

GAP TRANSLASI TEKNOLOGI DIGITAL DALAM ORTODONTI: KAJIAN SISTEMATIS TENTANG DAMPAK 3D DIAGNOSTIK, DENTAL MONITORING, DAN ARTIFICIAL INTELLIGENCE TERHADAP HASIL PASIEN

Fransiscus Djaja

Fakultas Kedokteran Gigi, Universitas Medika Suherman

Email korespondensi: furaann@gmail.com

Received: 25 July 2026; Revised: 3 August 2026.; Accepted: 11 August 2026

Abstract

Digital orthodontic technologies are more often evaluated on measurement accuracy or algorithm performance than on patient outcomes. This review assessed the gap between technical validation and patient-outcome evidence for three-dimensional diagnostics, Dental Monitoring (DM), and artificial intelligence (AI). MEDLINE/PubMed was searched for publications from 1 January 2000 to 18 June 2026, with the search performed on 20 July 2026. A single reviewer conducted screening and eligibility assessment using a structured decision log. Risk of bias was evaluated with RoB 2, ROBINS-I, AMSTAR 2, and ROBIS, and findings were synthesized narratively. The search yielded 2,498 unique records. Title and abstract screening excluded 2,383 records. A total of 115 reports were assessed for eligibility, of which 72 were excluded with documented reasons. The synthesis included 43 reports, comprising 25 primary studies and 18 systematic reviews or meta-analyses. Intraoral scanning was generally more comfortable than conventional impressions. DM reduced the number of visits, but evidence on treatment duration and occlusal outcomes was inconsistent. CBCT altered diagnosis or treatment planning in selected cases without clear evidence of superior final outcomes. AI evidence remained centered on task accuracy, analysis time, and agreement with clinicians. Patient benefits are clearest for comfort and reduced visit frequency. Evidence of clinical superiority remains limited, particularly for AI. Reliance on a single database and selection by a single reviewer reduce certainty.

Keywords: digital orthodontics; three-dimensional diagnostics; dental monitoring; artificial intelligence; patient outcomes; PRISMA

Abstrak

Teknologi digital ortodonti lebih sering dinilai dari akurasi pengukuran atau performa algoritme daripada hasil pasien. Tinjauan ini menilai jarak antara validasi teknis dan bukti hasil pasien pada diagnostik tiga dimensi, Dental Monitoring (DM), dan *artificial intelligence* (AI). MEDLINE/PubMed ditelusuri untuk publikasi 1 Januari 2000 sampai 18 Juni 2026, dengan pencarian dijalankan pada 20 Juli 2026. Satu penelaah melakukan screening dan penilaian kelayakan dengan log keputusan terstruktur. Risiko bias dinilai memakai RoB 2, ROBINS-I, AMSTAR 2, dan ROBIS, serta temuan disintesis secara naratif. Pencarian data menghasilkan 2.498 temuan unik. *Screening* judul dan abstrak mengeksklusi 2.383 temuan. Sebanyak 115 laporan dinilai pada tahap kelayakan; 72 dikeluarkan dengan alasan tercatat. Sintesis mencakup 43 laporan, terdiri atas 25 studi primer dan 18 *systematic review* atau *meta-analysis*. Pemindaian intraoral umumnya lebih nyaman daripada impresi konvensional. DM mengurangi kunjungan, tetapi hasil

durasi dan oklusal tidak konsisten. CBCT mengubah diagnosis atau rencana pada kasus terpilih tanpa bukti jelas tentang hasil akhir yang lebih baik. Bukti AI masih berpusat pada akurasi tugas, waktu analisis, dan kesesuaian dengan klinisi. Manfaat bagi pasien paling jelas pada kenyamanan dan pengurangan kunjungan. Bukti superioritas klinis masih terbatas, terutama untuk AI. Pencarian satu basis data dan seleksi oleh satu penelaah menurunkan kepastian.

Kata kunci: ortodonti digital; diagnostik tiga dimensi; dental monitoring; artificial intelligence; hasil pasien; PRISMA

PENDAHULUAN

Rekam ortodonti kini diperoleh, disimpan, dan dianalisis dalam bentuk digital. *Cone-beam computed tomography* (CBCT) menambah informasi anatomi tiga dimensi. Pemindai intraoral menggantikan sebagian impresi berbahan cetak. *Dental Monitoring* (DM) memindahkan sebagian pengawasan ke telepon genggam pasien, sedangkan AI membantu analisis citra dan keputusan. Perubahan alur ini nyata. Manfaat bagi pasien belum selalu ikut berubah.

Diagnostik tiga dimensi mencakup CBCT, model digital, rekonstruksi sefalometri, fusi citra, dan pemindaian intraoral. CBCT dapat memperjelas posisi gigi impaksi dan dugaan resorpsi akar, tetapi menambah paparan radiasi. Scanner menghindarkan pasien dari bahan cetak, meskipun kecepatan dan kualitas scan bergantung pada perangkat serta pengalaman operator. Literatur lama banyak berhenti pada deviasi geometris atau kesesuaian pengukuran. Luaran oklusal, efek samping, biaya, dan kualitas hidup lebih jarang diuji (De Grauwe et al., 2019; Ferreira et al., 2017; Fleming et al., 2011; Rischen et al., 2013).

DM mengolah foto atau scan intraoral yang dikirim berkala. Aplikasi dapat menyarankan pergantian aligner, menandai tracking yang buruk, atau meminta kunjungan klinik. Hasil yang relevan bukan sekadar ketepatan notifikasi. Jumlah kunjungan, lama terapi,

komplikasi, kepatuhan, beban waktu pasien, dan kepuasan perlu dinilai bersamaan (Sangalli et al., 2024; Torres et al., 2023).

AI ortodonti dipakai untuk landmark sefalometri, klasifikasi skeletal, keputusan ekstraksi, triage, segmentasi, dan prediksi. Model sering dibandingkan dengan keputusan pakar pada data retrospektif. Pertanyaan klinisnya sederhana. Apakah angka akurasi tersebut diikuti terapi yang lebih aman, lebih singkat, atau lebih baik bagi pasien?

