

CT Thorax Dosis Rendah Untuk Evaluasi Covid-19: Tinjauan Literatur Naratif Tentang Akurasi Diagnostik, Fungsi Klinis, dan Efisiensi Dosis Radiasi

Ahmad Hariri¹, Wilda Wahyuni²

^{1,2}Teknik Radiodiagnostik dan Radioterapi Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan Pertamedika Jakarta, Indonesia

e-mail: hariri@stikes-pertamedika.ac.id

Published: January, 2023

ABSTRAK

Pandemi COVID-19 meningkatkan kebutuhan terhadap metode evaluasi yang cepat dan akurat, terutama untuk mendukung triase, stratifikasi klinis, dan pemantauan pasien dengan keterlibatan paru. Dalam konteks ini, CT thorax menjadi modalitas pencitraan yang banyak digunakan, tetapi peningkatan frekuensi pemeriksaan juga menimbulkan kekhawatiran terhadap paparan radiasi, khususnya pada pasien yang memerlukan pemeriksaan berulang. Tinjauan literatur ini bertujuan mengevaluasi peran optimalisasi CT thorax dosis rendah, meliputi low-dose CT (LDCT) dan ultra-low-dose CT (ULDCT), dalam evaluasi COVID-19 berdasarkan literatur periode 2016–2022. Metode yang digunakan adalah narrative literature review dengan sumber pustaka dari PubMed, Scopus, Web of Science, dan Google Scholar. Sintesis difokuskan pada akurasi diagnostik, parameter optimisasi protokol, serta relevansi klinis LDCT/ULDCT dibandingkan RT-PCR dan CT standar. Hasil kajian menunjukkan bahwa LDCT memiliki akurasi diagnostik yang baik untuk mendeteksi keterlibatan paru pada COVID-19, terutama pola ground-glass opacity dan konsolidasi, dengan paparan radiasi yang lebih rendah dibandingkan CT standar. Optimisasi protokol dipengaruhi oleh kombinasi pengaturan mAs, kVp, automatic exposure control, pitch, serta penggunaan iterative reconstruction atau rekonstruksi berbasis kecerdasan buatan. Meskipun ULDCT memungkinkan reduksi dosis yang lebih besar, penggunaannya tetap menghadapi keterbatasan dalam visualisasi lesi halus tertentu. Dalam praktik klinis, LDCT paling tepat diposisikan sebagai modalitas komplementer untuk triase, stratifikasi derajat keparahan, evaluasi komplikasi, dan follow-up serial pada pasien terpilih, tanpa menggantikan RT-PCR sebagai standar diagnosis etiologis utama. Dengan demikian, optimalisasi CT thorax dosis rendah merupakan strategi penting untuk menyeimbangkan manfaat diagnostik dan proteksi radiasi pada evaluasi COVID-19.

Kata Kunci COVID-19; CT thorax dosis rendah; low-dose CT; ultra-low-dose CT; proteksi radiasi; akurasi diagnostik.

ABSTRACT

The COVID-19 pandemic has increased the need for rapid and accurate evaluation methods, particularly to support triage, clinical stratification, and monitoring of patients with lung involvement. In this context, chest CT has become a widely used imaging modality, but the increased frequency of examinations has also raised concerns about radiation exposure, particularly in patients requiring repeated examinations. This literature review aims to explore the role of optimizing low-dose chest CT, including low-dose CT (LDCT) and ultra-low-dose CT (ULDCT), in the evaluation of COVID-19 based on the literature from 2016–2022. The method used is a narrative literature review with sources from PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar. The synthesis focuses on diagnostic accuracy, optimization of protocol parameters, and the clinical relevance of LDCT/ULDCT compared to standard RT-PCR and CT. The results show that LDCT has good diagnostic accuracy for detecting lung involvement in COVID-19, particularly ground-glass opacity and consolidation patterns, with lower radiation exposure than standard CT. Protocol optimization is influenced by a combination of mAs, kVp settings, automatic exposure control, and pitch, as well as the use of iterative or AI-based reconstructions. Although ULDCT allows for greater dose reduction, it remains limited in the visualization of certain subtle lesions. In clinical practice, LDCT is best positioned as a complementary modality for triage, severity stratification, complication evaluation, and serial follow-up in selected patients, without replacing RT-PCR as the gold standard for etiological diagnosis. Therefore, optimizing low-dose chest CT is an important strategy to balance diagnostic benefits and radiation protection in the evaluation of COVID-19.

Keywords: COVID-19; low-dose chest CT; low-dose CT; ultra-low-dose CT; radiation protection; diagnostic accuracy.

© The Author(s). 2023 Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

PENDAHULUAN

Pandemi coronavirus disease 2019 (COVID-19) menimbulkan kebutuhan yang sangat mendesak terhadap deteksi dan stratifikasi pasien secara cepat, terutama pada fase awal ketika terjadi lonjakan kasus, keterbatasan kapasitas layanan kesehatan, serta tingginya kebutuhan triase, isolasi, dan penentuan tata laksana klinis. Dalam konteks tersebut, pencitraan toraks, khususnya computed tomography (CT) thorax, memperoleh perhatian yang besar karena mampu memperlihatkan keterlibatan paru secara lebih rinci, termasuk gambaran opasitas ground-glass dan konsolidasi, serta dapat digunakan untuk menilai progresivitas penyakit dan respons terapi pada pasien tertentu, terutama dengan gejala sedang hingga berat (Nasab et al., 2021; Kalra et al., 2020). Sejumlah laporan juga menunjukkan bahwa CT toraks dapat membantu evaluasi pneumonia COVID-19 dengan menilai luas keterlibatan paru dan mendeteksi kelainan yang berpotensi tidak tampak pada radiografi toraks, sehingga penggunaannya meningkat selama pandemi (Dangis et al., 2020; Kalra et al., 2020). Meskipun demikian, peran CT tidak bersifat universal. Literatur menegaskan bahwa CT tidak selalu direkomendasikan sebagai alat skrining populasi, karena temuan dapat negatif pada fase awal penyakit dan dapat tumpang tindih dengan pneumonia virus lain. Oleh sebab itu, penggunaan CT harus tetap berlandaskan indikasi klinis, prinsip justifikasi, serta diposisikan sebagai bagian dari strategi diagnostik multimodal, bukan sebagai pengganti tunggal pemeriksaan laboratorium (Ghetti et al., 2020; He et al., 2020; Kalra et al., 2020).



Gambar 2. Mengapa CT Dosis Rendah Menjadi Relevan dalam COVID-19

Di antara berbagai modalitas diagnostik, reverse transcription polymerase chain reaction (RT-PCR) tetap diposisikan sebagai rujukan utama untuk konfirmasi infeksi SARS-CoV-2 (He et al., 2020; Kalra et al., 2020). Namun, pada fase awal pandemi, RT-PCR menghadapi sejumlah keterbatasan, baik dari aspek sensitivitas awal, waktu pemeriksaan, maupun ketersediaan layanan pada berbagai setting. Beberapa laporan menunjukkan bahwa sensitivitas RT-PCR awal dapat berada pada kisaran menengah, sehingga hasil negatif palsu masih mungkin terjadi, khususnya pada pemeriksaan awal (Ghetti et al., 2020). Dalam situasi tersebut, CT toraks menjadi relevan sebagai pemeriksaan komplementer, terutama pada pasien tersangka dengan manifestasi klinis yang kuat atau kebutuhan evaluasi cepat. Bahkan, studi komparatif menunjukkan bahwa kombinasi CT toraks dan RT-PCR awal dapat meningkatkan sensitivitas deteksi dibandingkan RT-PCR awal saja, sehingga secara praktis membantu mengurangi risiko luput diagnosis pada fase awal penyakit (He et al., 2020; Kalra et al., 2020). Dengan demikian, meskipun RT-PCR tetap

menjadi acuan diagnosis etiologis, keterbatasan performa awal dan kendala operasional menjelaskan mengapa CT toraks banyak dipertimbangkan selama pandemi sebagai modalitas pendukung pada pasien terpilih, bukan sebagai pengganti universal (He et al., 2020; Kalra et al., 2020).

