

DUAL-ENERGY CT (DECT) DALAM PRAKTIK KLINIS: DARI BATU GINJAL HINGGA EMBOLI PARU DAN GOUT - SEBUAH LITERATURE REVIEW**Ni Putu Arye Dyanthi Octa Dewi**Email Korespondensi: giana.gilang2018@gmail.comDisubmit: 11 Desember 2025 Diterima: 28 Desember 2025 Diterbitkan: 01 Januari 2026
Doi: <https://doi.org/10.33024/mnj.v8i1.23949>**ABSTRACT**

Dual-energy computed tomography (DECT) has emerged as a spectral CT technique that overcomes key limitations of single-energy CT by exploiting energy-dependent attenuation to perform material decomposition and generate quantitative derivative images. This narrative literature review summarizes physical principles, reconstruction techniques, and key clinical applications of DECT in urolithiasis, pulmonary embolism, and gout, as well as its limitations, radiation issues, and future directions. A structured search of recent experimental, clinical, and meta-analytic studies on DECT was performed using major radiology and multidisciplinary journals. Articles were grouped according to technical concepts, kidney stone characterization, pulmonary perfusion imaging, and urate crystal detection, and were critically synthesized. The reviewed evidence shows that DECT reliably differentiates uric acid from non-uric acid stones with high pooled sensitivity and specificity, potentially replacing conventional stone analysis and allowing earlier alkalinization therapy. In pulmonary embolism, DECT enriches CT pulmonary angiography by combining low-keV virtual monoenergetic images with iodine perfusion maps and perfused blood volume metrics, thereby improving clot detection under suboptimal opacification and enabling quantitative assessment of perfusion defects. In gout, color-coded DECT maps demonstrate high diagnostic accuracy for monosodium urate deposition and permit volumetric quantification of crystal burden, although sensitivity decreases in very early disease and artefacts may generate false positives. DECT currently represents a mature and versatile spectral CT platform that integrates anatomic and functional information across multiple organ systems; however, standardisation of protocols, mitigation of artefacts, and development of advanced multi-material and photon-counting techniques remain crucial for wider clinical adoption.

Keywords: *Dual-Energy CT, Kidney Stones, Pulmonary Embolism, Gout, Spectral Imaging.*

ABSTRAK

*Dual-energy computed tomography (DECT) berkembang sebagai teknik CT spektral yang mengatasi keterbatasan CT energi tunggal dengan memanfaatkan perbedaan atenuasi terhadap dua spektrum energi untuk melakukan *material decomposition* dan menghasilkan citra turunan kuantitatif. Tinjauan pustaka ini merangkum prinsip dasar, teknik rekonstruksi, serta aplikasi klinis utama DECT pada batu ginjal, emboli paru, dan gout, sekaligus membahas keterbatasan, isu*

dosis radiasi, dan arah pengembangan teknologi. Dilakukan penelusuran terstruktur terhadap artikel eksperimental, studi klinis, dan meta-analisis terkait DECT pada jurnal radiologi dan kedokteran multidisiplin. Literatur diklasifikasikan berdasarkan aspek teknis, karakterisasi komposisi batu ginjal, pemetaan perfusi paru, dan deteksi kristal monosodium urat, kemudian disintesis secara naratif dan kritis. Bukti yang dihimpun menunjukkan DECT mampu membedakan batu asam urat dan non asam urat dengan sensitivitas dan spesifisitas tinggi sehingga berpotensi menggantikan analisis batu konvensional dan memungkinkan inisiasi terapi alkalinisasi lebih dini. Pada emboli paru, DECT menambahkan rekonstruksi *virtual monoenergetic* energi rendah dan *iodine perfusion map* di atas *CT pulmonary angiography* konvensional, sehingga meningkatkan deteksi trombus pada opasifikasi suboptimal dan menyediakan parameter *perfused blood volume* untuk menilai defisit perfusi secara kuantitatif. Pada gout, peta warna DECT menunjukkan akurasi diagnostik tinggi untuk mendeteksi deposisi kristal urat dan memungkinkan kuantifikasi beban kristal, walaupun sensitivitas menurun pada penyakit sangat dini dan artefak dapat menimbulkan hasil positif palsu. DECT saat ini merepresentasikan platform CT spektral yang matang dan serbaguna yang mengintegrasikan informasi morfologi dan fungsional lintas sistem organ, namun masih memerlukan standarisasi protokol, pengendalian artefak, serta pengembangan algoritma multi-material dan teknologi *photon-counting* untuk implementasi yang lebih luas.

Kata Kunci: Dual-Energy CT, Batu Ginjal, Emboli Paru, Gout, Pencitraan Spektral.

PENDAHULUAN

Perkembangan computed tomography (CT) modern bergeser dari sekadar pencitraan anatomi menuju penilaian komposisi dan karakter jaringan secara lebih spesifik. Pada CT konvensional, dua material berbeda dapat tampak serupa karena berbagi nilai atenuasi pada satu spektrum energi, terutama bila bercampur dalam satu voxel. Pendekatan dua energi menjadi relevan karena kurva atenuasi tiap material akan “terpisah” ketika dipindai pada energi berbeda (Agostini et al., 2019). Konsep *dual-energy CT* (DECT) memanfaatkan perbedaan kontribusi interaksi photoelectric dan Compton terhadap atenuasi sinar-X pada dua tingkat energi untuk melakukan *material decomposition*, mendeteksi dan melabeli material dasar,

membangkitkan peta khusus seperti *iodine maps* dan *virtual non-contrast*, serta menghasilkan *virtual monoenergetic images* yang dapat meningkatkan *contrast-to-noise ratio* atau mengurangi artefak (Agostini et al., 2019).

