



Re-Materialisasi Epistemologi Sains: Dinamika Embodied Cognition dan Fluid Creativity Melalui Intervensi Haptik Berbasis ISA

Jessy Parmawati Atmaja^{1*}, I Wayan Lasmawan², Desak Putu Parmiti²

¹STKIP Harapan Bima, Indonesia

²Universitas Pendidikan Ganesha, Indonesia

*Corresponding Author's e-mail: jessyatmaja83@gmail.com

Article History:

Received: December 24, 2025

Revised: January 24, 2026

Accepted: January 29, 2026

Keywords:

Embodied Cognition, Haptic Intervention, Fluid Creativity, Pop-Up Book, Inquiry Science Approach

Abstract: This research addresses the cognitive crisis in primary science education caused by "digital reductionism," which frequently triggers disembodied learning. Excessive reliance on static screen simulations has led to a disconnect between a student's cognitive processes and physical reality. This study aims to mitigate this gap through a re-materialization strategy, utilizing the frameworks of Material Engagement Theory (MET) and Embodied Cognition. The primary objective is to evaluate the effectiveness of haptic intervention implemented through a Cognitive Interactive Pop-Up Book integrated with an Inquiry Science Approach (ISA). A mixed-methods research design with an Exploratory Sequential approach was employed, involving 60 fifth-grade students. Quantitative data were analyzed using MANCOVA to assess the intervention's impact on dependent variables simultaneously. The results indicate a highly significant difference between the experimental and control groups. The experimental group's post-test HOTS score reached 82.5, significantly outperforming the control group's 65.0. Similarly, in Fluid Creativity, the experimental group achieved 78.4 compared to the control group's 58.2 ($p < .001$). Specifically, the haptic group showed sharp increases in high-level cognitive indicators: Analysis (Gain 38.6) and Evaluation (Gain 36.4), with a substantial Effect Size of 0.42 (Partial Eta Squared). These findings empirically confirm that physical re-materialization serves as a "cognitive prosthetic," bridging the gap between abstract concepts and physical reality through sensorimotor feedback. This study concludes that activating the hands as "thinking senses" is crucial for developing embodied knowledge and adaptive creativity in primary education.

Copyright © 2026, The Author(s).

This is an open access article under the CC-BY-SA license



How to cite: Atmaja, J. P., Lasmawan, I. W., & Parmiti, D. P. (2026). Re-Materialisasi Epistemologi Sains: Dinamika Embodied Cognition dan Fluid Creativity Melalui Intervensi Haptik Berbasis ISA. *SENTRI: Jurnal Riset Ilmiah*, 5(1), 1048-1060. <https://doi.org/10.55681/sentri.v5i1.5507>

PENDAHULUAN

Abad XXI menempatkan pendidikan sains pada persimpangan filosofis yang kritis, dualisme historis antara pikiran dan media haptik kini dihidupkan kembali dalam bentuk hegemoni digital. Krisis kognisi dalam pendidikan sains saat ini diperparah oleh hilangnya interaksi fisik dengan objek nyata. Sebagai solusi, penelitian ini memperkenalkan penggunaan media haptik yang dirancang khusus untuk mengaktifkan sensorimotorik siswa. Melalui instrumen manipulatif, siswa tidak hanya mengamati fenomena secara visual, tetapi juga merasakan hukum-hukum fisika melalui tangan mereka. Penggunaan perangkat interaktif berbasis kertas bertujuan untuk mengembalikan dimensi material dalam ruang kelas yang kini didominasi oleh layar digital. Tanpa adanya keterlibatan media haptik, siswa mengalami degradasi dalam pemetaan spasial otak, karena navigasi

pada layar dua dimensi tidak memberikan resistensi fisik atau umpan balik propriozeptif yang diperlukan untuk membangun skema mental yang kokoh. Fenomena ini memicu *disembodied learning*, di mana terjadi pemutusan hubungan esensial antara konsep abstrak dengan pengalaman tubuh siswa.

Akibat langsung dari reduksionisme digital adalah meluasnya fenomena *disembodied learning* [1]. Di jenjang Sekolah Dasar (SD), khususnya pada siswa usia pra-formal, koneksi krusial antara konsep abstrak dan pengalaman inderawi terputus. Siswa mungkin mampu menghafal definisi, tetapi mereka kehilangan intuisi fisika, yaitu pemahaman mendalam berbasis sensori tentang bagaimana suatu fenomena kausalitas bekerja. Pengetahuan yang didapat menjadi hafalan diluar kepala (*rote learning*) dan mudah runtuh ketika dihadapkan pada masalah aplikatif non-rutin. Data dari Laporan *Trends in International Mathematics and Science Study* (TIMSS) secara konsisten menunjukkan bahwa siswa Indonesia masih menghadapi tantangan signifikan dalam menerapkan pengetahuan sains untuk memecahkan masalah kompleks, yang merupakan indikasi adanya kesenjangan antara pemahaman konseptual dan penalaran praktis.