Meningkatnya penggunaan CT toraks dalam evaluasi COVID-19 juga didorong oleh kemampuannya memberikan informasi diagnostik yang cepat mengenai keterlibatan paru, sekaligus membuka peluang untuk menegakkan diagnosis banding pada pasien dengan gejala respiratorik akut. CT toraks dilaporkan memiliki sensitivitas yang relatif tinggi untuk mendeteksi temuan pneumonia COVID-19, terutama ground-glass opacities dan konsolidasi, serta dapat memberikan nilai tambah klinis pada skenario triase di instalasi gawat darurat (Nasab et al., 2021; Dangis et al., 2020). Studi Dangis et al. (2020), misalnya, menunjukkan bahwa CT toraks dosis rendah sub-mSv dapat memberikan penilaian cepat dengan waktu pelaporan yang singkat sekaligus membantu mengidentifikasi diagnosis alternatif pada pasien non-COVID-19. Namun, di balik manfaat tersebut, peningkatan frekuensi penggunaan CT toraks menimbulkan kekhawatiran penting terkait paparan radiasi, terutama bila pemeriksaan dilakukan secara luas dan berulang untuk follow-up. Survei multicenter pada pasien COVID-19 menunjukkan bahwa pengulangan CT selama perawatan dapat meningkatkan dosis efektif kumulatif secara substansial dalam waktu singkat, sehingga memunculkan perhatian serius terhadap risiko radiasi populasi dan perlunya strategi optimisasi protokol (Zhou et al., 2021). Kekhawatiran ini menjadi semakin relevan pada populasi rentan, termasuk anak, karena peningkatan penggunaan CT selama pandemi berimplikasi pada peningkatan paparan radiasi kolektif, meskipun telah dilakukan upaya penurunan parameter teknik seperti kVp (Coşkun, 2020). Selain itu, variasi yang besar antar-institusi dalam protokol dan dosis CT COVID-19 menunjukkan masih adanya potensi paparan yang lebih tinggi dari yang diperlukan apabila optimisasi belum diterapkan secara konsisten (Zhou et al., 2021; Kalra et al., 2020).

Dalam konteks tersebut, penggunaan low-dose CT (LDCT) dan ultra-low-dose CT (ULDCT) menjadi semakin penting sebagai pendekatan yang selaras dengan prinsip proteksi radiasi, khususnya asas *as low as reasonably achievable* (ALARA), tanpa mengorbankan informasi klinis yang esensial. Rasional utama pendekatan ini adalah mencapai keseimbangan antara kualitas citra dan dosis minimal yang tetap memadai untuk tujuan diagnostik (Foda & Talaat, 2021; Kalra et al., 2020). Berbagai studi optimisasi protokol menunjukkan bahwa pengaturan parameter teknis seperti automatic exposure control (AEC), penurunan arus tabung, dan penyesuaian parameter akuisisi lainnya dapat menghasilkan dosis efektif yang lebih rendah dengan kualitas citra yang tetap dapat diterima untuk evaluasi penyakit paru akibat COVID-19 (Nasab et al., 2021). Telaah terhadap protokol CT COVID-19 juga menunjukkan bahwa pendekatan low-dose mampu menurunkan dosis radiasi secara bermakna tanpa penurunan akurasi diagnostik yang signifikan dalam mendeteksi temuan khas pneumonia COVID-19, meskipun jumlah studi komparatif langsung masih terbatas (Azadbakht et al., 2021). Pada tingkat yang lebih rendah lagi, penggunaan ULDCT dilaporkan mampu mempertahankan akurasi dan reproduktibilitas yang baik dalam kondisi klinis tertentu, dengan dosis efektif rata-rata berada pada kisaran sub-mSv (Dangis et al., 2020). Akan tetapi,

literatur juga menunjukkan bahwa reduksi dosis yang terlalu ekstrem dapat mengurangi detail struktur atau jenis lesi tertentu, sehingga berpotensi memengaruhi penilaian radiologis. Dalam hal ini, pendekatan rekonstruksi dan pemrosesan citra berbasis deep learning dilaporkan dapat membantu meningkatkan kualitas citra ULDCT dan mempertahankan keterterimaan radiologis sambil tetap memungkinkan reduksi dosis yang besar (Shiri et al., 2020). Meski demikian, belum terdapat konsensus yang sepenuhnya seragam mengenai penggunaan ULDCT pada seluruh indikasi, terutama pada pasien dengan indeks massa tubuh tinggi atau ketika diperlukan delineasi ground-glass opacities secara lebih rinci, sehingga beberapa institusi masih memilih protokol low-dose resolusi tinggi sebagai kompromi yang lebih aman secara diagnostik (Ghetti et al., 2020).

Berdasarkan uraian tersebut, jelas bahwa peningkatan penggunaan CT toraks selama pandemi COVID-19 harus diimbangi dengan optimisasi protokol yang berbasis indikasi klinis, pengendalian variasi dosis antar-institusi, dan evaluasi ketat terhadap kualitas citra agar pengurangan dosis tidak mengorbankan informasi klinis utama. Oleh karena itu, kajian literatur mengenai optimalisasi CT thorax dosis rendah menjadi penting untuk menilai sejauh mana LDCT dan ULDCT dapat digunakan secara efektif dan aman dalam evaluasi COVID-19. Tinjauan literatur periode 2016–2022 diperlukan untuk menghimpun dasar konseptual optimisasi dosis sebelum pandemi sekaligus menelaah bukti empiris yang berkembang selama pandemi terkait akurasi diagnostik, efisiensi dosis, kualitas citra, serta keterbatasan implementasi protokol CT dosis rendah dalam praktik klinis (Nasab et al., 2021; Zhou et al., 2021; Dangis et al., 2020; Shiri et al., 2020; Kalra et al., 2020).

Dasar Teoretis CT Thorax Low-Dose

Istilah low-dose CT (LDCT) dan ultra-low-dose CT (ULDCT) pada CT thoraks tidak memiliki definisi kuantitatif yang sepenuhnya seragam di seluruh literatur. Sejumlah telaah menegaskan bahwa batas antara protokol dosis standar, low-dose, dan ultra-low-dose bergantung pada konteks klinis, kemampuan perangkat CT, serta tujuan diagnostik yang ingin dicapai (Finance et al., 2021; Lee et al., 2021). Dalam beberapa kajian protokol COVID-19, LDCT didefinisikan secara operasional sebagai protokol yang secara eksplisit dinyatakan “low-dose”, menggunakan tegangan tabung ≤ 100 kVp, atau memakai arus tabung yang lebih rendah pada 120 kVp, sedangkan protokol di luar kategori tersebut cenderung diposisikan sebagai standard-dose (Lee et al., 2021). Pada praktiknya, studi-studi COVID-19 menunjukkan bahwa LDCT toraks dapat berada pada kisaran sub-mSv, misalnya dengan rerata effective dose sekitar 0,56 mSv pada setting instalasi gawat darurat (Dangis et al., 2020), sedangkan ULDCT dalam beberapa studi dapat mencapai kisaran sekitar 0,2 mSv atau bahkan lebih rendah dengan dukungan teknologi seperti spectral shaping, tin filter, high-pitch acquisition, dan iterative reconstruction (Greffier et al., 2021; Agostini et al., 2020; Sui et al., 2017).

Meskipun definisi numeriknya bervariasi, prinsip yang konsisten dalam berbagai referensi adalah bahwa LDCT dan ULDCT merupakan spektrum strategi reduksi dosis yang bertujuan menurunkan CTDIvol, DLP, atau effective dose dibandingkan protokol rutin, sambil tetap mempertahankan *diagnostic*

acceptability sesuai tugas klinis tertentu, misalnya deteksi pola pneumonia virus, ground-glass opacity (GGO), atau konsolidasi paru (Kalra et al., 2020; Azadbakht et al., 2021; Gomboleviskiy et al., 2021). Dengan demikian, LDCT dan ULDCT tidak seharusnya dipahami sebagai kategori yang dibatasi oleh satu angka ambang universal, melainkan sebagai protokol berbasis pengurangan dosis relatif yang interpretasinya harus selalu dikaitkan dengan tujuan diagnostik spesifik, apakah sekadar mendeteksi keterlibatan parenkim paru atau melakukan karakterisasi lesi dengan resolusi lebih tinggi (Finance et al., 2021; Lee et al., 2021; May et al., 2021).



Gambar 3. Dasar Teoretis CT Dosis Rendah pada Toraks: Pengurangan Dosis, Kebisingan, dan Kelayakan Diagnostik

Prinsip penurunan dosis pada CT toraks didasarkan pada beberapa komponen teknis utama. Literatur optimisasi protokol mengidentifikasi penurunan mAs, optimasi atau penurunan kVp, penggunaan automatic exposure control (AEC) atau automatic tube current modulation (ATCM), penyesuaian pitch dan akuisisi cepat, serta penggunaan iterative reconstruction (IR) dan rekonstruksi berbasis kecerdasan buatan sebagai strategi yang paling relevan untuk reduksi dosis pada CT toraks (Nasab et al., 2021; Kalra et al., 2020; Booij et al., 2020; Singh et al., 2020). Di antara strategi tersebut, penurunan mAs merupakan cara paling langsung untuk mengurangi dosis, tetapi juga paling nyata meningkatkan noise citra, sehingga hampir selalu memerlukan teknik kompensasi agar citra tetap dapat diinterpretasi dengan baik (Joyce et al., 2020; Booij et al., 2020; Singh et al., 2020). Dalam konteks COVID-19, studi prospektif yang membandingkan protokol 150 mAs dengan 30 mAs menunjukkan bahwa protokol low-dose tetap dapat mempertahankan reliabilitas deteksi temuan khas COVID-19, dengan penurunan effective dose yang substansial (Tabatabaei et al., 2020).