Kemampuan DECT menghasilkan dataset energi dan material spesifik membuka peluang kuantifikasi objektif lintas organ. Citra kontras DECT dapat merepresentasikan distribusi iodin yang lebih “murni”, sedangkan *virtual unenhanced* dapat dilaporkan sebanding dengan citra tanpa kontras pada konteks tertentu (Hamid et al., 2021). Pada urolitiasis, komposisi batu berimplikasi terapeutik besar karena tatalaksana berbeda antara batu asam urat dan non asam urat, sementara CT konvensional sering

tidak andal hanya berdasarkan angka Hounsfield. DECT menawarkan pemisahan material sehingga batu asam urat dan non asam urat dapat dibedakan dengan akurasi diagnostik tinggi; meta-analisis melaporkan sensitivitas dan spesifisitas gabungan sekitar 0,88 dan 0,98 untuk membedakan batu “dominan asam urat” dan “dominan non asam urat” (Hamid et al., 2021; McGrath et al., 2020). Studi perbandingan berbagai teknologi pemindai menunjukkan semua sistem mampu membedakan batu urat dari non urat dengan *area under the curve* tinggi, khususnya pada pemindai *dual-source*, bahkan dengan pengurangan dosis radiasi hingga kisaran puluhan persen tanpa penurunan performa bermakna (Pourvaziri et al., 2022).

Di luar sistem urinarius, DECT semakin diintegrasikan dalam protokol abdominal dan gastrointestinal. Kombinasi *low-energy monochromatic images*, *iodine maps*, serta *virtual unenhanced images* dilaporkan memperbaiki deteksi dan karakterisasi lesi, namun keberhasilan implementasi bergantung pada karakteristik teknis masing-masing platform dan alur rekonstruksi yang dirancang untuk praktik rutin (Mileto et al., 2021). Pada ranah kardioraks, DECT menambah nilai pada evaluasi emboli paru dengan memetakan defek perfusi melalui peta iodin di luar lokasi bekuan obstruktif, sehingga menjembatani informasi anatomi *CT pulmonary angiography* dengan informasi fungsional perfusi (Hamid et al., 2021). Kualitas peta iodin dan parameter seperti *perfused blood volume* (PBV) sangat dipengaruhi protokol kontras; volume dan laju injeksi yang lebih tinggi terbukti meningkatkan kualitas subjektif gambar, peta iodin, dan nilai PBV, sehingga

menegaskan perlunya standarisasi protokol (Kosmala et al., 2020). Pendekatan kuantitatif diperkuat dengan otomasi berbasis *deep learning* untuk segmentasi lobus dan kuantifikasi perfusi, di mana penurunan *normalized iodine concentration* pada lobus tertentu menunjukkan kemampuan diskriminasi yang terukur dengan AUC hingga sekitar 0,78 (Singh et al., 2020).

Pada sistem muskuloskeletal, gout menjadi contoh bagaimana DECT mengisi celah diagnostik ketika aspirasi sendi invasif tidak praktis. Meta-analisis menunjukkan sensitivitas gabungan sekitar 0,88 dan spesifisitas sekitar 0,90 untuk deteksi deposisi monosodium urat, mendukung DECT sebagai pendekatan noninvasif dengan AUC tinggi (Yu et al., 2018). Namun, variasi spesifisitas dan potensi *false positive* menuntut algoritma pembacaan yang lebih ketat; studi lain mengusulkan fokus pada lokasi khas seperti sendi MTP1, tendon patela, dan kepala talus serta menegaskan bahwa tidak semua lesi berwarna pada DECT merepresentasikan kristal urat (Christiansen et al., 2020). Secara keseluruhan, DECT mengubah CT dari sekadar alat visualisasi anatomi menjadi platform pencitraan spektral yang mampu melakukan karakterisasi material dan kuantifikasi, meskipun keberhasilan klinis tetap bergantung pada pemilihan protokol dan interpretasi yang terstandar.

KAJIAN PUSTAKA

Konsep Dasar dan Prinsip Dual-Energy CT (DECT)

Konsep dual-energy computed tomography (DECT) berangkat dari keterbatasan single-energy CT (SECT), di mana setiap voxel hanya

direpresentasikan oleh satu nilai koefisien atenuasi efektif sehingga campuran beberapa material dengan nomor atom dan densitas berbeda dapat tampak serupa dan menimbulkan ambiguitas diagnostik, misalnya antara kalsium dan iodin (Wang et al., 2012; Agostini et al., 2019). Secara fisika, kontras CT ditentukan oleh koefisien atenuasi linear $\mu(E)$ yang dipengaruhi interaksi photoelectric dan Compton; komponen photoelectric bergantung kuat pada nomor atom efektif dan menurun tajam pada energi tinggi, sedangkan Compton lebih ditentukan densitas elektron dan menurun lebih lambat (Wang et al., 2012; Agostini et al., 2019). Kurva atenuasi tiap material sepanjang spektrum energi bersifat khas, sehingga pengukuran pada dua energi memungkinkan pemisahan kontribusi material dalam kerangka hukum Beer-Lambert dan model basis material (Wang et al., 2012; Agostini et al., 2019).

