

ENGINEERING REASONING GAPS: MODEL KONSEPTUAL DAN TAKSONOMI PADA PEMBELAJARAN CAD 3D

Muhammad Hudan Rahmat*, Sukardi, Agung Samudra, Harie Satiyadi Jaya, Rengga Dwiva, Joe Sri Simorangkir

Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Palangka Raya

E-mail Corresponding Author: hudanrahmat@fkip.upr.ac.id

Abstrak: Pembelajaran CAD 3D tidak hanya menuntut penguasaan prosedur perangkat lunak, tetapi juga penalaran rekayasa dalam memahami geometri, menentukan hubungan antarkomponen, dan memvalidasi hasil pemodelan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola penalaran mahasiswa dalam menyelesaikan tugas perakitan CAD 3D, mengembangkan model konseptual mengenai lintasan penalaran yang muncul selama pengerjaan, serta mengidentifikasi kesenjangan penalaran yang mendasari proses tersebut. Penelitian menggunakan pendekatan kualitatif dengan desain *multiple-case study* yang melibatkan lima mahasiswa Pendidikan Teknik Mesin Universitas Palangka Raya. Data diperoleh melalui observasi berbasis tugas, rekaman layar, dan wawancara retrospektif, kemudian dianalisis menggunakan analisis tematik dengan bantuan NVivo. Hasil penelitian menunjukkan tiga lintasan penalaran, yaitu Jalur Hambatan Kognitif, Jalur Pragmatis-Kolaboratif, dan Jalur Analitis-Mandiri. Analisis lintas kasus juga mengidentifikasi empat kategori kesenjangan penalaran, yaitu kesenjangan pengetahuan manufaktur, penalaran inferensial, interaksi prosedural CAD, dan visualisasi spasial, dengan atribusi kesalahan sebagai dimensi metakognitif yang melintasi keempat kategori tersebut. Berdasarkan temuan tersebut, penelitian mengembangkan model konseptual eksploratif yang menggambarkan hubungan dinamis antara tuntutan tugas, strategi penyelesaian, dan proses verifikasi selama pemodelan CAD 3D. Temuan ini memberikan dasar untuk merancang pembelajaran CAD yang tidak hanya berorientasi pada penguasaan fitur, tetapi juga pada pengembangan penalaran rekayasa.

Kata Kunci: penalaran rekayasa; kesenjangan penalaran; pembelajaran CAD 3D; pendidikan teknik; studi kasus kualitatif

Abstract: 3D CAD learning requires not only mastery of software procedures but also engineering reasoning to understand geometry, determine component relationships, and validate modeling outcomes. This study aimed to identify patterns of students' reasoning when completing a 3D CAD assembly task, develop an exploratory conceptual model of the reasoning trajectories that emerged during task completion, and identify reasoning gaps underlying the observed processes. A qualitative multiple-case study was conducted with five Mechanical Engineering Education students at Universitas Palangka Raya. Data were collected through task-based observation, screen recordings, and retrospective interviews, and were analyzed using thematic analysis with the assistance of NVivo. The findings revealed three reasoning trajectories: the Cognitive Obstacle Path, Pragmatic-Collaborative Path, and Analytical-Independent Path. Cross-case analysis further identified four categories of reasoning gaps: manufacturing knowledge, inferential reasoning, CAD procedural interaction, and spatial visualization, with error attribution identified as a cross-cutting metacognitive dimension. Based on these findings, an exploratory conceptual model was developed to describe the dynamic relationship among task demands, problem-solving strategies, and verification processes during 3D CAD modeling. The findings provide a basis for designing CAD learning that extends beyond software feature mastery toward the development of engineering reasoning.

Keywords: engineering reasoning; reasoning gaps; 3D CAD learning; engineering education; qualitative case study

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi digital telah memperluas penggunaan *Computer-Aided Design* (CAD) dalam pendidikan teknik. Dalam konteks Pendidikan Teknik Mesin, penggunaan CAD tidak hanya menuntut mahasiswa menghasilkan bentuk geometris, tetapi juga menuntut kemampuan menafsirkan gambar teknik, memahami hubungan antarbagian, memvisualisasikan struktur tiga dimensi (3D), serta menghubungkan representasi digital dengan fungsi komponen dan kebutuhan desain. Peralihan dari representasi dua dimensi (2D) ke lingkungan 3D interaktif menyediakan informasi visual yang lebih kaya, tetapi tidak dengan sendirinya menjamin terbentuknya pemahaman spasial dan fungsional yang memadai. Mahasiswa tetap perlu mengintegrasikan

informasi visual, pengetahuan teknis, dan prosedur penggunaan perangkat lunak ketika menyelesaikan tugas perakitan. Kadam et al. (2024) menunjukkan bahwa pemecahan masalah pada *engineering drawing* merupakan proses yang memerlukan integrasi pengetahuan dan kemampuan spasial. Melalui kajian kualitatif terhadap pengalaman pembelajar dan pengajar, penelitian tersebut mengidentifikasi bahwa kesulitan mahasiswa terutama berkaitan dengan keterbatasan pengetahuan dan kesulitan dalam menjalankan tugas kognitif tingkat tinggi. Temuan ini menunjukkan bahwa kesulitan pada representasi teknik tidak semata-mata berkaitan dengan kemampuan menghasilkan gambar, tetapi juga dengan pengetahuan dan proses penalaran yang digunakan untuk memahami dan menyelesaikan masalah.

Aspek spasial menjadi semakin penting ketika mahasiswa berpindah dari gambar teknik menuju lingkungan digital 3D. Tinjauan sistematis Chacón (2025) menunjukkan adanya hubungan timbal balik antara *technical drawing* dan kemampuan spasial serta kaitan kemampuan tersebut dengan kesiapan mahasiswa untuk bidang teknik, desain, dan manufaktur digital. Temuan tersebut memperkuat posisi kemampuan visualisasi spasial sebagai bagian penting dalam pembelajaran representasi teknik, tetapi belum menjelaskan secara rinci bagaimana kemampuan tersebut digunakan ketika mahasiswa harus mengambil keputusan selama pengerjaan tugas CAD. Penelitian Abdo et al. (2024) juga menunjukkan pentingnya mengamati proses penggunaan representasi 3D dalam pemecahan masalah. Melalui wawancara *think-aloud*, penelitian tersebut mengeksplorasi bagaimana mahasiswa menggunakan model 3D ketika menyelesaikan persoalan yang memerlukan penalaran spasial. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan model dan proses visualisasi dapat memberikan informasi mengenai cara mahasiswa membangun dan memanfaatkan representasi spasial selama pemecahan masalah, sehingga proses yang terjadi selama pengerjaan menjadi penting untuk dipahami, bukan hanya hasil akhirnya.

Selain persoalan representasi, proses pengerjaan CAD juga melibatkan tuntutan ketika mahasiswa harus memahami objek sekaligus mengoperasikan fitur perangkat lunak. Dalam perspektif *Cognitive Load Theory* (CLT), keterbatasan kapasitas pemrosesan dan karakteristik tugas dapat membantu menjelaskan mengapa interaksi dengan lingkungan belajar yang kompleks dapat menambah tuntutan kognitif. Namun, Duran et al. (2022) menunjukkan bahwa penelitian pendidikan komputasi sering kali hanya menggunakan CLT sebagai rujukan umum dan relatif sedikit penelitian yang menggunakan pengukuran *cognitive load* secara memadai. Mereka merekomendasikan agar penggunaan CLT dijelaskan secara lebih spesifik dan dibedakan dari pengukuran beban kognitif itu sendiri. Oleh karena itu, dalam penelitian ini CLT digunakan sebagai lensa interpretatif untuk memahami tuntutan pemrosesan yang mungkin muncul ketika mahasiswa menavigasi model 3D dan mengoperasikan fitur CAD, bukan sebagai instrumen untuk mengukur *cognitive load* secara langsung.