Optimasi kVp juga berperan penting dalam meningkatkan efisiensi dosis, khususnya ketika dikombinasikan dengan teknologi seperti spectral shaping dan tin filter. Beberapa studi menunjukkan bahwa protokol berbasis 100 kVp, high-pitch, dan IR dapat menghasilkan akuisisi yang sangat cepat dengan reliabilitas diagnostik yang tetap dapat diterima pada evaluasi pneumonia COVID-19 (Agostini et al., 2020). Temuan ini sejalan dengan bukti pra-pandemi yang menunjukkan bahwa CT toraks sub-mSv dapat dicapai dengan pemilihan kVp yang optimal dan penggunaan rekonstruksi iteratif atau model-based reconstruction pada platform CT tertentu (Deák et al., 2017; Canellas et al., 2017). Sementara itu, AEC

atau ATCM berfungsi menyesuaikan arus tabung sesuai atenuasi tubuh pasien, sehingga dosis dapat dipersonalisasi untuk mencapai target kualitas citra tertentu. Namun, sebagaimana ditegaskan dalam review teknologi CT, manfaat AEC sangat bergantung pada penetapan parameter target yang tepat; target kualitas yang terlalu tinggi justru dapat mengurangi efisiensi reduksi dosis (Booij et al., 2020; Singh et al., 2020). Dalam studi optimisasi COVID-19, penggunaan AEC terbukti menurunkan effective dose dibandingkan fixed mAs, walaupun tetap disertai trade-off dalam noise, signal-to-noise ratio, dan contrast-to-noise ratio (Nasab et al., 2021).

Hubungan antara reduksi dosis, peningkatan noise, dan *diagnostic acceptability* merupakan isu sentral dalam LDCT dan ULDCT. Secara fisik, penurunan mAs atau kVp serta pengaturan AEC yang agresif akan menurunkan jumlah foton yang mencapai detektor, sehingga noise citra meningkat dan keterbacaan lesi low-contrast berpotensi menurun (Joyce et al., 2020; Booij et al., 2020). Dalam evaluasi COVID-19, hal ini menjadi penting karena GGO merupakan temuan dengan kontras yang relatif rendah. Oleh karena itu, protokol dosis rendah hanya dapat diterima apabila peningkatan noise masih berada dalam batas yang tidak mengganggu visualisasi lesi target (Ghetti et al., 2020; Gombolevskiy et al., 2021; Avila et al., 2021). Bukti klinis menunjukkan bahwa LDCT sub-mSv tetap dapat memberikan performa diagnostik yang baik dan reproduksibel, terutama pada populasi tertentu dan durasi gejala tertentu (Dangis et al., 2020). Namun, studi phantom dan panduan kuantitatif juga menegaskan bahwa protokol yang terlalu “noisy” berisiko menurunkan sensitivitas untuk mendeteksi onset GGO atau lesi halus, terutama pada pasien dengan BMI tinggi, sehingga sebagian pusat memilih protokol high-resolution low-dose daripada ultra-low-dose murni (Ghetti et al., 2020; Gombolevskiy et al., 2021; Avila et al., 2021).

CT toraks secara teknis dianggap cocok untuk strategi dose reduction karena paru memiliki kontras alami yang tinggi antara udara, jaringan paru normal, dan opasitas inflamasi, sehingga sejumlah lesi parenkim masih dapat dideteksi meskipun dosis diturunkan (Niu et al., 2021). Karakteristik ini menjelaskan mengapa banyak studi pra-pandemi telah menunjukkan kelayakan CT toraks sub-mSv atau ULDCT pada berbagai skenario klinis, termasuk protokol dual-energy dan model-based reconstruction, tanpa kehilangan informasi diagnostik yang bermakna pada kelompok pasien tertentu (Canellas et al., 2017; Deák et al., 2017). Review strategi reduksi dosis juga menunjukkan bahwa kombinasi penurunan parameter eksposi dan rekonstruksi iteratif dapat mempertahankan citra yang secara diagnostik tetap memadai pada pemeriksaan toraks, meskipun keberhasilannya tetap bergantung pada jenis tugas klinis dan kebutuhan resolusi spasial (Joyce et al., 2020; Booij et al., 2020; May et al., 2021).

Dalam konteks COVID-19, temuan CT yang paling sering dilaporkan adalah ground-glass opacity bilateral dengan distribusi perifer atau subpleural, dominan pada daerah posterior dan lobus bawah, dengan atau tanpa konsolidasi, serta kadang disertai pola crazy paving pada fase tertentu (Carotti et al., 2020; Hamper et al., 2020). Karakteristik tersebut menjadi dasar bagi penggunaan CT, termasuk LDCT, dalam mendeteksi keterlibatan paru dan membantu stratifikasi berat penyakit. Sejumlah literatur menegaskan bahwa CT memberikan nilai klinis terutama pada pasien dengan pneumonia COVID-19

derajat sedang hingga berat, untuk menilai luas keterlibatan paru, memantau progresi penyakit, dan mengevaluasi komplikasi atau respons terapi (Kalra et al., 2020). Survei internasional juga menunjukkan bahwa CT lebih sering digunakan untuk penilaian severity daripada untuk diagnosis awal, yang menegaskan posisinya sebagai alat stratifikasi klinis (Homayounieh et al., 2021). Selain itu, analisis berbantuan AI pada sub-mSv CT dilaporkan dapat meningkatkan reproduibilitas penilaian keterlibatan paru dan bahkan berhubungan dengan prediksi luaran buruk seperti kebutuhan ICU atau kematian (Gieraerts et al., 2020; Stoleriu et al., 2021).

Meskipun demikian, CT tetap memiliki keterbatasan mendasar sebagai alat diagnosis definitif COVID-19. Temuan radiologisnya tidak spesifik dan dapat tumpang tindih dengan pneumonia virus lain seperti influenza atau H1N1, sehingga spesifisitasnya terbatas bila digunakan tanpa integrasi klinis dan laboratorik (Kalra et al., 2020; Carotti et al., 2020). Meta-analisis awal pandemi memang menunjukkan sensitivitas CT yang tinggi, tetapi spesifisitasnya rendah dan heterogenitas antarstudi sangat besar, dipengaruhi oleh prevalensi penyakit, setting klinis, dan standar rujukan yang digunakan (Xu et al., 2020; Kovács et al., 2020). Oleh karena itu, konsensus profesional secara luas menempatkan CT, termasuk LDCT, bukan sebagai alat skrining universal atau pengganti RT-PCR, melainkan sebagai modalitas komplementer yang digunakan berdasarkan indikasi klinis, terutama pada pasien dengan gejala sedang–berat, kecurigaan komplikasi, atau kebutuhan evaluasi cepat dalam kondisi sumber daya terbatas (Kalra et al., 2020; Teichgräber et al., 2021; Homayounieh et al., 2021). Dalam kerangka tersebut, optimisasi protokol low-dose menjadi sangat relevan, karena memungkinkan manfaat klinis CT dipertahankan sambil menekan paparan radiasi, khususnya pada pasien yang mungkin memerlukan pemeriksaan berulang selama perawatan.

METODE

Tinjauan ini disusun sebagai narrative literature review untuk mensintesis bukti mengenai optimalisasi CT thoraks dosis rendah, meliputi low-dose CT (LDCT) dan ultra-low-dose CT (ULDCT), dalam evaluasi COVID-19 selama periode 2016–2022. Pendekatan naratif dipilih karena literatur yang relevan menunjukkan heterogenitas yang tinggi, baik dari segi desain penelitian, populasi, standar rujukan, maupun parameter protokol CT yang dilaporkan. Studi yang tersedia mencakup survei dosis multicenter, studi akurasi diagnostik, ulasan protokol, serta penelitian optimisasi parameter teknis, sehingga sintesis naratif dinilai lebih sesuai dibandingkan pendekatan kuantitatif teragregasi. Fokus utama review ini meliputi tiga aspek, yaitu rasional proteksi radiasi dan variasi dosis selama pandemi, performa diagnostik CT termasuk pada protokol dosis rendah dibandingkan RT-PCR atau standar rujukan lain, serta strategi optimisasi protokol yang dilaporkan dalam studi klinis dan ulasan teknis (Kalra et al., 2020; Dangis et al., 2020; Zhou et al., 2021; Azadbakht et al., 2021). Heterogenitas definisi CT “positif”, variasi penggunaan RT-PCR awal atau serial RT-PCR sebagai pembanding, dan perbedaan setting klinis juga menjadi

pertimbangan utama dalam pemilihan desain review ini (Dangis et al., 2020; He et al., 2020; Zhou et al., 2021; Xu et al., 2020).