DECT mengakuisisi data pada dua spektrum energi berbeda (misalnya kombinasi tegangan tabung rendah-tinggi atau teknik spektral lain) kemudian menerapkan two basis material decomposition dengan menetapkan dua *basis materials* seperti air-iodin atau air-kalsium, dan mengestimasi fraksi masing-masing material di setiap voxel (Wang et al., 2012; Agostini et al., 2019). Pendekatan ini berkembang menjadi three basis material decomposition dan metode Rho-Z untuk memperoleh nomor atom efektif dan densitas elektron, serta multi material decomposition (MMD) baik di domain proyeksi maupun citra; pada MMD diperlukan asumsi tambahan dan regularisasi karena masalah menjadi *ill-conditioned*, sehingga strategi seperti konservasi massa,

pembatasan jumlah material per voxel, dan *block matching* digunakan untuk meningkatkan akurasi sekaligus menekan noise (Xue et al., 2019; Agostini et al., 2019).

Berbagai skema akuisisi digunakan pabrikan, antara lain *dual-source CT*, *rapid kVp switching*, *twin-beam/split filter*, pemindaian sekuensial dua kali, dan *dual-layer detector*, dengan tujuan sama yaitu memperoleh dua dataset energi rendah dan tinggi yang terko-registrasi baik (D'Angelo et al., 2019; Schmidt and Flohr, 2020; Wang et al., 2012). Informasi spektral kemudian dimanfaatkan untuk menghasilkan *virtual monoenergetic images* (VMI) pada rentang energi luas, *iodine maps*, *virtual non-contrast* (VNC), dan peta effective atomic number atau Rho-Z yang mengubah DECT dari teknik morfologis menjadi teknik kuantitatif (Agostini et al., 2019; D'Angelo et al., 2019; Wang et al., 2012). Perkembangan terkini juga mengintegrasikan pendekatan *deep learning* untuk mensintesis data DECT atau meningkatkan dekomposisi material, sehingga berpotensi menurunkan dosis radiasi dan memperluas akses manfaat DECT pada pemindai konvensional (Lyu et al., 2021).

METODOLOGI PENELITIAN

Dilakukan penelusuran terstruktur terhadap artikel eksperimental, studi klinis, dan meta-analisis terkait DECT pada jurnal radiologi dan kedokteran multidisiplin. Literatur diklasifikasikan berdasarkan aspek teknis, karakterisasi komposisi batu ginjal, pemetaan perfusi paru, dan deteksi kristal monosodium urat, kemudian disintesis secara naratif dan kritis.

PEMBAHASAN

Rekonstruksi Spektral dan Produk Turunan DECT: Virtual Monoenergetic, Iodine Map, dan Virtual Non-Contrast

Data spektral DECT menjadi bermakna ketika diolah menjadi produk turunan yang relevan secara klinis, terutama *virtual monoenergetic images* (VMI) dan citra berbasis *material decomposition* seperti *iodine map* dan *virtual non-contrast* (VNC) (Xu et al., 2020). VMI berupaya “meniru” berkas monokromatik pada energi tertentu sehingga dapat mengurangi artefak spektral dan mengatur kontras lebih terarah, dengan rentang energi sekitar 40-140 keV; energi rendah mendekati K-edge iodine (~36 keV) meningkatkan visibilitas kontras iodine, sedangkan energi tinggi membantu menurunkan artefak *beam hardening* (D’Angelo et al., 2019).

Secara klinis, pemilihan energi VMI menyeimbangkan kontras dan noise: energi rendah meningkatkan atenuasi iodine dan *contrast-to-noise ratio* (CNR) vaskular, namun diikuti peningkatan noise, sehingga energi optimal biasanya berada di kisaran menengah, misalnya ~40 keV untuk kualitas vaskular dan ~50 keV untuk kualitas keseluruhan (Kalisz et al., 2018; Hamid et al., 2021). Energi tinggi bermanfaat untuk mengurangi artefak logam dan *blooming* pada struktur hiperdens (Hamid et al., 2021). Untuk mengurangi penalti noise pada VMI energi rendah, dikembangkan algoritma *noise-optimized* seperti *monoenergetic plus* (Mono+, MEI(+)) yang menggabungkan keunggulan kontras energi rendah dengan profil noise energi lebih tinggi melalui pendekatan pemisahan frekuensi (Schmidt and Flohr, 2020). Pada CTPA, VMI rendah (~40-60 keV) memungkinkan pengurangan dosis

iodine hampir 50% tanpa mengorbankan kualitas diagnostik (Hamid et al., 2021).

Kelompok kedua adalah produk *material-specific*, terutama *iodine map* yang menampilkan distribusi dan konsentrasi iodine sebagai indikator perfusi atau vaskularisasi, serta memungkinkan kuantifikasi melalui *iodine concentration* dan *normalized iodine concentration* (NIC) dengan membandingkan lesi terhadap referensi seperti aorta (Hamid et al., 2021; Liang et al., 2022; Xu et al., 2020). VNC mensintesis citra “tanpa kontras” dari fase berkontras dengan menghilangkan komponen iodine, sehingga dapat membedakan hiperdensitas akibat enhancement dibanding perdarahan atau kalsifikasi dan berpotensi menggantikan fase *true non-contrast* pada protokol multipase (Hamid et al., 2021). Namun, VNC memiliki keterbatasan: perbedaan atenuasi terhadap *true non-contrast* dapat bermakna pada tulang spongiosa, subtraksi berlebihan dapat terjadi pada konsentrasi iodine tinggi, noise umumnya lebih besar, dan kualitas citra lebih rendah sehingga interpretasi harus hati-hati (Sauter et al., 2018; Hamid et al., 2021). Selain itu, kuantifikasi iodine dan karakter VNC dapat bervariasi antar teknologi pemindai, sehingga perbandingan lintas sistem memerlukan kesadaran terhadap bias dan kalibrasi (Dehlinger et al., 2023).