Kajian ini memakai istilah gap translasi untuk jarak antara performa teknologi pada tugas sempit dan bukti manfaatnya dalam pelayanan. Tujuannya menilai hasil pasien, hasil klinis, dan proses pelayanan pada diagnostik tiga dimensi, DM, serta AI, lalu menetapkan bagian bukti yang masih kosong.

METODE

Desain dan Pelaporan

Kajian sistematis ini disusun menurut PRISMA 2020 dan PRISMA-S. Sintesis naratif mengikuti SWiM. Strategi pencarian diperiksa dengan prinsip PRESS. Protokol tidak didaftarkan sebelum screening, sehingga perubahan keputusan selama kajian tidak dapat diaudit terhadap registrasi prospektif (Campbell et al., 2020; McGowan et al.,

2016; Page et al., 2021; Rethlefsen et al., 2021).

Pertanyaan Penelitian dan PICOS

Pertanyaan kajian adalah apakah diagnostik tiga dimensi, DM, atau AI

memperbaiki hasil klinis, efisiensi perawatan, kepatuhan, pengalaman pasien, durasi, keselamatan, biaya, atau keputusan klinis dibandingkan metode konvensional atau penilaian manusia.

Tabel 1. Komponen PICOS kajian

Unsur	Definisi operasional
Population	Pasien ortodonti atau rekam klinis manusia, tanpa batas usia
Intervention	CBCT atau diagnostik tiga dimensi, pemindaian intraoral, DM atau teleortodonti, dan AI untuk diagnosis atau keputusan klinis
Comparator	Radiografi dua dimensi, impresi konvensional, monitoring tatap muka, penilaian manual atau pakar, atau perawatan standar
Outcomes	Hasil klinis, durasi, kunjungan, refinement, kepatuhan, kepuasan, kenyamanan, kualitas hidup, keselamatan, biaya, dan perubahan keputusan
Study design	RCT, cohort, case-control, studi diagnostik komparatif, systematic review, dan meta-analysis

Sumber Data dan Strategi Pencarian

MEDLINE melalui PubMed menjadi satu-satunya basis data. Pencarian data utama dijalankan pada 20 Juli 2026 dengan batas publikasi 1 Januari 2000 sampai 18 Juli 2026. Hasilnya 2.498 temuan. Sintaks

lengkap tercantum pada Lampiran 1. Filter terpisah untuk *systematic review* menghasilkan 216 temuan, tetapi angka tersebut tidak dipakai sebagai titik awal alur PRISMA.

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Tabel 2. Kriteria inklusi dan eksklusi

Aspek	Inklusi	Eksklusi
Populasi	Pasien ortodonti atau data klinis manusia	Hewan, phantom murni, atau data sintesis tanpa validasi manusia
Teknologi	Diagnostik tiga dimensi, DM, teleortodonti, atau AI untuk diagnosis, monitoring, atau keputusan	Tiga dimensi hanya sebagai alat ukur terapi lain; telekedokteran gigi di luar ortodonti
Luaran	Sekurang-kurangnya satu hasil pasien atau proses klinis	Performa laboratorium murni tanpa hubungan dengan keputusan atau pasien
Desain	Studi primer komparatif atau observasional dan systematic review atau meta-analysis	Editorial, opini, narrative review, scoping review, laporan kasus
Periode	2000 sampai 18 Juli 2026	Terbit sebelum 2000

Seleksi dan Deduplikasi

Seluruh 2.498 PMID dan metadata PubMed diekspor. Karena hanya satu basis data dipakai dan setiap temuan memiliki PMID unik, tidak ada duplikat yang dihapus sebelum screening. Satu

penelaah menilai judul dan abstrak, kemudian memeriksa 115 laporan pada tahap kelayakan. Keputusan serta alasan eksklusi dicatat dalam log terstruktur. Tidak ada laporan yang gagal diperoleh dari tautan PubMed atau DOI. Seleksi

tunggal ini dicatat sebagai keterbatasan metodologis.

Ekstraksi Data

Data yang diambil mencakup desain, sampel, pembandingan, teknologi, lama follow-up, hasil klinis, hasil yang dilaporkan pasien, perubahan keputusan, kunjungan, durasi, serta catatan pendanaan. Satu penelaah melakukan ekstraksi dan mencocokkan judul, DOI, PMID, dan ringkasan hasil dengan temuan PubMed.

Penilaian Kualitas

RoB 2 dipakai untuk uji acak dan ROBINS-I untuk studi nonacak. Systematic review

diperiksa memakai AMSTAR 2 dan ROBIS (Shea et al., 2017; Sterne et al., 2016; Whiting et al., 2016). Karena appraisal dilakukan satu penelaah, hasilnya dipakai untuk menimbang interpretasi, bukan sebagai rating konsensus.

Sintesis Data

Meta-analysis baru tidak dilakukan. Intervensi, pembandingan, definisi luaran, dan waktu follow-up terlalu beragam, sedangkan beberapa review memasukkan studi primer yang sama. Sintesis membedakan performa teknis, perubahan proses atau keputusan, hasil klinis, dan hasil yang dilaporkan pasien.