Perspektif *mental model* juga relevan untuk memahami bagaimana mahasiswa membangun representasi internal mengenai struktur dan fungsi objek teknis (Johnson-Laird, 1983). Sementara itu, penelitian Hsing et al. (2023) menunjukkan bahwa jenis dan tingkat kesulitan tugas spasial dapat memengaruhi proses kognitif dan strategi yang digunakan mahasiswa teknik; penelitian tersebut menemukan perbedaan pola proses *encoding*, transformasi, dan konfirmasi pada tugas spasial dengan karakteristik berbeda. Temuan ini memperlihatkan bahwa variasi proses ketika mahasiswa berhadapan dengan representasi spasial tidak selalu dapat dijelaskan hanya berdasarkan benar atau salahnya jawaban akhir. Kajian terbaru dalam pendidikan CAD juga menunjukkan bahwa penguasaan prosedur perangkat lunak tidak dengan sendirinya menjamin terbentuknya penalaran rekayasa strategis. Liu et al. (2026), melalui studi kasus reflektif jangka panjang dalam pendidikan CAD, mengidentifikasi adanya kesenjangan antara pelatihan prosedural perangkat lunak CAD dan *strategic engineering reasoning* yang dibutuhkan dalam praktik. Temuan tersebut menekankan pentingnya transfer pengetahuan dari prosedur yang dipelajari menuju strategi yang dapat digunakan pada situasi desain yang lebih autentik.

Meskipun penelitian terdahulu telah membahas kesulitan *engineering drawing*, kemampuan spasial (Akkuş & Arslan, 2022; Benedicic et al., 2023; Seabra & Santos, 2013), penggunaan model 3D, dan proses pemecahan masalah (Brown et al., 2024; Hu et al., 2024), masih terbatas pemahaman mengenai bagaimana mahasiswa mengintegrasikan pengetahuan manufaktur, penalaran inferensial, prosedur CAD, dan visualisasi spasial secara bersamaan selama menyelesaikan tugas assembly. Dengan demikian, kesenjangan penelitian tidak hanya terletak pada belum

teridentifikasi jenis kesulitan, tetapi juga pada belum jelasnya bagaimana kesenjangan tersebut muncul dalam proses pengerjaan, bagaimana mahasiswa merespons kesalahan yang terjadi, serta bagaimana variasi proses tersebut membentuk pola penalaran yang berbeda. Penelitian berbasis proses menjadi penting karena beberapa penelitian menunjukkan bahwa aktivitas visual dan strategi yang digunakan selama pemecahan masalah dapat memberikan informasi yang tidak terlihat dari hasil akhir saja (Abdo et al., 2024; Hsing et al., 2023).

Berdasarkan gap tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengidentifikasi pola penalaran mahasiswa ketika menginterpretasikan dan merakit model gambar teknik digital; (2) mengembangkan model konseptual eksploratif mengenai jalur penalaran mahasiswa selama penyelesaian tugas CAD, dan (3) mengidentifikasi kesenjangan pengetahuan, penalaran, prosedural, dan spasial yang muncul selama proses tersebut. Penelitian ini juga memperhatikan bagaimana mahasiswa menjelaskan dan merespons kesalahan sebagai bagian dari proses regulasi selama pengerjaan. Kebaruan penelitian terletak pada pengorganisasian temuan proses tersebut ke dalam sintesis konseptual yang menghubungkan jenis kesenjangan dengan variasi jalur penalaran mahasiswa selama tugas CAD. Taksonomi yang dihasilkan tidak dimaksudkan untuk menggantikan CLT, *mental model*, atau konsep *engineering reasoning*, melainkan merupakan sintesis empiris yang menggunakan perspektif tersebut sebagai lensa interpretatif. Dengan demikian, kontribusi penelitian ini adalah menyediakan kerangka diagnostik awal untuk memahami variasi proses penalaran mahasiswa dalam pembelajaran CAD dan menjadi dasar bagi penelitian lanjutan untuk menguji kerangka tersebut pada konteks yang lebih luas.

METODE

Desain Penelitian

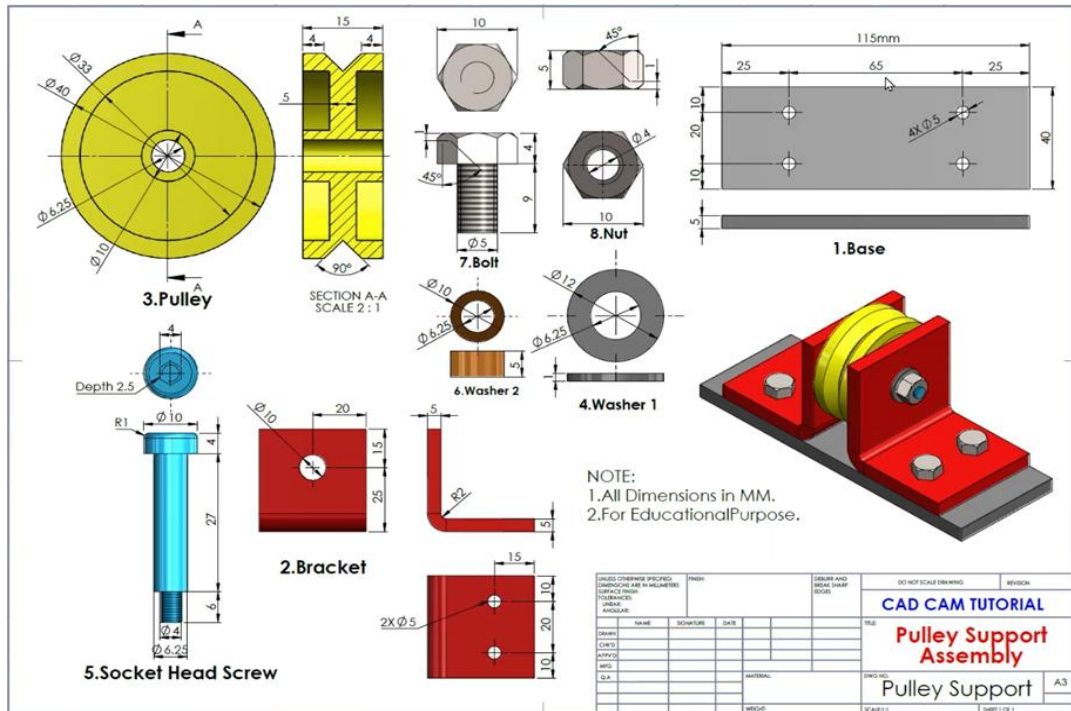
Penelitian ini menggunakan desain *multiple-case study* kualitatif eksploratoris. Setiap mahasiswa diperlakukan sebagai satu kasus yang dibatasi oleh satu konteks pembelajaran dan satu tugas assembly CAD. Desain ini dipilih untuk memungkinkan analisis mendalam pada tingkat individu sekaligus membandingkan pola antarindividu. Penelitian mengadopsi observasi berbasis tugas yang memungkinkan aktivitas penyelesaian masalah diamati dalam konteks alami, kemudian diperdalam melalui wawancara retrospektif berbasis rekaman visual (Mirabelli et al., 2023). Model konseptual dalam penelitian ini diperlakukan sebagai sintesis konseptual eksploratif yang diturunkan dari pola empiris lintas kasus, bukan sebagai adaptasi langsung dari satu model terdahulu.

Partisipan

Partisipan penelitian terdiri atas lima mahasiswa Program Studi Pendidikan Teknik Mesin Universitas Palangka Raya yang mengikuti pembelajaran CAD pada semester penelitian. Kriteria partisipan meliputi: (1) terdaftar pada kelas CAD berbasis SolidWorks, (2) mengikuti rangkaian pembelajaran hingga pelaksanaan tugas assembly, dan (3) bersedia mengikuti seluruh proses pengumpulan data yang meliputi observasi berbasis tugas, perekaman layar, dan wawancara retrospektif. Pemilihan partisipan dilakukan secara purposive berdasarkan keterlibatan penuh dalam konteks pembelajaran. Variasi karakteristik penalaran rekayasa tidak ditentukan sejak awal berdasarkan kategori kemampuan akademik tinggi, sedang, atau rendah, tetapi diidentifikasi secara induktif melalui pola tindakan, strategi penyelesaian masalah, respons terhadap kesulitan, dan penjelasan verbal yang muncul selama penyelesaian tugas.