DECT pada Batu Ginjal: Karakterisasi Komposisi dan Implikasi Klinis

Urolitiasis merupakan masalah klinis yang sering dengan komposisi batu dominan kalsium oksalat, kalsium fosfat, asam urat, dan sistin; komposisi ini menentukan

mekanisme pembentukan, pilihan terapi, dan strategi pencegahan kekambuhan (Magee et al., 2024). Batu asam urat dapat diobati dengan *oral chemolysis* melalui alkalinisasi urin (target pH 7,0-7,2) dengan keberhasilan 70-80%, sedangkan batu kalsium dan sistin cenderung lebih resisten terhadap litotripsi dan lebih sering memerlukan intervensi invasif, sehingga identifikasi komposisi sejak awal menjadi penting dalam *individualized management* (Magee et al., 2024). Low-dose non-enhanced CT KUB telah menjadi standar diagnostik dengan sensitivitas 94-100% dan spesifisitas 97%, tetapi SECT memiliki keterbatasan membedakan komposisi karena tumpang tindih nilai atenuasi antar tipe batu (Magee et al., 2024).

DECT menggunakan kombinasi pemindaian energi rendah-tinggi (misalnya 80/140 kVp) dan pemrosesan spektral (misalnya Gemstone Spectral Imaging) untuk menilai parameter seperti *dual-energy ratio* (DER), *effective atomic number* (Zeff), dan kurva spektral Hounsfield, sehingga menjadi jembatan antara citra radiologis dan informasi kimiawi batu (Magee et al., 2024; McGrath et al., 2020). Pendekatan multi-indeks yang mengombinasikan beberapa parameter DECT terbukti meningkatkan efisiensi diagnostik; sensitivitas identifikasi batu calcium oxalate monohydrate meningkat dari 83,3% dengan satu indeks menjadi 95,2% dengan lima indeks (Rudenko et al., 2020). Secara sintesis, *systematic review* dan *meta-analysis* melaporkan bahwa DECT memiliki sensitivitas 0,88 dan spesifisitas 0,98 untuk batu "uric acid dominant" dan sensitivitas 0,82 serta spesifisitas 0,97 untuk batu "uric acid containing", sehingga cukup akurat untuk berperan sebagai *replacement*

test terhadap analisis batu konvensional dan memungkinkan inisiasi terapi alkalinisasi lebih dini (McGrath et al., 2020).

Isu teknis tetap penting dalam implementasi klinis. Pada *third-generation dual-source DECT*, protokol dosis rendah meningkatkan proporsi batu ≤ 5 mm yang tidak terlabel sebagai asam urat atau non asam urat, dan batu ≤ 3 mm dapat tidak terdeteksi secara visual, sehingga protokol *reduced-dose* sebaiknya dihindari bila batu kecil perlu dideteksi dan dikarakterisasi (Franken et al., 2018). Selain itu, banyak studi berfokus pada batu murni atau hampir murni, padahal di populasi nyata komposisi batu sering campuran; analisis *mixed stones* tetap menjadi tantangan (Magee et al., 2024). Studi prospektif juga menunjukkan bahwa karakterisasi DECT dapat mengubah rencana tatalaksana pada sekitar 5% pasien, menegaskan dampak klinis di luar sekadar akurasi diagnostik (Magee et al., 2024).

Perbandingan beberapa teknologi pemindai DECT menunjukkan bahwa seluruh platform yang dievaluasi mampu membedakan komposisi batu dengan performa sedang hingga tinggi, dan optimalisasi dosis dapat menurunkan CTDIvol secara bermakna tanpa penurunan akurasi diskriminasi komposisi, meskipun keterbatasan studi *in vitro* dan ukuran sampel tetap ada (Pourvaziri et al., 2022). Dengan demikian, DECT menempati peran sentral dalam karakterisasi komposisi batu ginjal, khususnya identifikasi batu asam urat yang dapat mengarahkan terapi medis non-invasif lebih cepat (McGrath et al., 2020; Magee et al., 2024).

DECT pada Emboli Paru: Evaluasi Anatomi Trombus dan Pemetaan Perfusi Paru

Emboli paru merupakan kegawatan kardiopulmoner dengan morbiditas dan mortalitas tinggi, sementara gejala sering tidak spesifik dan emboli dapat terdeteksi insidental pada CT toraks rutin, termasuk pada populasi onkologi (Foti et al., 2020). CTPA konvensional tetap menjadi standar untuk mendeteksi defek pengisian arteri pulmonalis, tetapi fokusnya terutama pada anatomi trombus dan tidak secara langsung memetakan perfusi paru; informasi fungsional sering memerlukan pemeriksaan tambahan (Abdellatif et al., 2020; Hamid et al., 2022). Keterbatasan ini menjadi penting pada opasifikasi suboptimal atau emboli cabang kecil yang tetap berdampak terhadap perfusi (Hamid et al., 2022).

DECT mengintegrasikan evaluasi anatomi dan fungsi dalam satu pemeriksaan. Pada DECT angiografi paru, VMI energi rendah meningkatkan kontras iodine di lumen vaskular sehingga defek pengisian lebih mudah dikenali, terutama pada opasifikasi yang kurang ideal (Hamid et al., 2022). *Systematic review* dan *meta-analysis* menunjukkan bahwa DECT memiliki sensitivitas dan spesifisitas gabungan tinggi dengan performa ROC keseluruhan baik untuk deteksi emboli paru akut, sehingga setara dengan pendekatan standar sambil menambahkan informasi spektral (Abdellatif et al., 2020). Pada CT toraks fase vena, integrasi VMI rendah dan *iodine map* juga meningkatkan sensitivitas dan akurasi deteksi emboli paru tanpa mengorbankan spesifisitas, sehingga membantu meng “rescue” pemeriksaan yang awalnya bukan CTPA murni (Foti et al., 2020).