Tabel 3. Hasil seleksi PubMed

Tahap	Jumlah	Keterangan
Identifikasi	2.498	Temuan PubMed dari pencarian data utama
Deduplikasi	2.498	Tidak ada temuan dihapus sebelum screening
Screening	2.498	Judul dan abstrak dinilai; 2.383 dieksklusi
Eligibility	115	Seluruh laporan diperoleh; 72 dieksklusi dengan alasan
Included	43	25 studi primer dan 18 systematic review atau meta-analysis

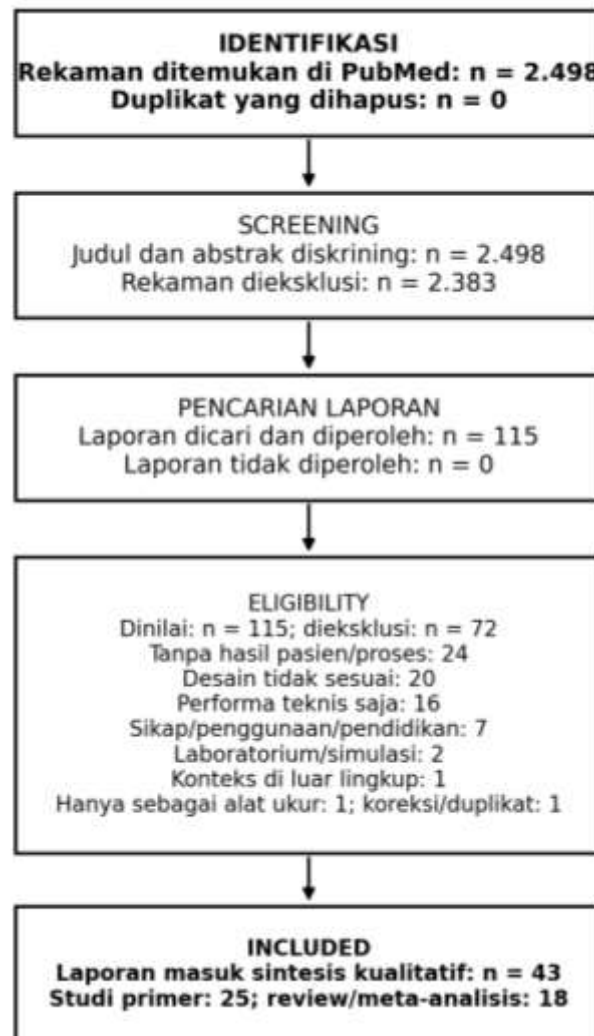
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pencarian dan Seleksi

Pencarian data utama mengidentifikasi 2.498 temuan. Screening judul dan abstrak mengeksklusi 2.383 temuan. Sebanyak 115 laporan masuk ke tahap eligibility dan seluruhnya dapat diperoleh.

Setelah 72 laporan dikeluarkan, 43 laporan dianalisis. Alasan eksklusi paling sering adalah tidak adanya hasil pasien atau proses klinis yang memenuhi kriteria ($n = 24$), desain publikasi yang tidak sesuai ($n = 20$), dan penilaian performa teknis saja ($n = 16$).

Alur Seleksi PRISMA 2020



Gambar 1. Alur seleksi PRISMA 2020 untuk pencarian MEDLINE/PubMed.

Karakteristik Studi Primer

Dua puluh lima studi primer terbit pada 2010 sampai 2026. Sampel berkisar dari 14 sampai 178 peserta pada studi klinis

yang melaporkan ukuran sampel individual; satu cohort retrospektif mencakup 155 pasien. Teknologi dan luaran berbeda tajam. Karena itu, hasil dibaca per domain.

Tabel 4. Karakteristik 25 studi primer

Studi	Desain sampel	dan	Perbandingan	Luaran	Temuan utama	Tautan
Li et al. (2026)	Prospektif nonacak; remaja	78	Paket digital dengan aligner dan DM vs fixed appliance	LII, kunjungan, chair time, kepuasan	Perbaikan LII setara secara klinis; kunjungan 2,46 vs 4,46 dan kepuasan lebih tinggi pada paket digital	DOI

Milosevic et al. (2026)	Crossover RCT; 178 peserta selesai	Triage teleortodonti, AI, dan DM vs tatap muka	Keputusan rujukan dan waktu triage	Akurasi 0,98 pada ambang IOTN ≥ 3 ; tiga rujukan salah ditolak; triage 2,9 kali lebih cepat	DOI
Muhammed et al. (2026)	Komparatif within-patient; 50 pasien	Impresi digital vs konvensional	Kenyamanan, gag reflex, kepuasan, fit aligner	Skor kepuasan dan kenyamanan lebih tinggi pada alur digital	DOI
Martínez Gil-Ortega et al. (2025)	Pilot case-control; 39 anak	DM vs monitoring konvensional	Kunjungan, durasi, refinement, persepsi	Kunjungan lebih sedikit; durasi dan refinement tidak berbeda; 85% menilai scan mudah atau sangat mudah	DOI
Marks et al. (2024)	Komparatif; 51 pasien	DM vs monitoring konvensional	Perubahan indeks PAR	Kedua kelompok membaik; tidak ada perbedaan antar kelompok	DOI
Tüfekçi et al. (2024)	Survei berbasis empat kasus; 70 ortodontis	Visualisasi mahkota saja vs mahkota, akar, dan tulang	Perubahan rencana	Sebanyak 33% sampai 43% penilai mengubah sikap terhadap rencana; tidak ada follow-up pasien	DOI
Serrano-Velasco et al. (2024)	Crossover terkontrol; 51 anak dan remaja	Dua scanner intraoral vs alginat	Kenyamanan VAS	Kenyamanan total lebih baik pada impresi digital	DOI
Snider et al. (2024)	Prospektif; 24 pasien, 232 pemeriksaan	Algoritme DM vs pemeriksaan klinis	Plak, gingivitis, resesi	Sensitivitas rendah dan spesifisitas tinggi; algoritme cenderung tidak mendeteksi kondisi yang ada	DOI
Ferlito et al. (2023)	Prospektif; 30 pasien uji ulang dan 24 pasien akhir terapi	Instruksi GO atau NO-GO DM vs scan intraoral	Konsistensi instruksi dan tracking	Kesesuaian antarscan 83,3%, tetapi lokasi gigi bermasalah tidak pernah sepenuhnya sama	DOI
Lam et al. (2023)	RCT dua lengan; 56 pasien	DM vs monitoring konvensional	Kunjungan, durasi, refinement, pengalaman	DM mengurangi 1,5 kunjungan tetapi memperpanjang terapi 1,9 bulan	DOI
Bosoni et al. (2023)	Crossover RCT; 24 anak	Scanner intraoral vs alginat	Preferensi, waktu, kenyamanan	Sebanyak 75% memilih digital; scan 118 detik lebih cepat dan lebih nyaman	DOI
Sangalli et al. (2022)	Prospektif feasibility; 27 pasien retensi	DM plus kontrol rutin vs kontrol rutin	Fit retainer, kunjungan darurat, relapse	Misfit retainer lebih jarang; sampel kecil dan follow-up singkat	DOI
Thurzo et al. (2021)	Before-after; 86 pasien	Aplikasi coaching sebelum vs sesudah pembaruan algoritme	Interaksi, disiplin, tracking	Interaksi dan kepatuhan membaik; desain tidak memisahkan efek waktu dan pembaruan aplikasi	DOI
Sangalli et al. (2021)	Prospektif terkontrol; 30 pasien	DM bulanan vs perawatan biasa	Plak, gingiva, white spot, karies	Kontrol plak membaik; lima lesi karies pada kontrol dan tidak ada pada DM	DOI
Hansa et al. (2021)	Cohort retrospektif; 90 pasien	Aligner dengan vs tanpa DM	Kunjungan, waktu refinement, tracking	DM mengurangi 3,5 kunjungan dan waktu menuju refinement 1,7 bulan	DOI
Hansa et al. (2020)	Cohort retrospektif; 155 pasien	Aligner dengan vs tanpa DM	Kunjungan, durasi, refinement, kepuasan	Kunjungan turun 23%; durasi tidak berbeda; kepuasan DM 4,25 dari 5	DOI
Sfondrini et al. (2018)	Within-patient; 14 pasien	Scanner intraoral vs impresi alginat	Akurasi, waktu, kenyamanan	Pengukuran sebanding; alur digital lebih singkat dan lebih nyaman	DOI
Burzynski et al. (2018)	Kelompok paralel; 180 pasien	Dua scanner vs alginat	Waktu dan kepuasan	Scanner diterima pasien; efisiensi bergantung pada tipe scanner	DOI