Pencarian literatur dilakukan pada empat basis data utama, yaitu PubMed, Scopus, Web of Science, dan Google Scholar, untuk memperoleh cakupan artikel radiologi dan kedokteran yang luas. Pemilihan keempat basis data ini mengikuti praktik pencarian multi-sumber dalam kajian pencitraan COVID-19, sehingga memungkinkan identifikasi artikel lintas jurnal dan disiplin secara lebih komprehensif (Aljondi & Alghamdi, 2020). Strategi pencarian difokuskan pada artikel yang membahas penggunaan CT toraks pada COVID-19 sekaligus menyoroti optimisasi dosis dan protokol low-dose. Kata kunci yang digunakan dalam berbagai kombinasi dengan operator Boolean AND dan OR meliputi: “low-dose chest CT”, “ultra-low-dose chest CT”, “thoracic CT radiation dose reduction”, “COVID-19 diagnosis CT”, dan “SARS-CoV-2 chest CT low dose”. Kata kunci tersebut dirancang untuk menangkap dua kelompok literatur, yaitu studi akurasi diagnostik CT pada COVID-19 dan studi yang membahas manajemen dosis, parameter protokol, serta strategi reduksi dosis seperti AEC, pengurangan mAs/kVp, dan rapid-scan single-phase non-kontras (Kalra et al., 2020; Azadbakht et al., 2021; Dangis et al., 2020; He et al., 2020; Xu et al., 2020; Zhou et al., 2021).

Publikasi yang dimasukkan dibatasi pada periode 2016–2022. Pembatasan ini dimaksudkan untuk mencakup literatur pra-pandemi yang relevan dengan prinsip umum reduksi dosis pada CT toraks, sekaligus seluruh bukti pandemi terkait penggunaan CT dan optimisasi dosis pada COVID-19 hingga tahun 2022 (Kalra et al., 2020; Zhou et al., 2021; Azadbakht et al., 2021). Studi yang memenuhi kriteria inklusi meliputi artikel berbahasa Inggris atau Indonesia, studi original retrospektif maupun prospektif, studi akurasi diagnostik, survei dosis atau protokol, systematic review/meta-analysis, narrative review, serta guideline atau consensus statement yang berkaitan dengan CT toraks COVID-19 atau optimisasi protokol dan dosis (Aljondi & Alghamdi, 2020; Kalra et al., 2020; Dangis et al., 2020; Zhou et al., 2021; Azadbakht et al., 2021; Xu et al., 2020). Sebaliknya, editorial atau komentar tanpa data kuantitatif, artikel duplikat, dan studi non-thorax CT dikeluarkan dari review ini karena tidak sesuai dengan fokus sintesis (Zhou et al., 2021; Azadbakht et al., 2021; Aljondi & Alghamdi, 2020; Kalra et al., 2020).

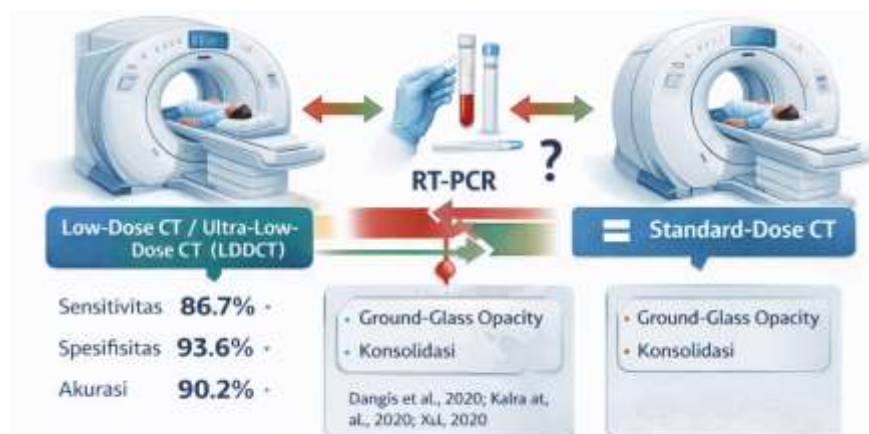
Seleksi studi dilakukan secara bertahap melalui penyaringan judul dan abstrak, dilanjutkan dengan telaah full-text untuk memastikan bahwa artikel memuat informasi mengenai protokol CT, parameter dosis, atau luaran diagnostik yang relevan. Dari setiap studi yang memenuhi syarat, diekstraksi variabel meliputi identitas studi, desain, setting klinis, populasi, protokol CT, parameter dosis seperti CTDIvol, DLP, dan effective dose, standar rujukan, luaran diagnostik, serta temuan utama terkait optimisasi dosis dan kualitas citra (Kalra et al., 2020; Zhou et al., 2021; Nasab et al., 2021; Shiri et al., 2020; He et al., 2020; Teichgräber et al., 2021; Ohana et al., 2021; Skolidis et al., 2021; Xu et al., 2020). Selanjutnya, seluruh temuan disintesis secara naratif berdasarkan tema-tema utama tanpa dilakukan meta-analysis, mengingat tingginya heterogenitas desain, definisi outcome, dan setting klinis pada literatur CT COVID-19 (Kalra et al., 2020; Dangis et al., 2020; Zhou et al., 2021; Ohana et al., 2021; Xu et al., 2020; Kovács et al., 2020).

HASIL DAN PEMBAHASAN

RQ1. Bagaimana akurasi diagnostik CT thorax dosis rendah (LDCT/ULDCT) dalam mendeteksi keterlibatan paru pada pasien COVID-19 dibandingkan dengan RT-PCR atau standard-dose CT berdasarkan literatur periode 2016–2022?

Berdasarkan literatur periode 2016–2022, CT thorax dosis rendah menunjukkan performa diagnostik yang baik untuk mendeteksi keterlibatan paru pada pasien COVID-19, terutama untuk mengenali pola pneumonia seperti ground-glass opacity dan konsolidasi, tetapi interpretasi akurasinya harus dilakukan secara hati-hati karena sangat dipengaruhi oleh standar rujukan, fase klinis, dan prevalensi penyakit pada populasi yang diperiksa (Dangis et al., 2020; He et al., 2020; Xu et al., 2020; Teichgräber et al., 2021; Ohana et al., 2021). Dalam konteks ini, LDCT lebih tepat dipahami sebagai alat deteksi keterlibatan paru daripada alat konfirmasi etiologi infeksi SARS-CoV-2. Hal ini penting karena sebagian besar studi menilai “akurasi” CT terhadap RT-PCR, padahal RT-PCR sendiri memiliki sensitivitas yang tidak sempurna, khususnya pada fase awal penyakit, sehingga klasifikasi false positive atau false negative pada CT tidak selalu mencerminkan kesalahan modalitas secara absolut (Kovács et al., 2020; He et al., 2020).

Temuan dari studi Dangis et al. (2020) memberikan salah satu bukti terkuat bahwa LDCT submillisievert dapat memiliki sensitivitas, spesifisitas, dan akurasi yang tinggi terhadap RT-PCR, masing-masing sebesar 86.7%, 93.6%, dan 90.2%, bahkan meningkat pada pasien dengan durasi gejala lebih dari 48 jam. Peningkatan performa ini menunjukkan bahwa akurasi CT sangat dipengaruhi oleh fase perjalanan penyakit, karena perubahan parenkim paru menjadi lebih nyata seiring progresivitas infeksi (Dangis et al., 2020). Temuan tersebut konsisten dengan studi lain yang melaporkan sensitivitas dan spesifisitas CT pada kisaran yang cukup baik untuk keperluan triase, meskipun variasi antarstudi tetap besar akibat perbedaan definisi CT positif, setting pelayanan, dan karakteristik populasi (Ohana et al., 2021; Skolidis et al., 2021). Dengan demikian, dalam skenario klinis tertentu, terutama pada pasien simptomatik dengan dugaan keterlibatan paru, LDCT mampu memberikan informasi yang relevan secara cepat dan reproduksibel.



Gambar 4. Posisi Diagnostik CT Dosis Rendah dalam COVID-19

Meskipun demikian, meta-analisis awal pandemi memperlihatkan sisi lain dari persoalan ini. Walaupun pooled sensitivity CT dilaporkan tinggi, spesifisitasnya cenderung lebih rendah dan heterogenitas antarstudi sangat besar (Xu et al., 2020). Kondisi ini terutama disebabkan oleh overlap radiologis antara COVID-19 dan pneumonia virus lain, sehingga CT tidak cukup spesifik untuk membedakan etiologi hanya berdasarkan morfologi lesi (Kalra et al., 2020; Kovács et al., 2020). Oleh karena itu, keunggulan utama LDCT terletak pada sensitivitasnya terhadap keterlibatan paru, bukan pada kemampuannya menegaskan diagnosis definitif COVID-19. Implikasi praktisnya adalah bahwa LDCT memiliki nilai tinggi sebagai pemeriksaan komplementer, terutama ketika diperlukan penilaian cepat mengenai apakah paru telah terlibat, tetapi hasilnya tetap harus ditafsirkan bersama data klinis dan laboratorik.