Melalui *iodine distribution map* atau *pulmonary perfused blood*

volume (PBV), DECT memvisualisasikan distribusi iodine parenkim paru sebagai proksi perfusi dengan algoritma dekomposisi tiga material (jaringan, udara, iodine) (Kosmala et al., 2020). Peta ini memperlihatkan area hipoperfusi distal dari lokasi obstruksi, termasuk pola berbentuk baji yang konsisten dengan infark, dan dapat mendeteksi defek perfusi subsegmental bahkan ketika trombus kecil sulit dilihat pada CTPA (Hamid et al., 2022). PBV juga memungkinkan kuantifikasi beban perfusi pada tingkat paru keseluruhan, meski kualitasnya sangat bergantung pada protokol injeksi kontras dan timing bolus (Kosmala et al., 2020).

Pendekatan kuantitatif lebih lanjut mengaitkan *clot burden* dan gangguan perfusi melalui skor berbasis lobus. CTOI_lobe yang diturunkan dari skor Qanadli dikombinasikan dengan skor perfusi lobar untuk menggambarkan hubungan antara obstruksi anatomi dan penurunan perfusi, menunjukkan bahwa derajat hipoperfusi tidak selalu sebanding dengan derajat obstruksi. Pendekatan *deep learning* untuk segmentasi lobus dan pengukuran *normalized iodine concentration* juga menunjukkan kemampuan diskriminatif yang baik untuk mendeteksi emboli paru dan membedakan emboli oklusif vs non-oklusif pada tingkat pasien (Singh et al., 2020). Dengan demikian, DECT menghadirkan platform integratif yang menghubungkan morfologi trombus dan konsekuensi perfusi paru dalam pengambilan keputusan klinis emboli paru (Abdellatif et al., 2020; Hamid et al., 2022).

DECT pada Gout: Deteksi Deposisi Kristal Urat dan Akurasi Diagnostik

Gout adalah artritis inflamasi akibat deposisi kristal monosodium urate (MSU) intra dan ekstraartikular, dengan insidens dan beban komorbiditas ginjal maupun kardiovaskular yang meningkat (Yu et al., 2018). Standar rujukan diagnosis tetap identifikasi kristal urat dengan *polarized light microscopy* pada cairan sendi, tetapi artrosentesis invasif, tidak selalu dapat dilakukan, dan sensitivitasnya terbatas ketika kristal tidak terambil (Yu et al., 2018; Gamala et al., 2019). Radiografi dan CT konvensional hanya menampilkan densitas jaringan lunak atau kerusakan tulang yang tidak spesifik, sehingga dibutuhkan modalitas pencitraan yang dapat mendeteksi deposisi urat secara spesifik dan non-invasif (Yu et al., 2018).

DECT memanfaatkan perbedaan atenuasi pada dua spektrum energi untuk memisahkan urat dari kalsium dan menghasilkan *color-coded material map* yang menandai voxels dengan karakteristik penyerapan MSU (Christiansen et al., 2020; Ramon et al., 2018). Dalam banyak studi, hasil "DECT positif" didefinisikan sebagai visualisasi kristal urat periartikular dengan warna tertentu pada perangkat lunak, yang dinilai oleh pembaca yang dibutakan terhadap data klinis (Yu et al., 2018; Ramon et al., 2018). *Meta-analysis* oleh Yu dkk melaporkan *pooled sensitivity* sekitar 0,88 dan *pooled specificity* sekitar 0,90 dengan AUC ~0,96, menunjukkan akurasi diagnostik tinggi; analisis Ramon dkk yang membandingkan dengan *polarized light microscopy* melaporkan sensitivitas 0,78-1,00 dan spesifisitas 0,48-1,00, dengan nilai gabungan sekitar 0,90 dan 0,80 (Yu et al., 2018; Ramon et al., 2018).

Keterbatasan utama adalah menurunnya sensitivitas pada gout onset dini; pada penyakit dengan durasi 4-6 minggu, sensitivitas DECT hanya sekitar 0,55 sehingga hasil negatif tidak cukup untuk menyingkirkan gout bila probabilitas klinis tinggi (Gamala et al., 2019). Selain itu, deposisi urat subklinis pada hiperurisemia asimtomatik dan artefak (misalnya di bantalan kuku, kulit, atau akibat *beam hardening*) menuntut interpretasi hati-hati agar tidak terjadi *overdiagnosis* (Gamala et al., 2019; Christiansen et al., 2020; Khanna et al., 2021). Meskipun demikian, DECT menempati peran unik dibanding USG, radiografi, atau MRI karena mampu memvisualisasi kristal urat secara langsung sekaligus menilai jaringan lunak dan kerusakan tulang dalam satu pemeriksaan (Ramon et al., 2018; Khanna et al., 2021; Christiansen et al., 2020).

Studi radiologi menunjukkan bahwa volume total kristal urat pada DECT berkorelasi dengan frekuensi serangan, keberadaan tofi, kadar serum urat, dan kerusakan struktural seperti erosi tulang dan penyempitan celah sendi, dan bahkan berperan sebagai prediktor independen kerusakan struktural (Nhi et al., 2021). Deposisi urat juga dilaporkan di tendon, ligamen, dan vaskular (misalnya aorta dan arteri perifer), meski interpretasinya harus membedakan antara deposisi nyata dan kalsifikasi atau artefak (Barazani et al., 2020). Dengan performa diagnostik tinggi pada gout menetap dan kemampuan kuantifikasi beban kristal, DECT diakui sebagai komponen penting dalam algoritma diagnostik dan pemantauan gout modern (Yu et al., 2018; Gamala et al., 2019; Ramon et al., 2018).