Mangano et al. (2018)	Within-patient berurutan; 30 pasien	Impresi digital alginat	vs	Kenyamanan, penerimaan, stres	Digital lebih diterima dan nyaman; stres tidak berbeda	DOI
Wriedt et al. (2017)	Diagnostik komparatif; 20 pasien, 22 celah alveolar	Rekam CBCT	2D vs	Usulan terapi dan hasil empat tahun	Usulan berubah pada 5% sampai 45%, tetapi ketepatan usulan terhadap hasil aktual tidak membaik	DOI
Burhardt et al. (2016)	Crossover; 38 pasien usia 10 sampai 17 tahun	Dua scanner alginat	vs	Kenyamanan, waktu, preferensi	Digital dipilih 51%; alginat lebih cepat daripada satu jenis scanner	DOI
Alqerban et al. (2014)	Komparatif; 40 pasien, 64 kaninus	Rekam konvensional vs set CBCT	vs	Rencana, komplikasi, keyakinan	Rencana tidak berbeda; keyakinan penilai 96,3% vs 61,9%	DOI
Wriedt et al. (2012)	Crossover diagnostik; 21 pasien, 29 kaninus	Panoramik CBCT	vs	Lokalisasi, resorpsi, usulan terapi	CBCT memperbaiki lokalisasi; usulan terapi sama pada 82% kasus	DOI
Botticelli et al. (2011)	Urutan acak single-blind; 27 pasien, 39 kaninus	Rekam CBCT	2D vs	Diagnosis dan pilihan terapi	Lokalisasi lebih tepat dan rencana berubah; hasil akhir pasien tidak diikuti	DOI
Haney et al. (2010)	Prospektif komparatif; 25 kaninus	Radiografi CBCT	2D vs	Diagnosis, rencana, keyakinan	Rencana berubah pada 27% kasus; tidak ada follow-up terapi	DOI

Dampak Diagnostik Tiga Dimensi

Impresi digital memberi manfaat yang langsung dirasakan pasien. Enam studi komparatif menemukan preferensi atau kenyamanan yang lebih baik daripada bahan cetak, walau kecepatan dipengaruhi tipe *scanner*. Pada RCT kecil Bosoni et al. (2023), 18 dari 24 anak memilih scan digital dan waktu akuisisi lebih singkat 118 detik. Burhardt et al. (2016) memberi catatan yang berguna. Alginat masih lebih cepat daripada salah satu *scanner*, walaupun lebih banyak peserta memilih metode digital.

Untuk CBCT, manfaat paling konsisten terletak pada informasi dan keputusan. Haney et al. (2010) mencatat perubahan rencana pada 27% kaninus impaksi. Studi lain melaporkan lokalisasi yang lebih baik atau keyakinan klinisi yang meningkat, tetapi perubahan rencana tidak selalu terjadi (Alqerban et al., 2014; Botticelli et al., 2011; Wriedt et al., 2012). Hanya satu studi menautkan usulan berbasis dua dimensi atau tiga dimensi dengan hasil

empat tahun. Ketepatan usulan tidak membaik (Wriedt et al., 2017). Informasi tambahan, jadi, belum sama dengan manfaat klinis bersih.

Review terbaru sampai 2026 menguatkan pola itu. CBCT lebih sensitif untuk resorpsi akar dan kaninus impaksi, tetapi pengukuran sefalometri dua dimensi dan tiga dimensi sering sebanding (Haude et al., 2026). Pada anak, penggunaan rutin tidak dibenarkan. CBCT lebih tepat dipertimbangkan ketika radiografi konvensional gagal menjawab pertanyaan klinis dan hasil scan diperkirakan mengubah tata laksana (De Grauwe et al., 2019).

Dampak Dental Monitoring

Jumlah kunjungan adalah hasil yang paling konsisten. Dua *cohort* Hansa et al. mencatat pengurangan 23% atau 3,5 kunjungan. Pilot pada anak dan studi prospektif remaja memberi arah yang sama (Hansa et al., 2020, 2021; Li et al., 2026; Martínez Gil-Ortega et al., 2025). Meta-analysis Torres et al. (2023)

mendapatkan selisih rata-rata 2,75 kunjungan, tetapi kepastian buktinya sangat rendah.