Apabila dibandingkan dengan standard-dose CT, bukti yang tersedia mendukung bahwa LDCT dapat mempertahankan reliabilitas deteksi untuk temuan pneumonia COVID-19 pada banyak kasus. Studi head-to-head oleh Tabatabaei et al. (2020) menunjukkan bahwa protokol 30 mAs memiliki kesepakatan intrareader yang sangat tinggi dibandingkan protokol 150 mAs, dengan penurunan effective dose yang bermakna. Ini menunjukkan bahwa untuk detection task tertentu, khususnya identifikasi pola pneumonia yang relatif jelas, pengurangan dosis tidak selalu mengorbankan performa interpretasi. Hasil ini diperkuat oleh review yang menyimpulkan bahwa banyak protokol low-dose dapat menurunkan dosis secara substansial tanpa penurunan akurasi diagnostik yang bermakna, asalkan protokol dioptimalkan dengan baik (Azadbakht et al., 2021; Lee et al., 2021).

Pada tingkat dosis yang lebih rendah lagi, ULDCT juga menunjukkan hasil yang menjanjikan, tetapi dengan trade-off yang lebih nyata. Greffier et al. (2021) dan Samir et al. (2021) melaporkan sensitivitas dan akurasi yang tetap tinggi pada ULDCT, namun beberapa pola yang lebih halus, seperti crazy paving, lebih sulit dikenali pada dosis yang sangat rendah. Hal ini menunjukkan bahwa ULDCT cocok untuk tugas deteksi umum terhadap pneumonia viral, tetapi mungkin kurang optimal untuk karakterisasi morfologi yang lebih rinci. Temuan ini sejalan dengan studi Shiri et al. (2020), yang menegaskan bahwa ULDCT mentah dapat kehilangan informasi kritis mengenai tipe lesi, sehingga teknik rekonstruksi berbasis deep learning dapat diperlukan untuk mempertahankan kualitas citra.

Secara keseluruhan, literatur menunjukkan bahwa LDCT memiliki akurasi diagnostik yang baik untuk mendeteksi keterlibatan paru pada COVID-19 dan, dalam kondisi tertentu, dapat mendekati performa standard-dose CT untuk tujuan deteksi pola pneumonia. Namun, performa tersebut tidak bersifat absolut karena dipengaruhi oleh prevalensi lokal, fase klinis, standar rujukan, dan kualitas protokol. Oleh sebab itu, LDCT paling tepat diposisikan sebagai modalitas yang sensitif dan efisien untuk mendeteksi pneumonia COVID-19, tetapi tidak cukup spesifik untuk menggantikan RT-PCR sebagai standar utama konfirmasi etiologis (Dangis et al., 2020; Kalra et al., 2020; Xu et al., 2020; Teichgräber et al., 2021).

RQ2. Parameter protokol apa saja yang paling berperan dalam optimalisasi CT thorax dosis rendah pada evaluasi COVID-19, dan bagaimana pengaruhnya terhadap paparan radiasi, noise citra, serta diagnostic acceptability?

Optimalisasi CT thorax dosis rendah pada evaluasi COVID-19 ditentukan oleh beberapa parameter teknis utama, yaitu mAs, kVp, automatic exposure control/automatic tube current modulation (AEC/ATCM), pitch atau kecepatan akuisisi, serta metode rekonstruksi citra seperti iterative reconstruction (IR) dan deep learning reconstruction (Kalra et al., 2020; Zhou et al., 2021; Nasab et al., 2021; Booij et al., 2020; Singh et al., 2020). Di antara parameter tersebut, mAs dan AEC/ATCM merupakan faktor yang paling langsung memengaruhi paparan radiasi, sedangkan rekonstruksi citra menjadi faktor utama yang menentukan apakah penurunan dosis tetap menghasilkan citra yang dapat diterima secara diagnostik. Dengan kata lain, optimisasi dosis pada CT thorax bukan hanya persoalan menurunkan paparan, tetapi juga menyeimbangkan antara dosis, noise, dan kebutuhan visualisasi lesi target.



Gambar 5. Bagaimana Optimalisasi Protokol Mempengaruhi Kinerja CT Dosis Rendah

Penurunan mAs adalah strategi paling sederhana dan efektif untuk mengurangi dosis, tetapi juga merupakan sumber peningkatan noise yang paling nyata. Literatur menunjukkan bahwa penurunan mAs dapat secara substansial menurunkan effective dose, seperti terlihat pada perbandingan protokol 30 mAs versus 150 mAs yang tetap mempertahankan reliabilitas interpretasi untuk temuan khas COVID-19 (Tabatabaei et al., 2020). Namun, noise yang meningkat akibat penurunan mAs dapat mengurangi keterlihatan lesi berkontras rendah, terutama ground-glass opacity, sehingga strategi ini tidak dapat diterapkan secara agresif tanpa kompensasi teknologi (Joyce et al., 2020; Gomboleviskiy et al., 2021). Karena itu, pemilihan rentang mAs rendah harus bersifat task-based, yaitu disesuaikan dengan tujuan klinis apakah untuk deteksi cepat pola pneumonia atau untuk karakterisasi lesi yang lebih detail (Nasab et al., 2021).

Penggunaan AEC/ATCM memperhalus pendekatan tersebut dengan menyesuaikan arus tabung terhadap ukuran dan atenuasi pasien. Dalam studi optimisasi protokol COVID-19, AEC terbukti mampu menurunkan effective dose dibanding fixed mAs, sambil mempertahankan kualitas citra yang masih dapat

diterima untuk diagnosis keterlibatan paru (Nasab et al., 2021). Namun, manfaat AEC sangat bergantung pada pengaturan target noise atau quality reference yang tepat. Bila ambang kualitas ditetapkan terlalu tinggi, sistem justru akan meningkatkan paparan; sebaliknya, bila terlalu rendah, risiko kehilangan lesi halus akan meningkat (Booij et al., 2020; Singh et al., 2020). Temuan ini menegaskan bahwa optimisasi AEC tidak dapat dipisahkan dari validasi klinis, terutama untuk lesi low-contrast seperti GGO (Gomboleviskiy et al., 2021).

Parameter lain yang penting adalah kVp, terutama ketika dikombinasikan dengan spectral shaping atau tin filter. Penurunan kVp dapat meningkatkan efisiensi dosis, dan pada platform tertentu strategi ini memungkinkan pencapaian effective dose yang sangat rendah tanpa menurunkan reliabilitas penilaian parenkim paru secara bermakna (Agostini et al., 2020). Selain itu, pitch tinggi dan akuisisi cepat berkontribusi menurunkan artefak gerak, yang sangat relevan pada pasien COVID-19 dengan dispnea atau batuk (Zhou et al., 2021; Kalra et al., 2020). Dengan demikian, rapid-scan single-phase non-kontras merupakan kombinasi protokol yang paling logis dalam banyak indikasi COVID-19, karena sekaligus menekan dosis dan meningkatkan kelayakan pemeriksaan.

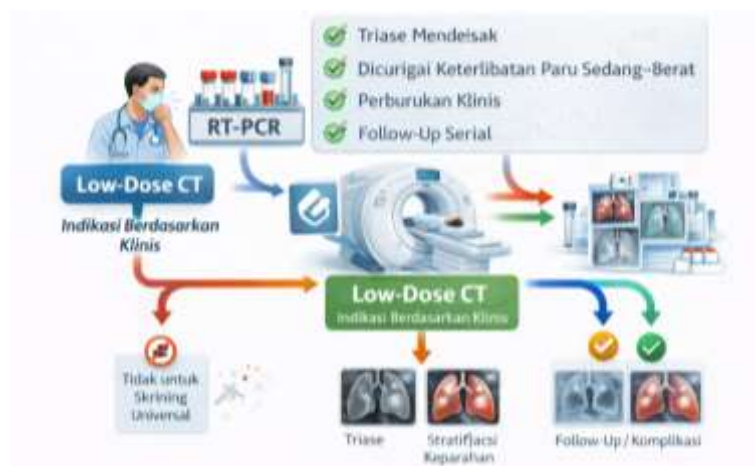
Peran iterative reconstruction sangat sentral karena teknologi ini memungkinkan noise yang meningkat akibat penurunan dosis dikompensasi secara komputasional. Literatur menunjukkan bahwa IR adalah salah satu pilar utama keberhasilan low-dose CT, karena dapat mempertahankan diagnostic acceptability pada banyak indikasi toraks, termasuk pneumonia COVID-19 (Azadbakht et al., 2021; Kalra et al., 2020). Namun, IR juga memiliki keterbatasan, yakni dapat mengubah tekstur citra dan memengaruhi analisis kuantitatif atau penilaian struktur halus tertentu (Avila et al., 2021). Oleh sebab itu, pemilihan tingkat IR sebaiknya mempertimbangkan apakah tujuan pemeriksaan adalah deteksi visual rutin atau analisis kuantitatif yang lebih sensitif terhadap perubahan tekstur.