Keterbatasan, Artefak, Aspek Dosis Radiasi, dan Arah Pengembangan DECT dalam Praktik Klinis

Dalam konteks gout, DECT dikembangkan sebagai modalitas non-invasif yang dapat melengkapi atau menggantikan aspirasi sendi pada keadaan tertentu, dengan menandai voxels yang sesuai spektrum penyerapan kristal MSU melalui *color-coded material map* dan dekomposisi urat-kalsium (Ramon et al., 2018; Khanna, 2021; Toprover et al., 2022). Studi deskriptif menunjukkan bahwa DECT dapat mengidentifikasi tofi klinis maupun deposisi urat subklinis di sekitar permukaan kartilago, kapsul, tendon, dan bahkan intravaskular, yang berkorelasi dengan durasi penyakit, beban inflamasi, dan volume total kristal urat sebagai biomarker beban penyakit (Christiansen et al., 2020; Barazani et al., 2020; Nhi et al., 2021).

Untuk meningkatkan konsistensi interpretasi, konsensus OMERACT mengusulkan kriteria morfologi dan lokasi khas deposisi urat, serta cara membedakan sinyal benar dari artefak kulit, kuku, atau gips, yang kemudian digunakan dalam studi observasional dan uji klinis untuk menilai perubahan volume tofi dan lokasi deposisi sebagai respons terapi penurunan urat (Ramon et al., 2018; Toprover et al., 2022). *Systematic review* dan *meta-analysis* melaporkan sensitivitas sekitar 80% dan spesifisitas mendekati 90% untuk diagnosis gout ketika dibandingkan dengan aspirasi sinovial atau kriteria klinis internasional, dan kombinasi DECT dengan data klinis meningkatkan nilai prediktif positif dibanding hanya kriteria klinis (Yu et al., 2018; Ramon et al., 2018).

DECT sangat bermanfaat pada skenario klinis menantang seperti artritis kronik seronegatif dengan

kecurigaan gout, keterlibatan sendi aksial atau lokasi tidak lazim, dan pasien dengan kontraindikasi atau kesulitan aspirasi (Khanna, 2021; Toprover et al., 2022). Volume deposit urat DECT berasosiasi dengan erosi tulang dan kerusakan struktural lain, sehingga pemantauan *crystal burden* dapat melengkapi target *treat-to-target* berbasis kadar serum urat (Nhi et al., 2021; Toprover et al., 2022).

Meski demikian, artefak seperti sinyal palsu di kulit telapak kaki, kuku, atau area *beam hardening* menuntut korelasi ketat antara peta warna dan citra *gray scale* untuk mencegah *false positive*, dan sensitivitas menurun pada gout sangat awal sehingga hasil negatif tidak menyingkirkan gout bila probabilitas klinis tinggi (Yu et al., 2018; Khanna, 2021; Christiansen et al., 2020). Laporan deposisi urat pada vaskular harus diinterpretasi dengan mempertimbangkan kemungkinan kalsifikasi dan artefak (Barazani et al., 2020). Secara keseluruhan, bukti yang ada mendukung DECT sebagai alat yang andal dan relatif aman (dengan protokol dosis yang dapat dioptimalkan) untuk mendeteksi dan mengukur deposisi kristal urat, dengan peran penting dalam diagnostik, klasifikasi, dan pemantauan gout bila digunakan dalam kerangka protokol dan interpretasi terstandar (Ramon et al., 2018; Toprover et al., 2022; Khanna, 2021; Barazani et al., 2020).

KESIMPULAN

Dual-energy CT (DECT) memanfaatkan perbedaan respons energi material terhadap sinar X untuk mengatasi ambiguitas single-energy CT dan mengubah CT dari teknik morfologis semata menjadi alat karakterisasi material yang

kuantitatif. Melalui akuisisi dua spektrum energi, *material decomposition*, dan rekonstruksi spektral seperti *virtual monoenergetic images*, *iodine map*, dan *virtual non-contrast*, satu kali pemindaian dapat menghasilkan berbagai set citra yang menjawab kebutuhan diagnostik berbeda, mulai dari peningkatan kontras vaskular, pemetaan perfusi, hingga simulasi fase tanpa kontras. Tinjauan ini menunjukkan penerapan kerangka tersebut pada tiga konteks utama: pada urolitiasis, DECT memiliki sensitivitas dan spesifisitas tinggi untuk membedakan batu asam urat dari non asam urat dan berpotensi menggantikan analisis batu konvensional sehingga terapi alkalinisasi dapat dimulai lebih dini; pada emboli paru, DECT mengintegrasikan penilaian anatomi trombus melalui CTPA dengan pemetaan perfusi paru berbasis iodine untuk menilai *clot burden* anatomi dan defisit perfusi fungsional dalam satu pemeriksaan; pada gout, DECT memungkinkan pemetaan deposisi kristal monosodium urate secara *in vivo* dengan akurasi diagnostik tinggi serta kuantifikasi beban kristal untuk pemantauan kerusakan struktural dan respons terapi.