Instrumen

Instrumen utama penelitian adalah peneliti sebagai instrumen kunci, didukung perangkat lunak perekam layar dan perekam audio. Partisipan menyelesaikan satu tugas assembly sistem pulley berdasarkan jobsheet yang memuat gambar kerja dan informasi geometrik yang relevan. Task dipilih karena menuntut interpretasi representasi 2D, pembentukan representasi 3D, pemilihan Mate/Constraint, pemahaman hubungan fungsional antarkomponen, serta validasi hasil assembly. Detail jobsheet atau gambar kerja yang digunakan sebagai stimulus ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Gambar kerja (*jobsheet*) perakitan *pulley*
(Sumber: CAD CAM TUTORIAL, 2024)

Prosedur Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilaksanakan melalui tiga tahapan sistematis. Pertama, tahap kalibrasi, di mana partisipan dibiasakan dengan lingkungan perangkat lunak dan instruksi tugas. Kedua, tahap eksekusi tugas (observasi), di mana aktivitas layar partisipan direkam secara utuh dan peneliti bertindak sebagai pengamat pasif. Ketiga, tahap wawancara retrospektif berbantuan isyarat. Segera setelah tugas selesai, rekaman layar diputar ulang bersama partisipan. Momen kritis ditetapkan berdasarkan jeda berkepanjangan, pengulangan perintah, penggunaan Undo, perubahan strategi, kesalahan penempatan komponen, dan ekspresi ketidakpastian. Setiap episode diperdalam dengan pertanyaan mengenai tindakan yang sedang dilakukan, hasil yang diharapkan, alasan pemilihan tindakan, dan evaluasi terhadap hasil yang muncul. Pendekatan seperti ini identik dengan task-based verbal protocols untuk mengkaji proses visualisasi spasial (Abdo et al., 2024).

Sumber Data

Data penelitian terdiri atas dua sumber utama, yaitu data visual berupa rekaman layar selama penyelesaian tugas dan data verbal berupa transkrip wawancara retrospektif. Data visual digunakan untuk mengidentifikasi urutan tindakan, pemilihan fitur CAD, kesalahan prosedural, perubahan strategi, pemeriksaan geometri, dan validasi hasil. Data verbal digunakan untuk menjelaskan tujuan, pertimbangan, persepsi kesulitan, atribusi kesalahan, dan strategi penyelesaian yang tidak dapat disimpulkan hanya dari perilaku visual. Kedua sumber dipadukan pada tingkat episode agar interpretasi memiliki dasar perilaku dan penjelasan verbal.

Analisis Data

Analisis data dilakukan secara tematik (Braun & Clarke, 2019) dengan bantuan NVivo 15 melalui enam tahap: (1) familiarisasi terhadap rekaman dan transkrip; (2) identifikasi episode bermakna sebagai unit analisis; (3) pengodean awal terhadap tindakan, pernyataan, respons terhadap masalah, dan perubahan strategi; (4) pengelompokan kode menjadi kode terfokus berdasarkan kedekatan makna; (5) pengembangan tema pada tingkat kasus; dan (6) perbandingan lintas kasus untuk mensintesis kategori akhir dan jalur penalaran. Unit analisis ditetapkan sebagai episode yang memiliki makna analitik, bukan setiap klik atau setiap kalimat. Konstruk CLT digunakan sebagai lensa interpretatif untuk memahami tuntutan pemrosesan yang mungkin muncul dari interaksi tugas dan perangkat lunak, bukan sebagai ukuran langsung tingkat cognitive load.

NVivo 15 digunakan untuk mengorganisasi transkrip, menautkan data verbal dengan episode visual, menyusun kode, mengelompokkan kode yang berdekatan secara makna, dan membandingkan pola lintas kasus. Kategori akhir tidak ditentukan semata-mata dari konstruk teori, tetapi dibentuk melalui sintesis pola empiris lintas kasus. Dalam rekonstruksi pengodean berdasarkan data penelitian yang tersedia, kode-kode yang berkaitan dengan kesulitan Mate/Constraint, ulir dan manufaktur, clearance dan fungsi, serta transformasi 2D–3D menjadi dasar pembentukan tema dan kategori sebagaimana diringkas pada Tabel 1.

Tabel 1. Proses Pengodean dan Pembentukan Kategori Penalaran Rekayasa

Partisipan	Data Empiris	Kode Awal	Kode Terfokus	Kategori
A	Bracket–Base di-Mate, kemudian <i>Undo</i> dan diulang beberapa kali	Mate gagal; Undo berulang; pemilihan constraint	Trial-and-error constraint	Interaksi Prosedural CAD
	Washer dan mur menjadi bagian yang sulit; mencari bantuan teman	kesulitan pemasangan; bantuan rekan	penyelesaian prosedural dengan bantuan	Interaksi Prosedural CAD
	Pin dianggap “kunci”; terlalu sesak membuat roda sulit berputar	pin kritis; toleransi; putaran	hubungan geometri–fungsi	Penalaran Inferensial
B	Baut tidak masuk; bracket tenggelam; washer salah klik dan diulang	baut gagal; salah klik; pengulangan	troubleshooting sambungan	Interaksi Prosedural CAD
	Ragu memilih ukuran snai untuk diameter 5 mm	ketidakpastian alat; ukuran ulir	ketidakpastian pengetahuan ulir	Pengetahuan Manufaktur
	Pulley nempel ke bracket tetapi masih dapat diputar	kontak komponen; gerak	verifikasi fungsi terbatas	Penalaran Inferensial
C	Sulit mencari titik tengah pulley	sulit menemukan center	kesulitan penempatan geometrik	Interaksi Prosedural CAD
	Bracket sulit dibalik dan strategi diganti dengan menghubungkan lubang berlawanan	orientasi; strategi alternatif	kompensasi spasial	Visualisasi Spasial
	Memeriksa jarak pulley–bracket 15 mm dan mempertanyakan clearance	ukur jarak; clearance	evaluasi geometri–fungsi	Penalaran Inferensial
	Membuka Section View untuk memeriksa geometri internal	Section View; geometri internal	verifikasi representasi	Visualisasi Spasial
D	Drag manual di awal, kemudian beralih ke Mate setelah memahami fitur	drag manual; belajar fitur	transisi ke prosedur CAD	Interaksi Prosedural CAD
	Lupa alat dan cara membuat ulir diameter 5 mm	lupa alat; lupa prosedur	ketidakpastian proses manufaktur	Pengetahuan Manufaktur
E	Salah klik titik Mate; assembly hancur; diulang berkali-kali	salah referensi; pengulangan; assembly gagal	trial-and-error pemilihan referensi	Interaksi Prosedural CAD
	Memahami ukuran gambar tetapi sulit mengeksekusikannya di SolidWorks	membaca gambar; sulit eksekusi	kesenjangan representasi–eksekusi	Interaksi Prosedural CAD
	Kurang memahami bentuk 3D pulley tanpa model 3D	kebingungan 2D–3D	kesulitan transformasi representasi	Visualisasi Spasial

Berdasarkan pengkodean awal, empat kategori utama dipertahankan sebagai struktur taksonomi: pengetahuan manufaktur, penalaran inferensial, interaksi prosedural CAD, dan visualisasi spasial. Sedangkan atribusi kesalahan ditempatkan sebagai dimensi metakognitif lintas kategori.