Pada ULDCCT, rekonstruksi berbasis AI atau deep learning menjadi semakin penting. Studi Shiri et al. (2020) menunjukkan bahwa ULDCCT mentah dapat kehilangan informasi penting tentang tipe lesi, tetapi pendekatan deep learning mampu meningkatkan kualitas citra secara substansial. Meski demikian, adanya outlier menandakan bahwa teknologi ini belum dapat dianggap sepenuhnya stabil untuk semua kasus. Dengan demikian, AI berpotensi memperluas batas aman reduksi dosis, tetapi belum sepenuhnya menggantikan kebutuhan validasi lokal dan pengawasan radiolog (Shiri et al., 2020; Gang et al., 2021).

Secara keseluruhan, parameter yang paling berperan dalam optimalisasi LDCT/ULDCCT adalah kombinasi penurunan mAs, pengaturan kVp, penggunaan AEC/ATCM, rapid/high-pitch acquisition, dan rekonstruksi citra modern. Dampak utamanya adalah penurunan CTDIvol, DLP, dan effective dose, tetapi konsekuensi teknis berupa peningkatan noise harus dikendalikan agar diagnostic acceptability tetap terjaga. Prinsip yang paling penting ialah bahwa optimisasi protokol tidak boleh berorientasi pada reduksi dosis semata, melainkan harus berbasis tujuan diagnostik, ukuran pasien, dan kemampuan teknologi scanner yang tersedia (Nasab et al., 2021; Booij et al., 2020; May et al., 2021; Avila et al., 2021).

RQ3. Dalam konteks praktik klinis, sejauh mana CT thorax dosis rendah dapat digunakan sebagai modalitas komplementer untuk triase, stratifikasi derajat keparahan, dan follow-up pasien COVID-19 tanpa menggantikan peran RT-PCR sebagai standar diagnosis utama?

Dalam praktik klinis, CT thorax dosis rendah memiliki peran yang paling kuat sebagai modalitas komplementer, bukan pengganti RT-PCR, dalam tiga area utama, yaitu triase pasien, stratifikasi derajat keparahan, dan follow-up serial selama perawatan. Literatur secara konsisten menegaskan bahwa RT-PCR tetap merupakan metode utama untuk konfirmasi etiologi SARS-CoV-2, sedangkan CT digunakan ketika dibutuhkan informasi cepat mengenai keterlibatan paru, luas penyakit, atau komplikasi yang tidak dapat dijawab hanya oleh pemeriksaan virologis (Kalra et al., 2020; He et al., 2020; Xu et al., 2020). Posisi komplementer ini menjadi penting karena CT, meskipun sensitif, tidak cukup spesifik untuk membedakan COVID-19 dari pneumonia virus lain, sehingga tidak dapat berdiri sendiri sebagai tes diagnostik definitif (Kalra et al., 2020; Carotti et al., 2020).



Gambar 6. Jalur Penggunaan Klinis CT Dosis Rendah dalam COVID-19

Dalam konteks triase, LDCT terbukti bermanfaat terutama pada fase pandemi ketika keputusan klinis harus dibuat cepat, sementara hasil RT-PCR mungkin tertunda atau berisiko negatif palsu pada pemeriksaan awal. Studi Dangis et al. (2020) menunjukkan bahwa LDCT submillisievert dapat memberikan penilaian yang cepat, akurat, dan reproduksibel di instalasi gawat darurat, sekaligus membantu mengidentifikasi diagnosis alternatif pada pasien non-COVID. Temuan ini menunjukkan nilai tambah LDCT bukan hanya dalam mendeteksi pneumonia kompatibel COVID-19, tetapi juga dalam mendukung pengambilan keputusan klinis awal. Namun, peran tersebut paling defensibel pada pasien terpilih dengan gejala respiratorik atau kecurigaan klinis yang kuat, bukan untuk skrining populasi umum. Pada setting prevalensi rendah, LDCT juga dapat berfungsi sebagai alat rule-out komplementer karena negative predictive value yang tinggi, sebagaimana ditunjukkan oleh studi Teichgräber et al. (2021). Akan tetapi, karena nilai prediktif sangat bergantung pada prevalensi lokal, penerapan CT dalam triase harus adaptif terhadap situasi epidemiologi dan tidak dapat digeneralisasi secara universal (Ohana et al., 2021).

Dalam stratifikasi derajat keparahan, CT thorax dosis rendah tampaknya memiliki nilai klinis yang lebih stabil. Survei internasional menunjukkan bahwa CT lebih sering digunakan untuk menilai severity

dibandingkan untuk diagnosis awal, mencerminkan bahwa kekuatan utama modalitas ini terletak pada kemampuan memvisualisasikan luas keterlibatan paru dan memantau progresi penyakit (Homayounieh et al., 2021). Studi lain menunjukkan bahwa analisis kuantitatif keterlibatan paru pada low-dose CT, terutama bila dibantu AI, dapat meningkatkan prediksi luaran seperti kebutuhan ICU atau kematian dan meningkatkan reproduktibilitas antar-pembaca (Gieraerts et al., 2020; Stoleriu et al., 2021). Dengan demikian, LDCT bukan hanya berguna untuk menyatakan ada atau tidaknya pneumonia, tetapi juga relevan untuk menilai beban penyakit dan mendukung pengambilan keputusan klinis, misalnya dalam menentukan kebutuhan rawat inap, monitoring intensif, atau evaluasi perburukan.

Peran follow-up serial merupakan area lain di mana LDCT memiliki justifikasi yang kuat. Pasien COVID-19, terutama yang dirawat inap dengan penyakit sedang hingga berat, dapat menjalani pemeriksaan CT berulang untuk memantau progresi lesi, evaluasi respons terapi, atau mendeteksi komplikasi. Dalam kondisi ini, isu proteksi radiasi menjadi sangat penting karena dosis kumulatif dapat meningkat secara substansial dalam waktu singkat (Zhou et al., 2021). Oleh sebab itu, penerapan protokol low-dose single-phase non-kontras merupakan strategi yang rasional untuk menekan beban radiasi kolektif tanpa menghilangkan manfaat klinis CT (Homayounieh et al., 2021; Nasab et al., 2021). ULDCT bahkan dapat dipertimbangkan untuk tugas deteksi tertentu, tetapi penggunaannya harus lebih selektif karena ada risiko berkurangnya visibilitas detail pola tertentu dan potensi kehilangan informasi bila protokol terlalu agresif (Greffier et al., 2021; Shiri et al., 2020).

Secara sintesis, CT thorax dosis rendah paling layak digunakan sebagai modalitas komplementer pada pasien terpilih: untuk triase cepat di IGD, untuk rule-out dini pada kondisi tertentu, untuk stratifikasi keparahan, dan untuk follow-up serial yang memerlukan perhatian khusus terhadap paparan radiasi. Namun, di semua skenario tersebut, CT tetap tidak menggantikan RT-PCR sebagai rujukan utama diagnosis etiologis. Praktik terbaik adalah mengintegrasikan LDCT dengan data klinis, hasil laboratorium, dan sistem pelaporan terstandar agar manfaatnya optimal tanpa menimbulkan overdiagnosis berbasis pencitraan semata (Dhillon et al., 2020; Borghesi et al., 2021; Kalra et al., 2020).

KESIMPULAN

Berdasarkan sintesis literatur periode 2016–2022, CT thorax dosis rendah (low-dose CT/LDCT) dan ultra-low-dose CT (ULDCT) merupakan pendekatan pencitraan yang menjanjikan dalam evaluasi COVID-19, terutama untuk mendeteksi keterlibatan paru, menilai luas penyakit, serta mendukung triase dan pemantauan klinis pada pasien terpilih. Bukti yang tersedia menunjukkan bahwa LDCT mampu mempertahankan akurasi diagnostik yang baik untuk identifikasi pola pneumonia COVID-19, khususnya ground-glass opacity dan konsolidasi, dengan paparan radiasi yang secara bermakna lebih rendah dibandingkan CT standar. Pada beberapa studi, bahkan protokol submillisievert dan ultra-low-dose tetap menunjukkan sensitivitas dan akurasi yang tinggi, meskipun performa tersebut sangat dipengaruhi oleh

fase klinis, prevalensi penyakit, standar rujukan yang digunakan, serta kualitas protokol akuisisi dan rekonstruksi citra.