Implementasi klinis DECT tetap menuntut pemahaman terhadap keterbatasan, artefak, aspek dosis, dan kebutuhan standarisasi lintas platform. Akurasi karakterisasi batu menurun pada batu sangat kecil atau komposisi campuran kompleks; pemetaan perfusi paru dipengaruhi protokol kontras, penyakit parenkim, dan artefak teknis; sensitivitas deteksi kristal urat berkurang pada gout fase sangat awal, sementara sinyal palsu dapat muncul di kulit, kuku, atau area *beam hardening*. Namun, studi komparatif menunjukkan bahwa

optimasi parameter akuisisi dan pemanfaatan produk DECT seperti VNC untuk mengurangi jumlah fase memungkinkan dosis radiasi total sebanding atau lebih rendah dibanding protokol multipase konvensional. Ke depan, pengembangan *multi material decomposition* yang lebih stabil, integrasi teknologi seperti *photon-counting CT*, dan pemanfaatan algoritma *deep learning* untuk rekonstruksi spektral serta kuantifikasi otomatis diharapkan dapat mengurangi hambatan ini. Dengan demikian, DECT dapat dipandang sebagai platform spektral matang yang, bila diintegrasikan secara terstandar dalam alur kerja radiologi, berpotensi meningkatkan ketepatan diagnosis dan personalisasi tatalaksana pada berbagai kondisi, termasuk batu ginjal, emboli paru, dan gout.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdellatif, W., Ding, J., Jalal, S., Hamet, M., Zia, E., James, F., Nicolaou, S., Erb, S., Sethi, S., Leswick, D., Lin, C., Dennie, C., Mayo, J., Im, J., Atalay, M., Khalil, A., Dennie, C., Lu, M. and Chen, M. (2020) 'Diagnostic accuracy of dual-energy CT in detection of acute pulmonary embolism: A systematic review and meta-analysis', *Canadian Association of Radiologists' Journal*, pp. 1-8. doi:10.1177/0846537120902062.
- Agostini, A., Borgheresi, A., Mari, A., Floridi, C., Bruno, F., Carotti, M., Schicchi, N., Barile, A., Maggi, S. and Giovagnoni, A., (2019). Dual-energy CT: theoretical principles and clinical applications.

- Radiologia Medica*, 124(12), pp.1281-1295.
doi:10.1007/s11547-019-01107-8.
- Barazani, S.H., Chi, W.-W., Pyzik, R., Chang, H., Jacobi, A., O'Donnell, T., Fayad, Z.A., Ali, Y. and Mani, V., (2020). Quantification of uric acid in vasculature of patients with gout using dual-energy computed tomography. *World Journal of Radiology*, 12(8), pp.184-194.
doi:10.4329/wjr.v12.i8.184.
- Christiansen, S.N., Müller, F.C., Østergaard, M., Slot, O., Møller, J.M., Børgesen, H.F., Gosvig, K.K. and Terslev, L., (2020). Dual-energy CT in gout patients: Do all colour-coded lesions actually represent monosodium urate crystals? *Arthritis Research & Therapy*, 22, p.212.
doi:10.1186/s13075-020-02283-z.
- D'Angelo, T., Cicero, G., Mazziotti, S., Ascenti, G., Albrecht, M.H., Martin, S.S., Othman, A.E., Vogl, T.J. and Wichmann, J.L. (2019) 'Dual-Energy Computed Tomography Virtual Monoenergetic Imaging: Technique and Clinical Applications', *BJR* (uncorrected proofs).
doi:10.1259/bjr.20180546.
- Dehlinger, S., Bach, F., Willaume, J., Ohana, J. and Dillenseger, F. (2023) 'Accuracy of iodine quantification in Dual Energy CT: a phantom study across 3 different CT systems'. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1078817423002316>.
- Foti, G., Silva, R., Faccioli, N., Figuera, A., Menghini, R., Campagnola, A. and Carbognin, G., 2021. Identification of pulmonary embolism: diagnostic accuracy of venous-phase dual-energy CT in comparison to pulmonary arteries CT angiography. *European Radiology*, 31(4), pp.1923-1931.
doi:10.1007/s00330-020-07286-7.
- Franken, A. et al. (2018). In vivo differentiation of uric acid versus non-uric acid urinary calculi with third-generation dual-source dual-energy CT at reduced radiation dose. *American Journal of Roentgenology*, 210(2), pp.358-363.
doi:10.2214/AJR.17.18091.
- Gamala, M., Jacobs, J.W.G. and van Laar, J.M. (2019). The diagnostic performance of dual energy CT for diagnosing gout: a systematic literature review and meta-analysis. *Rheumatology (Oxford)*, 58(12), pp.2117-2121.
doi:10.1093/rheumatology/kez180.
- Hamid, S., Nasir, M.U., So, A., Andrews, G., Nicolaou, S. and Qamar, S.R. (2021). Clinical applications of dual-energy CT. *Korean Journal of Radiology*, 22(6), pp.970-982.
doi:10.3348/kjr.2020.0996.
- Kalish, K., Rassouli, N., Dhanantwari, A., Jordan, D. and Rajiah, P. (2018). Noise characteristics of virtual monoenergetic images from a novel detector-based spectral CT scanner. *European Journal of Radiology*, 98, pp.118-125.
- Khanna, I., Pietro, R. and Ali, Y., (2021). What has dual energy CT taught us about gout? *Current Rheumatology Reports*, 23(71), Article 71.