Keabsahan dan Kecukupan Data

Untuk menjaga keabsahan interpretasi, penelitian menghubungkan data visual dan verbal pada tingkat episode. Wawancara retrospektif digunakan untuk mengklarifikasi tujuan, ekspektasi, alasan pemilihan tindakan, dan evaluasi partisipan terhadap hasil yang muncul dalam rekaman

layar. Transkripsi verbatim dan sinkronisasi rekaman membantu menjaga keterlacakan dari episode data menuju kode dan tema. Perbandingan kasus tunggal dan lintas kasus digunakan untuk memeriksa apakah pola yang diinterpretasikan muncul secara konsisten, berbeda, atau hanya pada kasus tertentu. Sedangkan kecukupan data dipertimbangkan berdasarkan kedalaman informasi pada setiap kasus dan kestabilan pola yang diperoleh melalui analisis kasus tunggal dan lintas kasus. Dengan lima kasus yang dibatasi pada konteks pembelajaran dan satu tugas *assembly*, analisis diarahkan pada kedalaman kasus dan perbandingan pola, bukan generalisasi statistik. Tema dipertahankan ketika didukung oleh episode visual dan/atau verbal yang dapat ditelusuri serta memiliki makna analitik dalam perbandingan lintas kasus; variasi dan pengecualian tetap dipertahankan sebagai bagian dari temuan.

HASIL DAN DISKUSI

Hasil analisis lintas kasus menunjukkan bahwa penalaran rekayasa dalam tugas *assembly* CAD tidak mengikuti satu urutan yang tetap. Partisipan bergerak secara iteratif antara orientasi terhadap model, tindakan prosedural, diagnosis masalah, penggunaan pengetahuan domain, dan validasi. Perbedaan antar kasus tampak pada kedalaman inferensi fungsional, kelancaran interaksi CAD, pemanfaatan bantuan sosial, dan kemampuan memverifikasi representasi 3D.

Sintesis Pola Penalaran dan Pola Lintas Kasus

Pada fase awal, seluruh partisipan berupaya menentukan titik masuk terhadap rakitan, tetapi strategi orientasinya berbeda. A berorientasi pada roda/pulley tengah, sedangkan B, C, D, dan E lebih banyak memulai dari base, bracket, poros, atau bagian pusat. Pada tahap inti, kesulitan prosedural paling konsisten berkaitan dengan pemilihan referensi Mate/Constraint, orientasi komponen, dan pengulangan koreksi. Namun, tidak semua kesulitan berujung pada jalur yang sama. A cenderung menggunakan bantuan sosial setelah menemui kesulitan pemasangan; C lebih sering melakukan verifikasi dan menghubungkan geometri dengan fungsi; B, D, dan E memperlihatkan episode kesulitan yang lebih lama pada aspek prosedural dan/atau pengetahuan manufaktur.

Tabel 2. Matriks Sintesis Kategori Penalaran Rekayasa pada Lima Kasus

Kategori/ Dimensi	A	B	C	D	E	Pola Lintas Kasus
Pengetahuan Manufaktur	Tidak dominan	Kuat	Tidak dominan	Kuat	Kuat	Kesenjangan terutama pada B, D, E
Penalaran Inferensial	Relatif kuat	Terbatas	Relatif kuat	Terbatas	Terbatas	Kontras utama antara A/C dan B/D/E
Interaksi Prosedural CAD	Ada, relatif terkendali	Kuat	Ada	Kuat	Sangat kuat	Muncul pada semua kasus, intensitas berbeda
Visualisasi Spasial	Bukti terbatas	Bukti terbatas	Ada strategi kompensasi/ verifikasi	Bukti terbatas	Kuat	Paling jelas pada E, dengan bukti pendukung pada C
Atribusi Kesalahan / Regulasi Metakognitif	Bantuan rekan + verifikasi hasil	Koreksi setelah salah klik	Membedakan kesalahan eksekusi dan isu clearance	Mengaitkan kesalahan dengan kurang memperhatikan video	Mengiden tifikasi salah titik Mate	Muncul pada seluruh proses, tetapi bentuk atribusinya berbeda

Pada fase awal, proses penalaran berkaitan dengan pembentukan representasi kerja terhadap model rakitan 3D. A segera memusatkan perhatian pada roda tengah, sementara C memulai dari base karena dianggap lebih mudah. E menunjukkan kebutuhan yang lebih besar terhadap representasi 3D ketika harus memahami bentuk pulley dari gambar 2D. Pada sisi lain, C memanfaatkan Section View sebagai strategi pemeriksaan internal. Temuan ini menunjukkan bahwa visualisasi spasial berperan sebagai faktor yang memengaruhi jalur penalaran, tetapi penelitian ini tidak mengukur spatial ability secara psikometrik.

Episode partisipan E tidak diperlakukan sebagai pengukuran cognitive load. Data menunjukkan kesulitan ketika representasi 3D mahasiswa harus menghubungkan informasi 2D dengan bentuk 3D

kompleks. Dalam perspektif CLT, situasi tersebut dapat dipahami sebagai tuntutan pemrosesan yang berpotensi meningkat, tetapi interpretasi tersebut bersifat teoritis dan bukan pengukuran langsung.

Tabel 3. Dasar Interpretasi Kategori Penalaran Rekayasa

Kategori	Bukti Observasi	Bukti Wawancara	Kasus Utama	Interpretasi
Interaksi Prosedural CAD	Mate/Undo berulang; salah klik; perubahan strategi; drag manual	A: kesulitan washer/mur; B: salah klik dan pengulangan; E: salah memilih titik Mate	A, B, D, E; C sebagai variasi	Bukti mendukung kesulitan memilih referensi dan menjalankan prosedur CAD; tidak digunakan sebagai ukuran langsung cognitive load
Pengetahuan Manufaktur	Fokus pada diameter dan proses ulir; episode ketidakpastian alat/prosedur	B: ragu ukuran snai; D: lupa alat; E: membahas hubungan diameter dan snai	B, D, E	Menunjukkan kesenjangan menghubungkan informasi gambar dengan proses manufaktur
Penalaran Inferensial	Pemeriksaan gerak dan jarak pulley–bracket	A: pin dan putaran; C: clearance dan kondisi riil	A, C	Menunjukkan kemampuan menurunkan konsekuensi fungsional dari informasi geometrik
Visualisasi Spasial	Perubahan orientasi; 2D–3D; Section View	E: kurang memahami bentuk 3D tanpa model; C: menggunakan Section View	C, E	Menunjukkan variasi transformasi dan verifikasi representasi spasial
Atribusi Kesalahan	Koreksi, bantuan, perubahan strategi, pemeriksaan hasil	A: meminta bantuan; C: A–E mempertimbangkan clearance; D: kurang memperhatikan video; E: salah titik Mate		Menunjukkan bagaimana mahasiswa mendiagnosis sumber masalah dan memilih respons perbaikan