Kegagalan proses dematerialisasi paling terlihat pada kinerja *High Order Thinking Skills* (HOTS) siswa. Dari perspektif neurosains kognitif dan teori *embodied cognition*, pemikiran khususnya penalaran spasial bukan operasi yang terisolasi di otak. Kognisi adalah proses *embodied* (bertubuh) dan *enactive* (berbasis aksi), yang sangat tergantung pada umpan balik propriozeptif [13]. Masalah mendasar pada *disembodied learning* adalah hilangnya *tactile engagement* yang kaya. Tanpa sinyal resistensi, berat, atau tekstur, otak kesulitan memicu *grounded cognition*, yaitu menambatkan konsep abstrak pada pengalaman tubuh. Akibatnya, siswa kesulitan melakukan simulasi gerak mental yang merupakan prasyarat HOTS [20]. Penelitian ini berargumen bahwa kegagalan HOTS bukan disebabkan kurangnya latihan soal, melainkan karena kegagalan sistem pengiriman kognitif.

Tantangan pendidikan modern meluas pada pengembangan kreativitas. Kreativitas yang dituntut adalah *fluid creativity*, yaitu kapasitas neurokognitif untuk beradaptasi, mengalirkan ide, dan melakukan *relational reasoning* secara instan saat dihadapkan pada masalah baru [18]. Akan tetapi, implementasi *Inquiry Science Approach* (ISA) di Indonesia, meskipun didukung regulasi [11], masih terjerumus dalam rutinitas prosedural yang kaku, mengikuti langkah-langkah linier yang tertera dalam Lembar Kerja Siswa (LKS). Implementasi ISA yang kaku dapat menghambat eksplorasi rizomatik siswa, padahal eksplorasi tersebut merupakan elemen kunci dalam melatih *fluid creativity*. Sebagai dekonstruksi terhadapkekakuan tersebut, penelitian ini menawarkan konsep ISA Rizomatik. Dalam konteks praktis di kelas, ISA Rizomatik didefinisikan sebagai model inkuiiri non-linier yang memungkinkan siswa melakukan eksplorasi secara fleksibel dan tidak berurutan. Berbeda dengan ISA prosedural yang kaku, model rizomatik memberikan ruang bagi siswa untuk melakukan navigasi inkuiiri secara non-linier (tidak berurutan). Implementasi praktis dari inkuiiri termanifestasi saat siswa berinteraksi dengan fitur haptik pada *pop-up book*. Dimana alur eksplorasinya mencakup:

- Eksplorasi Non-Linier: Siswa tidak dipaksa mengikuti urutan instruksi tunggal, melainkan didorong untuk mencoba berbagai konfigurasi mekanis secara mandiri.
- Umpan Balik melalui Kegagalan: Ketika mekanisme fisik mengalami hambatan atau tekanan, hal tersebut memicu disonansi kognitif yang memaksa siswa merumuskan hipotesis baru secara instan tanpa harus menunggu arahan guru.

- Adaptasi Strategi secara Instan: Siswa melakukan iterasi haptik (manipulasi berulang) untuk menemukan hubungan kausalitas, yang secara langsung melatih *fluid creativity*.

Melalui pendekatan rizomatik, ISA tidak lagi menjadi keterpaksaan instruksional, melainkan berubah menjadi proses penemuan autentik yang memberikan *affordance* (potensi aksi) fisik yang kaya bagi pikiran siswa.

Fenomena ini menunjukkan bahwa lingkungan pembelajaran yang kaku dan minim *affordance* (potensi aksi) secara fisik menghambat kreativitas. Jika media haptik yang digunakan hanya mengizinkan satu atau dua jenis interaksi, maka pikiran siswa juga akan terpaku pada solusi tunggal. Untuk memantik *fluid creativity*, diperlukan intervensi yang secara fisik memaksa siswa untuk mencoba berbagai konfigurasi, melihat kegagalan sebagai umpan balik fisik, dan mencari hubungan baru.