Durasi terapi berbeda cerita. RCT Lam et al. (2023) menemukan 1,5 kunjungan lebih sedikit pada DM, disertai terapi 1,9 bulan lebih lama. Hansa et al. (2020) dan Martínez Gil-Ortega et al. (2025) tidak menemukan perbedaan durasi. Hasil oklusal berdasarkan indeks PAR juga tidak berbeda pada Marks et al. (2024). Klaim bahwa DM mempercepat terapi belum ditopang hasil yang konsisten.

Ada sinyal manfaat pada kebersihan mulut, retensi, dan kepatuhan, tetapi studi kecil dan rentan *confounding*. Sangalli et al. (2021) melaporkan kontrol plak yang lebih baik dan tidak menemukan lesi karies baru pada kelompok DM, sedangkan lima lesi muncul pada kontrol. Studi retensi 27 pasien menemukan lebih sedikit retainer yang tidak pas (Sangalli et al., 2022). Ketelitian algoritme sendiri belum memadai. Snider et al. (2024) menemukan sensitivitas rendah untuk plak, gingivitis, dan resesi; Ferlito et al. (2023) menemukan keputusan tracking yang tidak konsisten antar scan berulang.

Dampak Artificial Intelligence

Bukti AI berdiri pada lapisan yang lebih awal. *Meta-analysis* keputusan ekstraksi melaporkan akurasi gabungan 0,87 pada 2022, sedangkan review 2025 mencatat sensitivitas 70% dan spesifisitas 90% dengan heterogenitas tinggi (Evangelista et al., 2022; Ziaei et al., 2025). Review

perencanaan 2026 menemukan akurasi sering melebihi 80%, namun bias studi umumnya sedang sampai serius dan validasi eksternal jarang (Baxmann et al., 2026).

Landmark otomatis dapat menghemat waktu. *Estimasi error* gabungan untuk citra dua dimensi berada di bawah 2 mm, tetapi banyak studi memiliki risiko bias tinggi pada pemilihan data dan standar acuan (Hendrickx et al., 2024). Tidak ada studi primer yang menguji AI murni terhadap hasil oklusal, resorpsi akar, lama terapi, kejadian tidak diinginkan, atau kualitas hidup. Studi triage Milosevic et al. (2026) paling dekat dengan praktik nyata. Sistem bekerja 2,9 kali lebih cepat dan mencapai akurasi 0,98 untuk keputusan rujukan pada ambang tertentu, tetapi salah menolak tiga pasien dan gagal menilai beberapa ciri maloklusi. Hasil ini cocok untuk bantuan triage, bukan keputusan otonom.

Pola Risiko Bias

Uji *crossover* pada impresi digital memberi bukti *patient-reported outcome* yang paling langsung, walau sampel kecil dan blinding tidak mungkin. Uji DM juga sulit dibuktikan. Studi nonacak mendominasi luaran kunjungan, kepuasan, kebersihan, dan durasi, sehingga seleksi pasien, perubahan protokol klinik, dan operator dapat memengaruhi hasil. Pada review AI, masalah yang berulang ialah data satu pusat, pemisahan data yang tidak jelas, keputusan pakar sebagai standar acuan, dan sedikit validasi eksternal.

Tabel 5. Ringkasan gap translasi

Teknologi	Bukti yang cukup stabil	Bukti hasil pasien	Batas penerapan
Diagnostik tiga dimensi	Scanner nyaman; CBCT menambah informasi pada indikasi terpilih	Kenyamanan didukung studi kecil; hasil klinis akhir jarang	Justifikasi radiasi, biaya, dan efek perubahan rencana belum lengkap

DM	Kunjungan tatap muka dapat berkurang	Kepuasan umumnya baik; durasi dan oklusi tidak konsisten	Banyak studi aligner, satu pusat, dan memakai platform komersial
AI	Akurasi tugas sempit dan waktu analisis	Hampir tidak ada uji prospektif hasil akhir	Validasi eksternal, kalibrasi, fairness, dan audit versi model terbatas

Interpretasi Gap Translasi

Tiga domain berhenti pada tahap berbeda. *Scanner* sudah mencapai pengalaman pasien, tetapi jarang dihubungkan dengan hasil terapi. CBCT mencapai perubahan diagnosis dan rencana, belum hasil akhir. DM mencapai proses pelayanan dan sebagian luaran pasien. AI masih didominasi validasi tugas. Pola ini menjelaskan mengapa promosi teknologi terasa lebih maju daripada bukti klinisnya.

Surrogate endpoint menjadi sumber kekeliruan utama. *Error landmark* yang kecil tidak menjamin rencana yang benar. Rencana yang berubah setelah CBCT tidak otomatis memperbaiki prognosis. Kunjungan yang berkurang juga tidak identik dengan terapi yang lebih singkat. RCT DM memperlihatkan perbedaan tersebut secara langsung.

Biaya, Pelatihan, Regulasi, dan Penerimaan

Biaya lisensi, scanner, penyimpanan data, pelatihan, validasi, dan komunikasi asinkron jarang dihitung. Pengurangan kunjungan dapat menghemat perjalanan pasien, tetapi sebagian pekerjaan berpindah ke rumah. Foto harus diambil dengan benar, notifikasi perlu dibaca, dan klinik tetap harus menanggapi hasilnya. Studi ekonomi dari perspektif pasien dan penyedia nyaris tidak ada.

Klinisi memerlukan keterampilan yang berbeda untuk tiap teknologi. Pada CBCT, fokusnya justifikasi paparan dan temuan insidental. Pada scanner, kualitas akuisisi dan pengelolaan data. Pada DM dan AI,

klinisi perlu memahami ambang, false negative, kalibrasi, perubahan versi perangkat lunak, dan kapan rekomendasi harus ditolak. Izin perangkat medis tidak membuktikan bahwa hasil pasien lebih baik.

Penerimaan pasien cenderung baik untuk pemindaian intraoral dan DM, tetapi tidak seragam. Hansa et al. (2020) melaporkan seperempat responden menilai scan DM sulit atau sangat sulit, dan sebagian tetap menginginkan kunjungan lebih sering. Usia, akses perangkat, koneksi internet, literasi digital, kepercayaan kepada klinisi, dan privasi data dapat mengubah pengalaman.