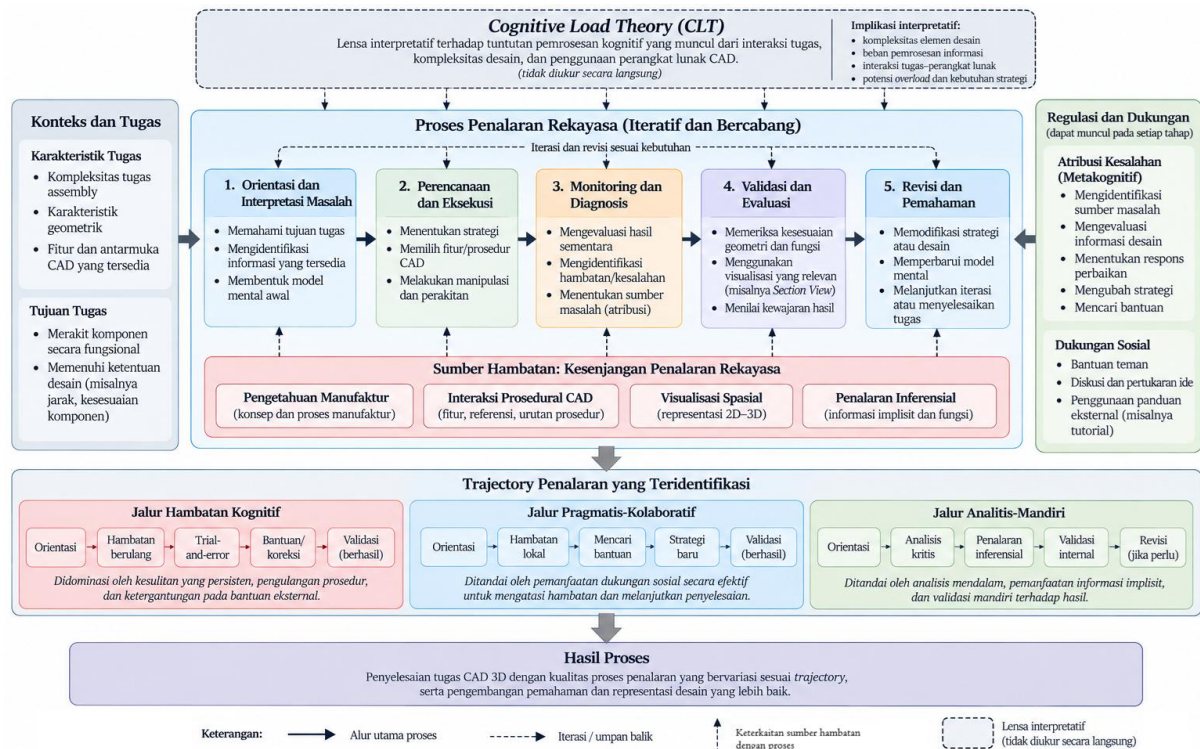
Kesulitan interaksi prosedural ditemukan pada seluruh kasus dengan intensitas dan bentuk yang berbeda. Pada A, rekaman menunjukkan Mate–Undo berulang pada Bracket–Base. Pada B, pemasangan washer dan baut disertai salah klik dan pengulangan. Pada C, kesulitan lebih banyak berkaitan dengan orientasi bracket dan pencarian titik tengah pulley. Pada D, partisipan pada awalnya menggeser komponen secara manual sebelum beralih ke Mate. Pada E, salah pemilihan titik Mate menyebabkan rakitan harus diperbaiki berulang kali. Temuan ini menunjukkan kesulitan dalam pemilihan referensi geometrik dan eksekusi prosedur CAD. Dalam perspektif CLT, episode tersebut dipahami sebagai kondisi yang berpotensi menambah tuntutan kognitif ekstraneous, bukan sebagai ukuran langsung beban kognitif.

B, D, dan E menunjukkan ketidakpastian pada pengetahuan ulir dan hubungan diameter dengan proses pembuatan. B sempat ragu menentukan ukuran snai untuk diameter 5 mm, D menyatakan lupa alat dan cara mengulir, sedangkan E membahas kembali hubungan diameter awal dengan snai. Sebaliknya, C memperlihatkan inferensi fungsional ketika menghubungkan jarak pulley–bracket dengan kebutuhan clearance dan konsekuensi jika kondisi terlalu sesak. A juga mengaitkan presisi pin dengan kemampuan pulley berputar. Pola ini mendukung pembedaan antara manufacturing knowledge gap dan inferential reasoning gap.

Kategori penalaran inferensial tidak dimaksudkan sebagai ukuran psikometrik. Kategori ini menunjukkan pola ketika mahasiswa perlu menurunkan konsekuensi fungsional dari informasi yang tidak seluruhnya dinyatakan secara eksplisit pada gambar. Dalam penelitian ini, bukti yang lebih kuat terdapat pada A dan C, sementara pada B, D, dan E perhatian lebih sering terserap pada penyelesaian sambungan atau pemahaman proses ulir.

Model Konseptual Proses Penalaran Rekayasa

Berdasarkan analisis terintegrasi dari perilaku visual dan verbalisasi, sebuah model konseptual proses penalaran rekayasa dalam interpretasi gambar teknik digital diusulkan. Model ini menggambarkan alur berpikir yang tidak linier, melainkan iteratif dan bercabang tergantung pada kompetensi individu dan strategi metakognitif yang digunakan dalam menyelesaikan tugas CAD 3D.



Gambar 2. Model Konseptual Proses Penalaran Rekayasa

Proses penalaran diawali dengan orientasi terhadap struktur dan pembentukan representasi kerja. A memusatkan perhatian pada roda tengah, sedangkan C memulai dari base karena dianggap lebih mudah. E menunjukkan kesulitan paling jelas dalam mentransformasikan gambar 2D pulley yang kompleks menjadi bentuk 3D ketika visualisasi 3D tidak tersedia. Sebaliknya, C menggunakan Section View untuk mendukung pemeriksaan geometri internal. Pola tersebut memperlihatkan bahwa representasi 3D dapat berfungsi sebagai dukungan orientasi, tetapi tidak menghilangkan kebutuhan akan penalaran spasial.

Namun, kualitas representasi mental awal tampak berkaitan dengan kemampuan transformasi spasial, khususnya ketika mahasiswa harus berpindah dari gambar 2D ke representasi 3D. Kesulitan Partisipan E menunjukkan bahwa visualisasi 3D yang tersedia di lingkungan CAD dapat membantu orientasi setelah model tersedia, tetapi tidak otomatis menghilangkan kebutuhan untuk membangun representasi mental dari gambar teknik. Temuan ini konsisten dengan bukti 2024 mengenai penggunaan model 3D dalam task-based think-aloud dan dengan kajian 2025 mengenai hubungan technical drawing dan spatial visualization (Abdo et al., 2024; Chacón, 2025).

Fase kedua dari model ini adalah Eksekusi, Analisis, dan Penanganan Hambatan, di mana tiga jalur penalaran yang berbeda secara kualitatif muncul. Transisi ke fase ini sangat dipengaruhi oleh Beban Kognitif seperti yang dijelaskan oleh Sweller et al. (2019). Temuan yang paling menonjol adalah tingginya Beban Kognitif Ekstrinsik yang disebabkan oleh kesulitan dalam menggunakan fitur *Mate/Constraint* pada perangkat lunak CAD. Hal ini terlihat pada Partisipan B, D, dan E yang terjebak dalam siklus percobaan dan kesalahan (*trial-and-error*), di mana kapasitas mental mereka tersedot untuk mengoperasikan *software* alih-alih berfokus pada penalaran desain (beban *germane*). Temuan ini sejalan dengan penelitian Lukačević et al. (2022) yang menemukan bahwa alat 3D dapat meningkatkan beban kognitif jika tugasnya menuntut presisi. Di fase inilah perbedaan kompetensi menjadi jelas:

1. Jalur Hambatan Kognitif (B, D, E): ketiga kasus menunjukkan kombinasi kesulitan prosedural dan kesenjangan pengetahuan domain, terutama pada ulir dan sambungan. Penyelesaian dicapai melalui pengulangan, koreksi, perubahan tindakan, atau bantuan eksternal. Dalam perspektif CLT, pola ini dapat dipahami sebagai kondisi ketika tuntutan tugas dan sumber daya yang tersedia tidak seimbang, tanpa menyamakan perilaku tersebut dengan besaran cognitive load terukur.

2. Jalur Pragmatis-Kolaboratif (A): A relatif lebih terarah dalam navigasi, tetapi ketika menghadapi kesulitan pemasangan washer dan mur, ia menggunakan bantuan rekan. Data wawancara menunjukkan bahwa bantuan tersebut menjadi sumber strategi untuk menyelesaikan episode yang mengalami hambatan. Pola ini dipahami sebagai strategi penggunaan sumber daya sosial dalam penyelesaian masalah, bukan bukti formal tentang ZPD (Vygotsky, 1978) atau scaffolding (van Nooijen et al., 2024).
3. Jalur Analitis-Mandiri (C): C memperlihatkan karakteristik penalaran yang relatif lebih analitis melalui pemeriksaan clearance, penggunaan Section View, dan upaya menghubungkan kondisi CAD dengan konsekuensi fungsional di dunia nyata. Posisi ini tidak dimaksudkan untuk menyebut C sebagai “ahli”, tetapi untuk menunjukkan pola verifikasi dan inferensi yang relatif lebih mendalam dibanding kasus lain.

Pada fase akhir, beberapa partisipan menggunakan bantuan sosial atau pengulangan koreksi untuk mencapai kondisi assembly yang dapat diterima, sementara C lebih konsisten menggunakan pemeriksaan internal dan pertimbangan fungsi. Penyelesaian tugas dengan demikian dapat dipahami sebagai proses yang menggabungkan sumber daya individual, prosedural, representasional, dan sosial.