- Kosmala, A., Gruschwitz, P., Veldhoen, S., Weng, A.M., Krauss, B., Bley, T.A. and Petritsch, B. (2020). Dual-energy CT angiography in suspected pulmonary embolism: influence of injection protocols on image quality and perfused blood volume. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*, 36, pp.2051-2059. doi:10.1007/s10554-020-01911-8.
- Liang, H., Zhou, Y., Zheng, Q., Yan, G., Liao, H., Du, S., Zhang, X., Lv, F., Zhang, Z. and Li, Y., (2022). Dual-energy CT with virtual monoenergetic images and iodine maps improves tumor conspicuity in patients with pancreatic ductal adenocarcinoma. *Insights into Imaging*, 13, p.153. doi:10.1186/s13244-022-01297-2.
- Lyu, T., Zhao, W., Zhu, Y., Wu, Z., Zhang, Y., Chen, Y., Luo, L., Li, S. and Xing, L. (2021). Estimating dual-energy CT imaging from single-energy CT data with material decomposition convolutional neural network. *Medical Image Analysis*, 70, p.102001. doi:10.1016/j.media.2021.102001.
- Magee, D., Jeewa, F., Chau, M.V.H.D., Loh, P.L., Ballesta Martinez, B., Saluja, M., Aw, I.H., Lozinskiy, M., Lee, S., Rosenberg, M. and Yuiminaga, Y. (2024). Demonstrating the efficacy of dual energy computer tomography with gemstone spectral imaging software to determine mixed and single composition ex vivo urolithiasis. *Research and Reports in Urology*, 16, pp.215-224. doi:10.2147/RRU.S473167.
- McGrath, T.A., Frank, R.A., Schieda, N., Blew, B., Salameh, J.P., Bossuyt, P.M.M. and McInnes, M.D.F. (2020). Diagnostic accuracy of dual-energy computed tomography (DECT) to differentiate uric acid from non-uric acid calculi: systematic review and meta-analysis. *European Radiology*, 30(5), pp.2791-2801. doi:10.1007/s00330-019-06559-0.
- Mileto, A. et al. (2021). Clinical implementation of dual-energy CT for gastrointestinal imaging. *American Journal of Roentgenology*, 217, pp.651-663.
- Nhi, L.H.H., Minh, L.H.N., Tieu, T.M., Mostafa, E.M., Karimzadeh, S., Dung, N.M., Nam, N.H., Phuoc, L.V. and Huy, N.T. (2021). Role of dual-energy computed tomography in the identification of monosodium urate deposition in gout patients: a comprehensive analysis of 828 joints according to structural joint damage. *Cureus*, 13(11), e19930. doi:10.7759/cureus.19930.
- Pourvaziri, A., Parakh, A., Cao, J., Locascio, J., Eisner, B., Sahani, D. and Kambadakone, A., 2022. Comparison of four dual-energy CT scanner technologies for determining renal stone composition: a phantom approach. *Radiology*, 304(3), pp.580-589. doi:10.1148/radiol.210822.
- Ramon, A., Bohm-Sigrand, A., Pottecher, P., Richette, P., Maillefert, J.-F., Devilliers, H. and Ornetti, P. (2018). Role of dual-energy CT in the diagnosis and follow-up of gout:

- systematic analysis of the literature. *Clinical Rheumatology*. doi:10.1007/s10067-017-3976-z.
- Rudenko, V., Serova, N., Kapanadze, L., Taratkin, M., Okhunov, Z., Leonard, S.P., Ritter, M., Kriegmair, M., Snurnitsyna, O., Kozlov, V., Laukhtina, E., Arshiev, M., Aleksandrova, K., Salomon, G., Enikeev, D. and Glybochko, P. (2020). Dual-energy computed tomography for stone type assessment: A pilot study of DECT with five indices. *Journal of Endourology*. doi:10.1089/end.2020.0243.
- Sauter, A.P., Muenzel, D., Dangelmaier, J., Braren, R., Pfeiffer, F., Rummeny, E.J., Noël, P.B. and Fingerle, A.A., (2018). Dual-layer spectral computed tomography: Virtual non-contrast in comparison to true non-contrast images. *European Journal of Radiology*, 104, pp.108-114. doi:10.1016/j.ejrad.2018.05.007.
- Schmidt, B. and Flohr, T. (2020) 'Principles and applications of dual source CT', *Physica Medica*, 79, pp. 36-46. doi:10.1016/j.ejmp.2020.10.014.
- Singh, R., Nie, R.Z., Homayounieh, F., Schmidt, B., Flohr, T. and Kalra, M.K. (2020). Quantitative lobar pulmonary perfusion assessment on dual-energy CT pulmonary angiography: applications in pulmonary embolism. *European Radiology*. doi:10.1007/s00330-019-06607-9.
- Wang, A.S., Hsieh, S.S. and Pelc, N.J. (2012) 'A Review of Dual Energy CT: Principles, Applications, and Future Outlook', *CT Theory and Applications*, 21(3), pp. 367-386.
- Xu, J.J., Taudorf, M., Ulriksen, P.S., Achiam, M.P., Resch, T.A., Nielsen, M.B., Lönn, L.B. and Hansen, K.L. (2020). Gastrointestinal applications of iodine quantification using dual-energy CT: a systematic review. *Diagnostics*, 10(10), p.814. doi:10.3390/diagnostics10100814.
- Xue, Y., Jiang, Y., Yang, C., Lyu, Q., Wang, J., Luo, C., Zhang, L., Desrosiers, C., Feng, K., Sun, X., Hu, X., Sheng, K. and Niu, T. (2019). Accurate multi-material decomposition in dual-energy CT: A phantom study. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 5(4), pp.515-529. doi:10.1109/TCI.2019.2909192
- Yu, Z., Mao, T., Xu, Y., Li, T., Wang, Y., Gao, F. and Sun, W. (2018). Diagnostic accuracy of dual-energy CT in gout: a systematic review and meta-analysis. *Skeletal Radiology*. doi:10.1007/s00256-018-2948-y.