123–134. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmir.2022.12.004>
- Nocetti, D., Villalobos, K., Marín, N., Monardes, M., Tapia, B., Toledo, M. I., & Villegas, C. (2023). Radiation dose reduction and image quality evaluation for lateral lumbar spine projection. *Heliyon*, 9(9), e19509. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19509>
- Sá dos Reis, C., Caso, M., Dolenc, L., Howick, K., Lemmen, R., Meira, A., Shatku, F., Aymon, E., & Ghotra, S. S. (2023). Optimisation of exposure parameters using a phantom for thoracic spine radiographs in antero-posterior and lateral views. *Radiography*, 29(5), 870–877. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radi.2023.06.009>
- Sayed, M, Knapp, K. M., Fulford, J., Heales, C., & Alqahtani, S. J. (2024). The impact of X-ray scatter correction software on abdomen radiography in terms of image quality and radiation dose. *Radiography*, 30(4), 1125–1135. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radi.2024.05.006>
- Sayed, Mohammad, Knapp, K. M., Fulford, J., Heales, C., & Alqahtani, S. J. (2023). The principles

- and effectiveness of X-ray scatter correction software for diagnostic X-ray imaging: A scoping review. *European Journal of Radiology*, 158, 110600. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2022.110600>
- Talik Sisin, N. N., Ab Rashid, R., Harun, A. Z., Geso, M., & Rahman, W. N. (2024). Comparative evaluation of gold nanoparticles as contrast agent in multimodality diagnostic imaging. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 17(4), 101079. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jrras.2024.101079>
- Tsalafoutas, I. A., Blastaris, G. A., Moutsatsos, A. S., Chios, P. S., & Efstathopoulos, E. P. (2008). Correlation of image quality with exposure index and processing protocol in a computed radiography system. *Radiation Protection Dosimetry*, 130(2), 162–171.
- Velonis, M., Papanastasiou, E., Hatzioannou, K., Siountas, A., Kamperis, E., Papavasileiou, P., Koukourakis, M. I., & Seimenis, I. (2023). Dose optimization of 2D X-ray image acquisition protocols in image-guided radiotherapy. *Physica Medica*, 115, 103161. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2023.103161>
- Yulianti, I., Addawiyah, A., & Setiawan, R. (2018). Optimization of exposure factors for X-ray radiography non-destructive testing of pearl oyster. *Journal of Physics: Conference Series*, 983(1), 12004.
- Zhang, Y., Han, J., Song, R., Yan, X., Huang, Y., Leng, Q., Zhang, X., Chen, L., Ren, F., Liu, X., & Qu, G. (2023). Design and performance of a cone-beam computed tomography system for small animals. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1048, 168003. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.168003>