Secara teoretis, model mensintesis empat lapisan interpretasi. Mental model membantu menjelaskan kebutuhan membangun representasi internal struktur dan fungsi. Spatial reasoning menjelaskan transformasi antara representasi 2D dan 3D. CLT digunakan untuk memahami tuntutan pemrosesan yang mungkin timbul dari interaksi tugas dan perangkat lunak. Temuan bantuan sosial menunjukkan bahwa jalur juga dipengaruhi oleh pemanfaatan sumber daya eksternal dalam pemecahan masalah. Kontribusi model terletak pada penghubungan keempat perspektif tersebut dengan pola empiris lintas kasus.

Taksonomi Kesenjangan Kognitif Penalaran Rekayasa

Gambar 3 merangkum empat kategori utama kesenjangan penalaran rekayasa yang diidentifikasi melalui analisis lintas kasus, yaitu kesenjangan pengetahuan manufaktur, penalaran inferensial, interaksi prosedural CAD, dan visualisasi spasial. Atribusi kesalahan ditempatkan sebagai dimensi metakognitif yang melintasi keempat kategori tersebut. Kategori-kategori ini selanjutnya dibahas berdasarkan temuan pada masing-masing kasus.



Gambar 3. Taksonomi Kesenjangan Kognitif Penalaran Rekayasa

Kesenjangan Pengetahuan Manufaktur

Kesenjangan pengetahuan manufaktur paling jelas tampak pada partisipan B, D, dan E. B menunjukkan keraguan dalam menentukan ukuran *snai* untuk diameter 5 mm, D menyatakan lupa terhadap alat dan cara melakukan proses ulir, sedangkan E kembali membahas hubungan antara diameter dan *snai*. Pola tersebut menunjukkan kesulitan ketika informasi geometrik dalam gambar perlu dihubungkan dengan proses manufaktur yang mendasarinya. Temuan ini sejalan dengan Kadam et al. (2024), yang menunjukkan bahwa kesulitan dalam penyelesaian *engineering drawing* berkaitan dengan keterbatasan pengetahuan dan tuntutan tugas kognitif tingkat tinggi.

Temuan tersebut menunjukkan bahwa penguasaan representasi digital tidak selalu diikuti kemampuan menghubungkannya dengan proses realisasi fisik. Dalam konteks pembelajaran desain, hubungan antara representasi dan implementasi penting karena mahasiswa tidak hanya perlu mengenali bentuk, tetapi juga memahami bagaimana keputusan pada model berhubungan dengan struktur, fungsi, dan proses pembuatan. Blom et al. (2026) menekankan bahwa *design representations* membantu mahasiswa bergerak antara tingkat abstraksi dan kekhususan, termasuk antara gagasan desain dan implementasinya. Dalam kerangka mereka, *implementation hierarchical thinking* mencakup pertimbangan mengenai bagaimana gagasan desain diwujudkan, termasuk proses manufaktur, material, dan teknologi yang diperlukan. Hal ini memberikan dukungan konseptual bahwa kesenjangan pengetahuan manufaktur dalam penelitian ini tidak hanya berkaitan dengan pengetahuan faktual mengenai alat atau proses ulir, tetapi juga dengan kemampuan menghubungkan representasi digital dengan realisasi teknisnya.

Kesenjangan Penalaran Inferensial

Kesenjangan penalaran inferensial terutama terlihat pada kemampuan menurunkan konsekuensi fungsional dari informasi geometrik yang tidak seluruhnya dinyatakan secara eksplisit pada gambar. C menunjukkan pola paling jelas ketika memeriksa jarak *pulley-bracket*, mempertimbangkan *clearance*, dan mengaitkan kondisi geometrik dengan kemungkinan kondisi nyata apabila jarak terlalu sempit. A juga menunjukkan inferensi fungsional ketika menghubungkan presisi pin dengan kemampuan *pulley* berputar. Sebaliknya, pada B, D, dan E, perhatian lebih sering terserap pada penyelesaian sambungan atau pemahaman proses ulir.

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa membaca gambar teknik tidak hanya memerlukan kemampuan mengenali informasi yang tersurat, tetapi juga kemampuan menghubungkan informasi tersebut dengan konsekuensi struktur dan fungsi, sebuah keterampilan yang membedakan pemula dari ahli (Wu & Walker, 2024). Perspektif Blom et al. (2026) relevan pada bagian ini karena mereka menempatkan *hierarchical thinking* sebagai kemampuan berpindah antara tingkat abstraksi dan spesifikasi ketika mahasiswa menggunakan berbagai representasi desain. Mereka menunjukkan bahwa representasi seperti *drawings* dan model 3D dapat berfungsi sebagai sarana untuk mengembangkan dan mengevaluasi gagasan desain, bukan hanya sebagai produk akhir dari suatu prosedur. Dalam penelitian ini, kemampuan C untuk berpindah dari informasi geometrik menuju pertimbangan *clearance* dapat dipahami sebagai bentuk penggunaan representasi untuk mempertimbangkan hubungan antara struktur dan fungsi.

Kesenjangan Interaksi Prosedural CAD

Kesenjangan interaksi prosedural ditemukan pada seluruh kasus, meskipun bentuk dan intensitasnya berbeda. Pada A, rekaman menunjukkan *Mate-Undo* berulang pada *Bracket-Base*. Pada B, pemasangan *washer* dan baut disertai salah klik dan pengulangan. Pada C, kesulitan lebih banyak berkaitan dengan orientasi *bracket* dan pencarian titik tengah *pulley*. Pada D, partisipan pada awalnya menggeser komponen secara manual sebelum beralih ke *Mate*, sedangkan pada E kesalahan pemilihan titik *Mate* menyebabkan rakitan harus diperbaiki berulang kali. Pola tersebut menunjukkan bahwa hambatan prosedural tidak hanya berkaitan dengan mengetahui keberadaan suatu fitur, tetapi juga dengan memilih referensi geometrik dan menentukan tindakan yang sesuai untuk mencapai tujuan perakitan.

Temuan ini konsisten dengan Buckley et al. (2018), yang menunjukkan bahwa mahasiswa menggunakan berbagai heuristik ketika menghadapi masalah selama aktivitas pemodelan CAD. Penelitian tersebut memperlihatkan bahwa perilaku mahasiswa dalam menghadapi masalah tidak selalu mengikuti prosedur tetap, tetapi dapat melibatkan eksplorasi, persistensi, perubahan strategi,

dan pencarian bantuan. Perspektif tersebut membantu menjelaskan pola pada B, D, dan E, ketika mahasiswa melakukan pengulangan, atau perubahan tindakan sebelum menemukan langkah yang sesuai.

Kesulitan tersebut juga perlu dibedakan antara penguasaan perintah dan penguasaan strategi pemodelan. Ramos Barbero et al. (2018) menunjukkan bahwa pembelajaran CAD tidak cukup dipahami sebagai penguasaan pemodelan secara prosedural; *adaptive expertise* dan pembagian komponen yang tepat berhubungan dengan kualitas *design intent* pada model CAD. Studi tersebut menunjukkan bahwa struktur model, *constraints*, dan keputusan mengenai bagaimana bagian-bagian model dibangun berhubungan dengan kemampuan mempertahankan maksud desain ketika model digunakan kembali atau dimodifikasi. Dalam penelitian ini, pengulangan *Mate*, salah pemilihan referensi, dan penggunaan cara manual dapat dipahami sebagai indikasi bahwa mahasiswa telah memiliki tujuan tindakan, tetapi belum selalu memiliki strategi pemodelan yang cukup mantap untuk menerjemahkan tujuan tersebut ke dalam struktur hubungan geometrik di lingkungan CAD.

Blom et al. (2026) memperkuat perspektif tersebut dengan menunjukkan bahwa pembelajaran desain perlu bergerak melampaui pendekatan yang hanya berfokus pada langkah-langkah prosedural. Mereka menekankan bahwa mahasiswa perlu menggunakan representasi secara strategis untuk berpindah antara berbagai tingkat abstraksi dan spesifikasi, serta bahwa proses tersebut berkaitan dengan *design reasoning* dan metakognisi. Dengan demikian, kesenjangan interaksi prosedural dalam penelitian ini tidak semata-mata menunjukkan “kurang terampil menggunakan SolidWorks”, tetapi dapat mencerminkan kesulitan dalam menghubungkan tindakan perangkat lunak dengan maksud dan struktur desain yang sedang dibangun.