Kekuatan dan Keterbatasan Kajian

Kajian ini memakai pencarian data yang dapat diulang, mengeksplor seluruh PMID, menyimpan alasan seleksi, dan memisahkan performa teknis dari hasil pasien. Angka PRISMA dapat dijumlahkan dari tahap identifikasi sampai sintesis. Daftar rujukan memberi DOI atau tautan PubMed untuk seluruh 43 laporan.

Batas terbesarnya ialah pencarian hanya pada PubMed. Artikel yang hanya terindeks di Embase, Scopus, atau Web of Science dapat terlewat. Satu penelaah melakukan screening, ekstraksi, dan appraisal; kesalahan klasifikasi tetap mungkin. Review dan studi primer juga tumpang tindih, sehingga 43 laporan bukan 43 kumpulan pasien yang berdiri sendiri. Heterogenitas mencegah meta-analysis baru, sedangkan beberapa teknologi berubah versinya selama periode kajian.

Implikasi bagi Praktik dan Pendidikan

CBCT layak dipilih ketika informasi tiga dimensi diperkirakan mengubah tata laksana dan pertanyaan itu tidak terjawab oleh modalitas berpaparan lebih rendah. Impresi digital dapat dipilih untuk kenyamanan, dengan mempertimbangkan usia pasien, scanner, dan keterampilan operator. DM dapat dipakai untuk mengurangi kunjungan jika klinik menetapkan jadwal review, ambang eskalasi, dan jalur kontak yang jelas. AI tetap alat bantu. Tanggung jawab keputusan berada pada klinisi.

Pendidikan kedokteran gigi perlu mengajarkan cara menilai dataset, bias, validasi eksternal, kalibrasi, privasi, keamanan siber, dan biaya. Mahasiswa juga perlu belajar membedakan empat hal yang sering tercampur, yaitu akurasi teknis, perubahan keputusan, efisiensi pelayanan, dan manfaat bagi pasien.

Agenda Penelitian

Penelitian berikutnya perlu memakai desain prospektif multisenter dan pembandingan perawatan standar. Luaran minimum sebaiknya mencakup hasil oklusal, resorpsi akar, kejadian tidak diinginkan, durasi, kunjungan, patient-reported outcome measures, biaya, serta beban waktu pasien. Studi AI perlu melaporkan validasi eksternal, kalibrasi, performa tiap subkelompok, perubahan keputusan, kegagalan model, dan versi perangkat lunak. Untuk DM, *fixed appliance* dan layanan publik masih kurang terwakili.

PENUTUP

Simpulan

Manfaat yang paling konsisten terdapat pada proses pelayanan dan pengalaman pasien. Pemindaian intraoral biasanya

lebih nyaman. DM dapat mengurangi kunjungan, tetapi durasi terapi dan hasil oklusal tidak konsisten. CBCT mengubah diagnosis atau rencana pada sebagian kasus tanpa bukti kuat tentang hasil akhir yang lebih baik. AI mempercepat tugas tertentu dan dapat mendekati keputusan pakar, namun uji prospektif terhadap hasil pasien hampir tidak tersedia. Pemakaian klinis sebaiknya selektif, diawasi, dan disertai pengukuran hasil pasien. Kepastian kesimpulan ini dibatasi oleh pencarian PubMed saja dan seleksi oleh satu penelaah.

DAFTAR PUSTAKA

- Alqerban A, Willems G, Bernaerts C, Vangastel J, Politis C, Jacobs R. Orthodontic treatment planning for impacted maxillary canines using conventional records versus 3D CBCT. *Eur J Orthod*. 2014;36(6):698-707.
<https://doi.org/10.1093/ejo/cjt100>
- Baxmann M, Zsoldos M, Kárpáti K. AI in orthodontic treatment planning: a systematic review comparing learning approaches. *BMC Oral Health*. 2026;26(1):1677.
<https://doi.org/10.1186/s12903-026-08854-x>
- Bosoni C, Nieri M, Franceschi D, Souki BQ, Franchi L, Giuntini V. Comparison between digital and conventional impression techniques in children on preference, time and comfort: A crossover randomized controlled trial. *Orthod Craniofac Res*. 2023;26(4):585-590.
<https://doi.org/10.1111/ocr.12648>
- Botticelli S, Verna C, Cattaneo PM, Heidmann J, Melsen B. Two- versus three-dimensional imaging in subjects with unerupted maxillary canines. *Eur J Orthod*.