Dari aspek teknis, optimisasi LDCT/ULDCT ditentukan oleh kombinasi parameter seperti penurunan mAs, pengaturan kVp, pemanfaatan automatic exposure control, penggunaan pitch tinggi atau rapid-scan, serta dukungan iterative reconstruction dan deep learning reconstruction. Strategi ini secara umum mampu menurunkan CTDIvol, DLP, dan effective dose tanpa mengorbankan *diagnostic acceptability* secara bermakna untuk tugas deteksi keterlibatan paru. Namun, literatur juga menunjukkan adanya batasan penting, yaitu bahwa reduksi dosis yang terlalu agresif dapat meningkatkan noise citra dan menurunkan keterlihatan lesi halus, terutama ground-glass opacity dini atau pola interstisial tertentu. Oleh karena itu, protokol dosis rendah tidak dapat diterapkan secara seragam, melainkan harus disesuaikan dengan tujuan klinis, ukuran pasien, serta kemampuan teknologi CT yang tersedia.

Dalam praktik klinis, posisi LDCT paling tepat adalah sebagai modalitas komplementer, bukan pengganti RT-PCR. CT dosis rendah dapat berperan dalam triase cepat, stratifikasi derajat keparahan, evaluasi komplikasi, dan follow-up serial, terutama pada pasien dengan gejala sedang–berat, perburukan klinis, atau ketika hasil RT-PCR tertunda maupun meragukan. Meskipun demikian, keterbatasan spesifisitas CT akibat overlap dengan pneumonia virus lain menegaskan bahwa pencitraan tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya dasar diagnosis etiologis COVID-19. Dengan demikian, manfaat terbesar LDCT terletak pada integrasinya dengan data klinis, laboratorium, dan pelaporan radiologis yang terstandar.

Saran yang dapat diajukan adalah perlunya standardisasi terminologi dan pelaporan protokol LDCT/ULDCT, termasuk pelaporan parameter dosis secara konsisten agar hasil antarinstansi dapat dibandingkan secara lebih bermakna. Selain itu, diperlukan penelitian multicenter dengan protokol homogen untuk menilai performa diagnostik, kualitas citra, dan efisiensi klinis secara lebih kuat. Studi pada subpopulasi khusus seperti pasien obesitas, anak, dan pasien dengan komorbid paru juga perlu diperluas. Pengembangan teknologi rekonstruksi berbasis AI patut terus dievaluasi, tetapi implementasinya harus disertai validasi klinis yang ketat agar pengurangan dosis tidak mengorbankan informasi diagnostik penting.

REFERENSI

- Agostini, Andrea, Alessandra Borgheresi, Marina Carotti, Letizia Ottaviani, Myriam Badaloni, Chiara Floridi, and Andrea Giovagnoni. 2020. "Third-Generation Iterative Reconstruction on a Dual-Source, High-Pitch, Low-Dose Chest CT Protocol With Tin Filter for Spectral Shaping at 100 kV: A Study on a Small Series of COVID-19 Patients." *La Radiologia Medica* 126(3):388–98. doi:10.1007/s11547-020-01298-5.
- Agostini, Andrea, Chiara Floridi, Alessandra Borgheresi, Myriam Badaloni, Paolo E. Pirani, Filippo Terilli, Letizia Ottaviani, and Andrea Giovagnoni. 2020. "Proposal of a Low-Dose, Long-Pitch,

- Dual-Source Chest CT Protocol on Third-Generation Dual-Source CT Using a Tin Filter for Spectral Shaping at 100 kVp for Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Patients: A Feasibility Study.” *La Radiologia Medica* 125(4):365–73. doi:10.1007/s11547-020-01179-x.
- Aljondi, Rowa, and Salem S. Alghamdi. 2020. “Diagnostic Value of Imaging Modalities for COVID-19: Scoping Review.” *Journal of Medical Internet Research* 22(8):e19673. doi:10.2196/19673.
- Avila, Ricardo S., Sean B. Fain, C. Hatt, Samuel G. Armato, James L. Mulshine, David S. Gierada, Mario Silva, David A. Lynch, Eric A. Hoffman, Frank N. Ranallo, John R. Mayo, David F. Yankelevitz, Raúl S. J. Estépar, R. Subramaniam, Claudia I. Henschke, Alex Guimaraes, and Daniel C. Sullivan. 2021. “QIBA Guidance: Computed Tomography Imaging for COVID-19 Quantitative Imaging Applications.” *Clinical Imaging* 77:151–57. doi:10.1016/j.clinimag.2021.02.017.
- Azadbakht, Javid, Daryoush Khoramian, Zahra S. Lajevardi, Fateme Elikaii, Amir H. Aflatoonian, Bagher Farhood, Masoud Najafi, and Hamed Bagheri. 2021. “A Review on Chest CT Scanning Parameters Implemented in COVID-19 Patients: Bringing Low-Dose CT Protocols Into Play.” *Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine* 52(1). doi:10.1186/s43055-020-00400-1.
- Booij, Ronald, Ricardo P. Budde, Marcel L. Dijkshoorn, and Marcel v. Straten. 2020. “Technological Developments of X-Ray Computed Tomography Over Half a Century: User’s Influence on Protocol Optimization.” *European Journal of Radiology* 131:109261. doi:10.1016/j.ejrad.2020.109261.
- Borghesi, Andrea, Nicola Sverzellati, Roberta Polverosi, Maurizio Balbi, Elisa Baratella, Marco Busso, Lucio Calandriello, Giancarlo Cortese, Alessandra Farchione, Roberto Iezzi, Stefano Palmucci, Ilaria Pulzato, Cristiano Rampinelli, Chiara Romei, Adele Valentini, Roberto Grassi, and Anna R. Larici. 2021. “Impact of the COVID-19 Pandemic on the Selection of Chest Imaging Modalities and Reporting Systems: A Survey of Italian Radiologists.” *La Radiologia Medica* 126(10):1258–72. doi:10.1007/s11547-021-01385-1.
- Carotti, Marina, Fausto Salaffi, Piercarlo Sarzi-Puttini, Andrea Agostini, Alessandra Borgheresi, Davide Minorati, Massimo Galli, Daniela Marotto, and Andrea Giovagnoni. 2020. “Chest CT Features of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Pneumonia: Key Points for Radiologists.” *La Radiologia Medica* 125(7):636–46. doi:10.1007/s11547-020-01237-4.
- Coşkun, Mehmet. 2020. “Determination of Radiation Exposure With Related to the Use of Chest CT in During COVID-19 Pandemic in Pediatric Patients.” *Pediatric Practice and Research* 8(3):79–82. doi:10.21765/pprjournal.853934.
- Dangis, Anthony, Christopher Gieraerts, Yves D. Bruecker, Lode Janssen, Hanne Valgaeren, Dagmar Obbels, Marc Gillis, Marc V. Ranst, Johan Frans, Annick Demeyere, and Rolf Symons. 2020. “Accuracy and Reproducibility of Low-Dose Submillisievert Chest CT for the Diagnosis of COVID-19.” *Radiology Cardiothoracic Imaging* 2(2):e200196. doi:10.1148/ryct.2020200196.
- Dhillon, Permesh S., Kate Pointon, Robert Lenthall, Shalini Nair, Ganesh Subramanian, Norman McConachie, and Wazim Izzath. 2020. “Regional Mechanical Thrombectomy Imaging Protocol in