Dalam perspektif CLT, kesulitan interaksi tersebut dapat dipahami sebagai kondisi yang berpotensi menambah tuntutan pemrosesan ketika mahasiswa harus menangani tuntutan tugas sekaligus kesulitan operasional perangkat lunak. Namun, pola *trial-and-error*, *Undo*, atau durasi lamanya pengerjaan tidak diperlakukan sebagai ukuran langsung *cognitive load*. Posisi ini konsisten dengan penggunaan CLT dalam penelitian sebagai lensa interpretatif, sekaligus menghindari bias pelaporan beban kognitif (Krieglstein et al., 2025)

Kesenjangan Visualisasi Spasial

Kesenjangan visualisasi spasial terutama tampak ketika mahasiswa harus berpindah antara informasi 2D dan bentuk 3D. E secara eksplisit menyatakan bahwa ia kurang memahami bentuk *pulley* 3D ketika hanya berangkat dari gambar 2D, sedangkan C menunjukkan strategi melalui perubahan orientasi dan penggunaan *Section View*. Temuan tersebut menunjukkan bahwa keberadaan model 3D dalam lingkungan CAD tidak dengan sendirinya menghilangkan kebutuhan untuk membangun dan memeriksa representasi spasial.

Temuan ini konsisten dengan Lukačević et al. (2023), yang menunjukkan bahwa aktivitas neurokognitif engineer selama interpretasi gambar teknik dan pemodelan CAD berbeda menurut jenis representasi yang digunakan. Studi tersebut menemukan perbedaan aktivitas pada pita theta, alpha, dan beta ketika engineer bekerja dengan proyeksi *orthographic* dan *isometric*, serta menunjukkan bahwa interpretasi gambar dan pembentukan model CAD merupakan bagian yang berbeda tetapi saling berkaitan dalam tugas pemodelan (Gutiérrez de Ravé et al., 2025). Temuan tersebut memberikan dukungan bahwa transformasi dari representasi teknis menuju model 3D merupakan bagian penting dari proses CAD.

Representasi seperti *sketches*, *drawings*, dan model 3D dapat membantu mahasiswa berpindah antara berbagai tingkat abstraksi dan spesifikasi dalam proses desain, sekaligus mendukung analisis, pengorganisasian, pengembangan, dan evaluasi gagasan desain (Blom et al., 2026). Dalam penelitian ini, fungsi tersebut tercermin ketika C menggunakan *Section View* untuk memeriksa hubungan internal komponen, sementara kesulitan yang dialami E menunjukkan bahwa representasi 3D dapat menjadi kebutuhan untuk membangun pemahaman bentuk ketika transformasi dari 2D belum cukup kuat**, di mana visualisasi 3D seringkali menjadi 'tongkat bantu' yang menyembunyikan kelemahan spasial fundamental (Šafhalter et al., 2022). Karena penelitian ini tidak menggunakan instrumen psikometrik, temuan tersebut tidak digunakan untuk menyatakan bahwa E memiliki “defisit kemampuan spasial”. Interpretasi yang lebih sesuai adalah adanya kesenjangan pada proses transformasi dan verifikasi representasi spasial dalam tugas yang diamati.

Atribusi Kesalahan sebagai Dimensi Metakognitif

Selain empat kesenjangan tersebut, ditemukan pola atribusi kesalahan yang muncul dalam seluruh kasus. A mencari bantuan rekan kemudian memeriksa kembali gerak *pulley*; C membedakan persoalan eksekusi dari persoalan *clearance*; D mengaitkan kesalahan dengan kurang memperhatikan video; dan E menyadari bahwa kesalahan terjadi karena pemilihan titik *Mate*. Pola tersebut menunjukkan bagaimana mahasiswa berusaha menentukan sumber masalah dan memilih tindakan korektif. Dalam penelitian ini, atribusi kesalahan diposisikan sebagai dimensi metakognitif yang melintasi keempat kesenjangan, bukan sebagai kategori kelima.

Perbedaan respons tersebut penting karena kesalahan yang sama secara tampak dapat menghasilkan arah penyelesaian yang berbeda. Sebagian mahasiswa segera mengulang tindakan yang dianggap salah, sedangkan mahasiswa lain memeriksa hubungan geometrik atau mencari informasi tambahan. Hal ini menunjukkan bahwa diagnosis sumber masalah merupakan bagian penting dari proses penalaran. Blom et al. (2026) mengaitkan penggunaan representasi desain dengan pengembangan *design reasoning* dan metakognisi, khususnya ketika mahasiswa perlu menentukan representasi yang sesuai, merefleksikan hasil, dan bergerak antara tingkat pemikiran yang berbeda. Dalam penelitian ini, hubungan tersebut tidak ditafsirkan sebagai pengukuran kemampuan metakognitif, tetapi sebagai kerangka untuk memahami perbedaan cara mahasiswa memonitor dan merespons masalah.

Integrasi Kesenjangan dalam Proses Penalaran

Keempat kesenjangan tersebut tidak berdiri sepenuhnya terpisah. Kesulitan transformasi 2D–3D dapat memengaruhi orientasi awal terhadap komponen; kesulitan prosedural *Mate/Constraint* dapat memperpanjang proses eksekusi; keterbatasan pengetahuan manufaktur dapat membatasi interpretasi makna teknis suatu fitur; sedangkan keterbatasan penalaran inferensial dapat membuat mahasiswa berhenti pada pemeriksaan bahwa komponen “dapat dipasang” atau “dapat berputar” tanpa melanjutkannya ke pertimbangan kondisi penggunaan.

Pola tersebut juga menjelaskan mengapa dua mahasiswa dapat menghasilkan rakitan akhir yang relatif sama tetapi menempuh proses yang berbeda. Buckley et al. (2018) menunjukkan bahwa mahasiswa dapat menggunakan strategi dan heuristik yang berbeda ketika menghadapi masalah dalam pemodelan CAD. Sementara itu, Ramos Barbero et al. (2018) menunjukkan pentingnya *adaptive expertise* dan *design intent* dalam membangun model CAD yang tidak hanya benar secara bentuk, tetapi juga memiliki struktur yang mendukung maksud desain. Blom et al. (2026) lebih lanjut menekankan bahwa proses desain perlu dipahami melalui penggunaan representasi dan perpindahan antar tingkat abstraksi, bukan semata-mata melalui urutan prosedural.

Dengan demikian, taksonomi pada Gambar 3 sebaiknya dipahami sebagai klasifikasi pola kesenjangan yang muncul selama proses penalaran, bukan sebagai empat kemampuan yang sepenuhnya terpisah. Atribusi kesalahan berfungsi sebagai dimensi yang melintasi kategori tersebut karena menentukan bagaimana mahasiswa menafsirkan masalah dan memilih respons berikutnya. Perspektif ini kemudian menjadi dasar untuk menyusun model konseptual pada bagian berikutnya, yang mensintesis hubungan antara pola penalaran, kesenjangan, validasi, dan dukungan sosial.

SIMPULAN

Penelitian ini mengidentifikasi empat domain utama kesenjangan dalam penalaran mahasiswa pada tugas *assembly* CAD 3D, yaitu kesenjangan pengetahuan manufaktur, kesenjangan penalaran inferensial, kesenjangan interaksi prosedural CAD, dan kesenjangan visualisasi spasial. Ditemukan pola atribusi kesalahan yang menunjukkan adanya dimensi metakognitif dalam mengidentifikasi sumber masalah, menentukan respons perbaikan, dan mengevaluasi kesesuaian informasi desain. Temuan menunjukkan bahwa kekayaan representasi visual 3D dapat membantu mahasiswa dalam memahami dan memanipulasi objek, tetapi keberadaan representasi tersebut tidak dengan sendirinya menjamin pemahaman konseptual, fungsional, manufaktural, dan spasial yang memadai.