- 2011;33(4):344-9.
<https://doi.org/10.1093/ejo/cjq102>
- Burhardt L, Livas C, Kerdijk W, van der Meer WJ, Ren Y. Treatment comfort, time perception, and preference for conventional and digital impression techniques: A comparative study in young patients. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2016;150(2):261-7.
<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2015.12.027>
- Burzynski JA, Firestone AR, Beck FM, Fields HW, Deguchi T. Comparison of digital intraoral scanners and alginate impressions: Time and patient satisfaction. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2018;153(4):534-541.
<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2017.08.017>
- Campbell M, McKenzie JE, Sowden A, et al. Synthesis without meta-analysis (SWiM) in systematic reviews: reporting guideline. *BMJ*. 2020;368:l6890.
<https://doi.org/10.1136/bmj.l6890>
- Christopoulou I, Kaklamanos EG, Makrygiannakis MA, Bitsanis I, Tsolakis AI. Patient-reported experiences and preferences with intraoral scanners: a systematic review. *Eur J Orthod*. 2022;44(1):56-65.
<https://doi.org/10.1093/ejo/cjab027>
- De Grauwe A, Ayaz I, Shujaat S, Dimitrov S, Gbadegbegnon L, Vande Vannet B, et al.. CBCT in orthodontics: a systematic review on justification of CBCT in a paediatric population prior to orthodontic treatment. *Eur J Orthod*. 2019;41(4):381-389.
<https://doi.org/10.1093/ejo/cjy066>
- Dipalma G, Inchingolo AD, Inchingolo AM, Piras F, Carpentiere V, Garofoli G, et al.. Artificial Intelligence and Its Clinical Applications in Orthodontics: A Systematic Review. *Diagnostics* (Basel). 2023;13(24):3677.
<https://doi.org/10.3390/diagnostics13243677>
- Evangelista K, de Freitas Silva BS, Yamamoto-Silva FP, Valladares-Neto J, Silva MAG, Cevidanes LHS, et al.. Accuracy of artificial intelligence for tooth extraction decision-making in orthodontics: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Investig*. 2022;26(12):6893-6905.
<https://doi.org/10.1007/s00784-022-04742-0>
- Ferlito T, Hsiou D, Hargett K, Herzog C, Bachour P, Katebi N, et al.. Assessment of artificial intelligence-based remote monitoring of clear aligner therapy: A prospective study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2023;164(2):194-200.
<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2022.11.020>
- Haney E, Gansky SA, Lee JS, Johnson E, Maki K, Miller AJ, et al.. Comparative analysis of traditional radiographs and cone-beam computed tomography volumetric images in the diagnosis and treatment planning of maxillary impacted canines. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2010;137(5):590-7.
<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2008.06.035>
- Hansa I, Katyal V, Ferguson DJ, Vaid N. Outcomes of clear aligner treatment with and without Dental Monitoring: A retrospective cohort study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2021;159(4):453-459.
<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2020.02.010>
- Hansa I, Semaan SJ, Vaid NR. Clinical outcomes and patient perspectives of Dental Monitoring® GoLive® with Invisalign®-a retrospective cohort study. *Prog Orthod*. 2020;21(1):16.

<https://doi.org/10.1186/s40510-020-00316-6>

Haude AM, Lehmann T, Hennig CL, Jacobs C. Comparison of conventional two-dimensional and digital three-dimensional imaging in orthodontics : A systematic review and meta-analysis. *J Orofac Orthop.* 2026;87(3):288-305.

<https://doi.org/10.1007/s00056-024-00574-7>

Hendrickx J, Gracea RS, Vanheers M, Winderickx N, Preda F, Shujaat S, et al.. Can artificial intelligence-driven cephalometric analysis replace manual tracing? A systematic review and meta-analysis. *Eur J Orthod.* 2024;46(4):cjae029.

<https://doi.org/10.1093/ejo/cjae029>

Khanagar SB, Al-Ehaideb A, Vishwanathaiah S, Maganur PC, Patil S, Naik S, et al.. Scope and performance of artificial intelligence technology in orthodontic diagnosis, treatment planning, and clinical decision-making - A systematic review. *J Dent Sci.* 2021;16(1):482-492.

<https://doi.org/10.1016/j.jds.2020.05.022>

Lam J, Freer E, Miles P. Comparative assessment of treatment efficiency and patient experience between Dental Monitoring and conventional monitoring of clear aligner therapy: A single-center randomized controlled trial. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2023;163(4):456-464.

<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2022.12.004>

Li J, Gao Y, Xia H, Dybov AM, Dudnik OV. Integration of digital technologies in orthodontic treatment of children and adolescents: a prospective non-randomized comparative study on personalized therapy in the 12-18 age group. *Front Med (Lausanne).* 2026;13:1853221.

<https://doi.org/10.3389/fmed.2026.1853221>

Mangano A, Beretta M, Luongo G, Mangano C, Mangano F. Conventional Vs Digital Impressions: Acceptability, Treatment Comfort and Stress Among Young Orthodontic Patients. *Open Dent J.* 2018;12:118-124.

<https://doi.org/10.2174/1874210601812010118>

Marks J, Freer E, Ong D, Lam J, Miles P. Evaluating Dental Monitoring effectiveness compared with conventional monitoring of clear aligner therapy using the Peer Assessment Rating index. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2024;166(4):350-355.

<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2024.05.014>

Martínez Gil-Ortega A, Cintora-López P, Pérez Rodríguez LM, Viñas MJ, Aragonese JM, Arrieta-Blanco P, et al.. Pilot case control evaluation of artificial intelligence assisted orthodontic monitoring and pediatric patient perception. *Sci Rep.* 2025;15(1):40515.

<https://doi.org/10.1038/s41598-025-24395-9>

McGowan J, Sampson M, Salzwedel DM, Cogo E, Foerster V, Lefebvre C. PRESS peer review of electronic search strategies: 2015 guideline statement. *J Clin Epidemiol.* 2016;75:40-46.

<https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2016.01.021>

Milosevic M, Sangha T, Dalci K, Kayalar E, Ajwani S, Darendeliler MA, et al.. The use of teleorthodontics and artificial intelligence for orthodontic triage and screening in a publicly funded healthcare system: A crossover randomized controlled trial. *Eur J Orthod.* 2026;48(4):cjag050.