- Patients Presenting With Acute Ischemic Stroke During the COVID-19 Pandemic.” *American Journal of Neuroradiology* 41(10):1849–55. doi:10.3174/ajnr.a6754.
- Foda, Haitham, and Mona Talaat. 2021. “Diagnostic Efficacy and Radiation Safety of Low Dose CT Protocol in COVID-19 Pandemic: An Alternative for Deficient RT-PCR.” *Zagazig University Medical Journal* 0(0):0–0. doi:10.21608/zumj.2021.86195.2283.
- Gang, Yadong, Xiongfeng Chen, Huan Li, Hanlun Wang, Jianying Li, Ying Guo, Junjie Zeng, Qiang Hu, Jinxiang Hu, and Haibo Xu. 2021. “A Comparison Between Manual and Artificial Intelligence–Based Automatic Positioning in CT Imaging for COVID-19 Patients.” *European Radiology* 31(8):6049–58. doi:10.1007/s00330-020-07629-4.
- Ghetti, C., O. Ortenzia, M. Maddalo, Luisa Altabella, and Nicola Sverzellati. 2020. “Dosimetric and Radiation Cancer Risk Evaluation of High Resolution Thorax CT During COVID-19 Outbreak.” *Physica Medica* 80:119–24. doi:10.1016/j.ejmp.2020.10.018.
- Gieraerts, Christopher, Anthony Dangis, Lode Janssen, Annick Demeyere, Yves D. Bruecker, Nele D. Brucker, Annelies V. D. Bergh, Tine Lauwerier, A. Heremans, Eric Frans, Michaël R. Laurent, Bavo Ector, John Roosen, Annick Smismans, Johan Frans, Marc Gillis, and Rolf Symons. 2020. “Prognostic Value and Reproducibility of AI-Assisted Analysis of Lung Involvement in COVID-19 at Low-Dose Submillisievert Chest CT: Sample Size Implications for Clinical Trials.” *Radiology Cardiothoracic Imaging* 2(5):e200441. doi:10.1148/ryct.2020200441.
- Gomboleviskiy, Victor A., C. П. Мопозов, Valeria Chernina, Ivan A. Blokhin, and J. Vassileva. 2021. “A Phantom Study to Optimise the Automatic Tube Current Modulation for Chest CT in COVID-19.” *European Radiology Experimental* 5(1). doi:10.1186/s41747-021-00218-0.
- Greffier, Joël, Adel Hoballah, Alexandre Sadate, Fabien d. Oliveira, Pierre-Géraud Claret, Hélène d. Forges, Paul Loubet, Jean-Marc Mauboussin, Aymeric Hamard, Jean-Paul Bérégi, and Julien Frandon. 2021. “Ultra-Low-Dose Chest CT Performance for the Detection of Viral Pneumonia Patterns During the COVID-19 Outbreak Period: A Monocentric Experience.” *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery* 11(7):3190–99. doi:10.21037/qims-20-1176.
- He, Jianlong, Lin Luo, Zhendong Luo, Jianxun Lyu, Ming-Yen Ng, Xiping Shen, and Zhibo Wen. 2020. “Diagnostic Performance Between CT and Initial Real-Time RT-PCR for Clinically Suspected 2019 Coronavirus Disease (COVID-19) Patients Outside Wuhan, China.” *Respiratory Medicine* 168:105980. doi:10.1016/j.rmed.2020.105980.
- Homayounieh, Fatemeh, Ola Holmberg, Rashid A. Umairi, Sallam Aly, Algidas Basevičius, Paulo R. Costa, Adham Darweesh, Vesna Gershman, Pilvi Ilves, D. Kostova-Lefterova, Simone K. Renha, Iman Mohseni, Osvaldo Rampado, Natalia Rotaru, Issahaku Shirazu, B. E. Синицын, Tajana Turk, Claire V. N. Ty, Mannudeep K. Kalra, and J. Vassileva. 2021. “Variations in CT Utilization, Protocols, and Radiation Doses in COVID-19 Pneumonia: Results From 28 Countries in the IAEA Study.” *Radiology* 298(3):E141–51. doi:10.1148/radiol.2020203453.

- Joyce, Stella, Owen J. O'Connor, M. Maher, and Mark F. McEntee. 2020. "Strategies for Dose Reduction With Specific Clinical Indications During Computed Tomography." *Radiography* 26:S62–68. doi:10.1016/j.radi.2020.06.012.
- Kalra, Mannudeep K., Fatemeh Homayounieh, Chiara D. Arru, Ola Holmberg, and J. Vassileva. 2020. "Chest CT Practice and Protocols for COVID-19 From Radiation Dose Management Perspective." *European Radiology* 30(12):6554–60. doi:10.1007/s00330-020-07034-x.
- Kovács, Anita, Péter Palásti, Dániel Veréb, Bence Bozsik, András Palkó, and Zsigmond T. Kincses. 2020. "The Sensitivity and Specificity of Chest CT in the Diagnosis of COVID-19." *European Radiology* 31(5):2819–24. doi:10.1007/s00330-020-07347-x.
- Lee, Jong H., Hyunsook Hong, Hyungjin Kim, Chang H. Lee, Jin M. Goo, and Soon H. Yoon. 2021. "CT Examinations for COVID-19: A Systematic Review of Protocols, Radiation Dose, and Numbers Needed to Diagnose and Predict." *Journal of the Korean Society of Radiology* 82(6):1505. doi:10.3348/jksr.2021.0096.
- May, Matthias, Rafael Heiß, Julia Koehnen, Matthias Wetzl, Sarina K. Mueller, Christoph Treutlein, Lars Bräuer, Michael Uder, and Markus Kopp. 2021. "Personalized Chest Computed Tomography." *Investigative Radiology* 57(3):148–56. doi:10.1097/rli.0000000000000822.
- Ohana, Mickaël, J. Müller, François Séverac, Pascal Bilbault, Martin Behr, M. Oberlin, Pierre Leyendecker, and Catherine Roy. 2021. "Temporal Variations in the Diagnostic Performance of Chest CT for Covid-19 Depending on Disease Prevalence: Experience From North-Eastern France." *European Journal of Radiology* 134:109425. doi:10.1016/j.ejrad.2020.109425.
- Samir, Ahmed, Reham M. El-Husseiny, Rania A. Sweed, Nermeen Abd El-Monsef Abd El-Maaboud, and Mohamed Masoud. 2021. "Ultra-Low-Dose Chest CT Protocol During the Second Wave of COVID-19 Pandemic: A Double-Observer Prospective Study on 250 Patients to Evaluate Its Detection Accuracy." *Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine* 52(1). doi:10.1186/s43055-021-00512-2.
- Seyed Mohammad Bagher Hosseini Nasab, Mohammad R. Deevband, Roghaye Rahimi, Saeed Nasiri, Mohammad R. Ahangaran, and Mina Morshedi. 2021. "Optimization of Lung Ct Protocol for the Diagnostic Evaluation of Covid-19 Lung Disease." *Radiation Protection Dosimetry* 196(1–2):120–27. doi:10.1093/rpd/ncab140.
- Shiri, Isaac, Azadeh Akhavanallaf, Amirhossein Sanaat, Yazdan Salimi, Dariush Askari, Zahra Mansouri, Sajad P. Shayesteh, Mohammad Hasanian, Kiara Rezaei-Kalantari, Ali Salahshour, Saleh Sandoughdaran, Hamid Abdollahi, Hossein Arabi, and Habib Zaidi. 2020. "Ultra-Low-Dose Chest CT Imaging of COVID-19 Patients Using a Deep Residual Neural Network." *European Radiology* 31(3):1420–31. doi:10.1007/s00330-020-07225-6.

- Singh, Ramandeep, Weiwen Wu, Ge Wang, and Mannudeep K. Kalra. 2020. "Artificial Intelligence in Image Reconstruction: The Change Is Here." *Physica Medica* 79:113–25. doi:10.1016/j.ejmp.2020.11.012.
- Skalidis, Ioannis, Vinh K. Nguyen, Hugo Bothorel, Lauriane Poli, Rui R. D. Costa, Alain B. Younossian, Nicole Petriccioli, and Omar Kherad. 2021. "Unenhanced Computed Tomography (CT) Utility for Triage at the Emergency Department During COVID-19 Pandemic." *The American Journal of Emergency Medicine* 46:260–65. doi:10.1016/j.ajem.2020.07.058.
- Stoleriu, Mircea G., Michael Gerckens, Florian Obereisenbuchner, Iva Zaimova, Justin Hetrodt, Sarah-Christin Mavi, Felicitas Schmidt, Anna A. Schoenlebe, Katharina Heinig-Menhard, Ina Koch, Rudolf A. Jörres, Judith Spiro, Lorenz Nowak, Rudolf Hatz, Jürgen Behr, Wolfgang Gesierich, Marion Heiß-Neumann, and Julien Dinkel. 2021. "Automated Quantitative Thin Slice Volumetric Low Dose CT Analysis Predicts Disease Severity in COVID-19 Patients." *Clinical Imaging* 79:96–101. doi:10.1016/j.clinimag.2021.04.008.
- Tabatabaei, Seyed M. H., Hamid R. Talari, Ali Gholamrezanezhad, Bagher Farhood, Habibollah Rahimi, Reza Razzaghi, Narges Mehri, and Hamid Rajebi. 2020. "A Low-Dose Chest CT Protocol for the Diagnosis of COVID-19 Pneumonia: A Prospective Study." *Emergency Radiology* 27(6):607–15. doi:10.1007/s10140-020-01838-6.
- Teichgräber, Ulf, Amer Malouhi, Maja Ingwersen, Rotraud Neumann, Marina Reljic, Stefanie Deinhardt-Emmer, Bettina Löffler, Wilhelm Behringer, Jan-Christoph Lewejohann, Andreas Stallmach, and Philipp A. Reuken. 2021. "Ruling Out COVID-19 by Chest CT at Emergency Admission When Prevalence Is Low: The Prospective, Observational SCOUT Study." *Respiratory Research* 22(1). doi:10.1186/s12931-020-01611-w.
- Xu, Buyun, Yangbo Xing, Jiahao Peng, Zhaohai Zheng, Weiliang Tang, Yong Sun, Chao Xu, and Fang Peng. 2020. "Chest CT for Detecting COVID-19: A Systematic Review and Meta-Analysis of Diagnostic Accuracy." *European Radiology* 30(10):5720–27. doi:10.1007/s00330-020-06934-2.
- Zhou, Yang, Yineng Zheng, Yun Wen, Xin Dai, Wengang Liu, Qihui Gong, Chaoqiong Huang, Fajin Lv, and Jiahui Wu. 2021. "Radiation Dose Levels in Chest Computed Tomography Scans of Coronavirus Disease 2019 Pneumonia." *Medicine* 100(31):e26692. doi:10.1097/md.00000000000026692.