Penelitian ini juga menghasilkan model konseptual yang dikembangkan secara eksploratif berdasarkan pola empiris lintas kasus. Model tersebut menunjukkan tiga jalur penalaran dalam konteks tugas yang diteliti, yaitu Jalur Hambatan, Jalur Pragmatis-Kolaboratif, dan Jalur Analitis-Mandiri. Model ini dimaksudkan sebagai kerangka pada tingkat proses (*process-level framework*) yang menggambarkan keterkaitan antara interpretasi representasi, pengetahuan domain, visualisasi

spasial, interaksi prosedural CAD, validasi hasil, dan dukungan sosial selama penyelesaian tugas.

Keterbatasan penelitian ini pada satu konteks institusional, satu jenis tugas *assembly*, dan satu lingkungan perangkat lunak CAD. Oleh karena itu, kategori dan model yang dihasilkan perlu dipandang sebagai temuan kontekstual dan eksploratif. Penelitian selanjutnya perlu menguji konsistensi kategori dan model tersebut melalui penerapan pada karakteristik mahasiswa, institusi, jenis tugas, dan platform CAD yang berbeda, serta mengembangkan instrumen diagnostik yang sesuai dengan konstruk yang telah diidentifikasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Universitas Palangka Raya yang berperan penting untuk memberikan pendanaan pelaksanaan penelitian melalui Skema Penelitian Dosen Pemula dengan nomor kontrak 1439/UN24.13/AL.04/2025.

DAFTAR RUJUKAN

- Abdo, S. N., Hsu, J. L., Kapetanakis, C., Newman, D. L., Wright, L. K., & Bailey, J. (2024). An exploration of spatial visualization skills: Investigating students' use of 3D models in science problems during think-aloud interviews. *Journal of Chemical Education*, 101(9), 3624–3634. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c01355>
- Akkuş, İ., & Arslan, P. Y. (2022). The effects of augmented reality in the technical drawing course on engineering students' spatial ability and academic achievement. *Journal of Learning and Teaching in Digital Age*, 7(2), 160–174.
- Benedicic, U., Maquet, L., Duffy, G., Dunbar, R., Buckley, J., & Sorby, S. (2023, October). Implementation and analysis of a spatial skills course for secondary level STEM education. In *The 40th International Pupils' Attitudes Towards Technology Conference Proceedings 2023* (Vol. 1).
- Blom, N., O'Connor, S., Lane, D., & Canty, D. (2026). Beyond procedural approaches to designing: A framework for supporting students' hierarchical thinking through their representational journeys. *International Journal of Technology and Design Education*, 36, 153–177. <https://doi.org/10.1007/s10798-025-09990-1>
- Braun, V., & Clarke, V. (2019). Reflecting on reflexive thematic analysis. *Qualitative Research in Sport, Exercise and Health*, 11(4), 589–597.
- Brown, A., Goldstein, M. H., Clay, J., Demirel, H. O., Li, X., & Sha, Z. (2024). A study on generative design reasoning and students' divergent and convergent thinking. *ASME Journal of Mechanical Design*, 146(3), 031405. <https://doi.org/10.1115/1.4064564>
- Buckley, J., Seery, N., & Canty, D. (2018). Heuristics and CAD modelling: An examination of student behaviour during problem solving episodes within CAD modelling activities. *International Journal of Technology and Design Education*, 28, 939–956. <https://doi.org/10.1007/s10798-017-9423-2>
- CAD CAM Tutorial By Mahtabalam. (2024, July 22). *Pulley support assembly in SolidWorks | SolidWorks assembly* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=TNKKUuIUGvI>
- Chacón, O. R. (2025). Influence of technical drawing on the development of spatial visualization ability: A systematic literature review. *UTE Teaching & Technology*, 2, e3930. <https://doi.org/10.17345/ute.2025.3930>
- Duran, R., Zavgorodniaia, A., & Sorva, J. (2022). Cognitive load theory in computing education research: A review. *ACM Transactions on Computing Education*, 22(4), Article 40. <https://doi.org/10.1145/3483843>
- Gutiérrez de Ravé, S., Gutiérrez de Ravé, E., & Jiménez-Hornero, F. J. (2025). Integrating CAD and orthographic projection in descriptive geometry education: A comparative analysis with Monge's system. *Education Sciences*, 15(11), 1492. <https://doi.org/10.3390/educsci15111492>
- Hsing, H. W., Bairaktarova, D., & Lau, N. (2023). Using eye gaze to reveal cognitive processes and strategies of engineering students when solving spatial rotation and mental cutting tasks. *Journal of Engineering Education*, 112(1), 125–146.
- Hu, L., Le, D., Yoon, S. Y., & Shepley, M. M. (2024). Expert gaze behaviour in design evaluation: An eye-tracking study. *The Design Journal*, 27(5), 843–866.

- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness*. Harvard University Press.
- Kadam, K., Mishra, S., Iyer, S., & Deep, A. (2024). Unfolding learning difficulties in engineering drawing problem solving. *Australasian Journal of Engineering Education*, 29(1), 42–54. <https://doi.org/10.1080/22054952.2024.2309703>
- Kriegelstein, F., Beege, M., Wesenberg, L., Rey, G. D., & Schneider, S. (2025). The distorting influence of primacy effects on reporting cognitive load in learning materials of varying complexity. *Educational Psychology Review*, 37, Article 2. <https://doi.org/10.1007/s10648-024-09980-0>
- Liu, J., Zhong, Y., & Gu, C. (2026). Enhancing work-readiness through scaffolding and cognitive transfer in CAD education: A twelve-year reflective case study. *Education Sciences*, 16(7), 992. <https://doi.org/10.3390/educsci16070992>
- Lukačević, F., Becattini, N., Perišić, M. M., & Škec, S. (2023). Differences in engineers' brain activity when CAD modelling from isometric and orthographic projections. *Scientific Reports*, 13, 9726. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36823-9>
- Lukačević, F., Li, S., Becattini, N., & Škec, S. (2022). Comparing EEG brain power of mechanical engineers in 3D CAD modelling from 2D and 3D representations. *Proceedings of the Design Society*, 2, 901–910.
- Mirabelli, J. F., Jensen, K. J., Cromley, J. G., & Vohra, S. R. (2023, June). *Conducting the cognitive interview: Sharing experiences and insight from two think-aloud studies*. American Society for Engineering Education.
- Ramos Barbero, B., Melgosa Pedrosa, C., & Castrillo Peña, G. (2018). The importance of adaptive expertise in CAD learning: Maintaining design intent. *Journal of Engineering Design*, 29(10), 569–595. <https://doi.org/10.1080/09544828.2018.1519183>
- Šafhalter, A., Glodež, S., Šorgo, A., & Ploj Virtič, M. (2022). Development of spatial thinking abilities in engineering 3D modeling course aimed at lower secondary students. *International Journal of Technology and Design Education*, 32(1), 167–184.
- Seabra, R. D., & Santos, E. T. (2013). Developing the spatial visualization ability with a virtual reality tool for teaching descriptive geometry: A Brazilian experience. *Journal for Geometry and Graphics*, 17(1), 101–117.
- Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G., & Paas, F. (2019). Cognitive architecture and instructional design: 20 years later. *Educational Psychology Review*, 31(2), 261–292.
- van Nooijen, C. C. A., de Koning, B. B., Bramer, W. M., Isahakyan, A., Asoodar, M., Kok, E., van Merriënboer, J. J. G., & Paas, F. (2024). A cognitive load theory approach to understanding expert scaffolding of visual problem-solving tasks: A scoping review. *Educational Psychology Review*, 36, Article 12. <https://doi.org/10.1007/s10648-024-09848-3>
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Harvard University Press.
- Wu, J., & Walker, C. (2024, June 23–26). *Mechanical engineering reasoning diagram: How can modeling engineering thinking support learning in writing intensive labs?* [Paper presentation]. 2024 ASEE Annual Conference & Exposition, Portland, OR, United States.