<https://doi.org/10.1093/ejo/cjag050>

- Mohammed Alassiry A. Clinical aspects of digital three-dimensional intraoral scanning in orthodontics - A systematic review. *Saudi Dent J.* 2023;35(5):437-442.
<https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2023.04.004>
- Muhammed A, Ambooken B, Harikrishnan R, Theadore L, Kumar B M, Tiwari R. Patient Satisfaction With Digital Versus Conventional Impression Techniques in Clear Aligner Therapy: A Questionnaire-Based Comparative Study. *Cureus.* 2026;18(4):e107027.
<https://doi.org/10.7759/cureus.107027>
- Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ.* 2021;372:n71.
<https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Ramos-Morro OD, Mareque-Ameijeiras S, Giovannini G, Paz-Cortés MM, Serrano-Velasco D, Aragonese JM, et al.. Evaluation of the patient's perception, reliability and reproducibility, and chairside time with intraoral scanners in adult population-a systematic review. *Front Oral Health.* 2026;7:1733387.
<https://doi.org/10.3389/froh.2026.1733387>
- Rethlefsen ML, Kirtley S, Waffenschmidt S, et al. PRISMA-S: an extension to the PRISMA statement for reporting literature searches in systematic reviews. *Syst Rev.* 2021;10:39.
<https://doi.org/10.1186/s13643-020-01542-z>
- Rischen RJ, Breuning KH, Bronkhorst EM, Kuijpers-Jagtman AM. Records needed for orthodontic diagnosis and treatment planning: a systematic review. *PLoS One.* 2013;8(11):e74186.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0074186>
- Rouanet F, Masucci C, Khorn B, Oueiss A, Dridi SM, Charavet C. [Relevance of teleorthodontic tools: a systematic review of the literature]. *Orthod Fr.* 2022;93(4):353-375.
<https://doi.org/10.1684/orthodfr.2022.104>
- Saccomanno S, Quinzi V, Albani A, D'Andrea N, Marzo G, Macchiarelli G. Utility of Teleorthodontics in Orthodontic Emergencies during the COVID-19 Pandemic: A Systematic Review. *Healthcare (Basel).* 2022;10(6):1108.
<https://doi.org/10.3390/healthcare10061108>
- Sangalli L, Alessandri-Bonetti A, Dalessandri D. Effectiveness of dental monitoring system in orthodontics: A systematic review. *J Orthod.* 2024;51(1):28-40.
<https://doi.org/10.1177/14653125231178040>
- Sangalli L, Savoldi F, Dalessandri D, Visconti L, Massetti F, Bonetti S. Remote digital monitoring during the retention phase of orthodontic treatment: A prospective feasibility study. *Korean J Orthod.* 2022;52(2):123-130.
<https://doi.org/10.4041/kjod.2022.52.2.123>
- Sangalli L, Savoldi F, Dalessandri D, Bonetti S, Gu M, Signoroni A, et al.. Effects of remote digital monitoring on oral hygiene of orthodontic patients: a prospective study. *BMC Oral Health.* 2021;21(1):435.
<https://doi.org/10.1186/s12903-021-01793-9>
- Serrano-Velasco D, Martín-Vacas A, Cintora-López P, Paz-Cortés MM, Aragonese JM. Comparative Analysis of the Comfort of Children and Adolescents in Digital and Conventional Full-Arch Impression Methods: A Crossover Randomized Trial. *Children (Basel).*

2024;11(2):190.

<https://doi.org/10.3390/children11020190>

Serrano-Velasco D, Martín-Vacas A, Paz-Cortés MM, Giovannini G, Cintora-López P, Aragonese JM. Intraoral scanners in children: evaluation of the patient perception, reliability and reproducibility, and chairside time-A systematic review. *Front Pediatr*. 2023;11:1213072.

<https://doi.org/10.3389/fped.2023.1213072>

Sfondrini MF, Gandini P, Malfatto M, Di Corato F, Trovati F, Scribante A. Computerized Casts for Orthodontic Purpose Using Powder-Free Intraoral Scanners: Accuracy, Execution Time, and Patient Feedback. *Biomed Res Int*. 2018;2018:4103232. <https://doi.org/10.1155/2018/4103232>

Shea BJ, Reeves BC, Wells G, et al. AMSTAR 2: a critical appraisal tool for systematic reviews that include randomised or non-randomised studies of healthcare interventions, or both. *BMJ*. 2017;358:j4008. <https://doi.org/10.1136/bmj.j4008>

Snider V, Homsy K, Kusnoto B, Atsawasuwan P, Viana G, Allareddy V, et al.. Clinical evaluation of Artificial Intelligence Driven Remote Monitoring technology for assessment of patient oral hygiene during orthodontic treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2024;165(5):586-592. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2023.12.008>

Sterne JAC, Hernán MA, Reeves BC, et al. ROBINS-I: a tool for assessing risk of bias in non-randomised studies of interventions. *BMJ*. 2016;355:i4919. <https://doi.org/10.1136/bmj.i4919>

Thurzo A, Kurilová V, Varga I. Artificial Intelligence in Orthodontic Smart Application for Treatment Coaching

and Its Impact on Clinical Performance of Patients Monitored with AI-TeleHealth System. *Healthcare (Basel)*. 2021;9(12):1695. <https://doi.org/10.3390/healthcare9121695>

Torres DKB, Santos M CCD, Normando D. Is teledentistry effective to monitor the evolution of orthodontic treatment? A systematic review and meta-analysis. *Dental Press J Orthod*. 2023;28(4):e2322195. <https://doi.org/10.1590/2177-6709.28.4.e2322195.oar>

Tüfekçi E, Carrico CK, Gordon CB, Lindauer SJ. Does crown, root, and bone visualization in a clear aligner virtual setup impact treatment decisions? *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2024;165(6):671-679. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2024.01.014>

Wafaie K, Rizk MZ, Basyouni ME, Daniel B, Mohammed H. Tele-orthodontics and sensor-based technologies: a systematic review of interventions that monitor and improve compliance of orthodontic patients. *Eur J Orthod*. 2023;45(4):450-461. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjad004>

Whiting P, Savovic J, Higgins JPT, et al. ROBIS: a new tool to assess risk of bias in systematic reviews. *J Clin Epidemiol*. 2016;69:225-234. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2015.06.005>

Wriedt S, Al-Nawas B, Schmidtman I, Eletr S, Wehrbein H, Moergel M, et al.. Analyzing the teeth next to the alveolar cleft: Examination and treatment proposal prior to bone grafting based on three-dimensional versus two-dimensional diagnosis-A diagnostic study. *J Craniomaxillofac Surg*. 2017;45(8):1272-1277. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2017.05.024>

Wriedt S, Jaklin J, Al-Nawas B, Wehrbein H. Impacted upper canines: examination and treatment proposal based on 3D versus 2D diagnosis. J Orofac Orthop. 2012;73(1):28-40. <https://doi.org/10.1007/s00056-011-0058-8>

Ziaei S, Samani D, Behjati M, Ravari AO, Salimi Y, Ahmadi S, et al.. Accuracy of artificial intelligence in orthodontic extraction treatment planning: a systematic review and meta analysis. BMC Oral Health. 2025;25(1):1576. <https://doi.org/10.1186/s12903-025-06880-9>