Menanggapi krisis ini dan tuntutan akan *affordance* (potensi aksi), *cognitive interactive Pop-Up Book* diusulkan sebagai solusi. *Pop-Up Book* didefinisikan sebagai media pembelajaran interaktif yang menggabungkan prinsip-prinsip *Pop-Up engineering* dengan konten sains, dirancang untuk merangsang keterlibatan fisik dan kognitif siswa. *Pop-Up Book* dirancang sebagai “Prostetik Kognitif”, perpanjangan kemampuan kognitif [13] yang secara fungsional memanfaatkan mekanisme *multi-input* dan *multi-output* yang secara fisik menolak alur linier A-B-C, sehingga memaksa siswa untuk mencoba berbagai kombinasi dan menemukan hubungan kausalitas secara mandiri.

Intervensi Haptik (IH) Berbasis ISA, bekerja melalui mekanisme haptik yang kompleks (tuas, roda gigi kertas, lipatan engsel). Perangkat ini menyediakan *scaffolding material*, dukungan fisik yang memediasi pemikiran abstrak. Interaksi ini diharapkan memicu *cognitive dissonance* yang otentik, yang kemudian secara alami mendorong siswa pada ISA Rizomatik yang fleksibel. Secara optimal, Intervensi Haptik ini dirancang sebagai katalis fisik yang mengaktifkan jalur *embodied cognition* untuk merekonstruksi HOTS dan memantik *fluid creativity* secara terintegrasi.

Melihat urgensi tiga masalah tersebut, penelitian ini mengajukan solusi yang terintegrasi dan mendalam, berlandaskan tesis Re-Materialisasi Epistemologi Sains. Penelitian ini mengusulkan *Haptic-Inquiry Integration* sebagai kerangka solusi, yang sejalan dengan prinsip *Material Engagement Theory* (MET) [13]. Dengan menguji *cognitive interactive Pop-Up Book* sebagai Prostetik Kognitif, penelitian ini tidak hanya bertujuan meningkatkan skor akademik, tetapi juga menyumbang model filosofis dan praktis yang kokoh untuk memastikan pendidikan sains abad XXI menghasilkan siswa yang tidak hanya cerdas secara simbolik, tetapi juga cerdas secara material dan fisik.

LANDASAN TEORI

• Dekonstruksi Epistemologi Sains dan Reduksionisme Digital

Epistemologi sains tradisional dibangun di atas asumsi dualistik, memisahkan pikiran dari tubuh dan materi. Dalam pendidikan kontemporer, hal ini diwujudkan sebagai *reduksionisme digital*, yaitu kecenderungan untuk mereduksi pemahaman ilmiah menjadi proses visual simbolik murni pada layar. Penelitian ini mengkritisi pandangan bahwa pengetahuan sains bersifat netral dan abstrak. Sebaliknya, pengetahuan ilmiah yang kokoh memerlukan materialitas fisik. Kegagalan integrasi ini menciptakan *disembodied learning*, di mana siswa menguasai simbol tanpa intuisi fisik [1].

- **Material Engagement Theory (MET) dan Embodied Cognition**

Teori ini menyatakan bahwa pikiran (kognisi) tidak terisolasi di otak, tetapi embodied (bertubuh) dan extended (meluas ke alat atau lingkungan). *Material Engagement Theory* (MET) [13] secara spesifik berargumen bahwa proses berpikir adalah hasil interaksi timbal balik antara organisme dan materi, di mana objek material menjadi bagian dari sistem kognitif itu sendiri.

Penelitian ini berpedoman pada perspektif *4E Cognition* (Embodied, Enactive, Extended, Embedded) [15].

1. Embodied dan Enactive:

Kognisi tidak hanya terjadi di otak, tetapi terikat pada tubuh (*Embodied*) dan muncul melalui interaksi aktif dengan lingkungan (*Enactive*) [8].

2. MET dan Prostetik Kognitif:

Menggunakan kerangka *Material Engagement Theory* (MET) [13], pikiran dianggap meluas ke media haptik yang digunakan (*extended mind*). Mekanisme *pop-up* (tuas, roda gigi kertas) dalam penelitian ini didefinisikan sebagai "Prostetik Kognitif". Objek material berfungsi sebagai ekstensi sensorimotor yang secara fisik membantu siswa memvisualisasikan gaya dan gerak, sehingga mengaktifkan skema motorik yang mendasari pemahaman konseptual [9]. Skema motorik ini, pada gilirannya, berfungsi sebagai dasar bagi otak untuk melakukan simulasi mental yang diperlukan untuk pemahaman konseptual yang kokoh (*grounded cognition*). Dengan demikian, tangan siswa menjadi agen yang menopang pikiran.

- **Fluid Creativity dalam Sains**

Kreativitas yang ditargetkan di sini adalah *fluid creativity*, yang diadaptasi dari konsep *fluid intelligence* Cattell [6]. Ini adalah kapasitas neurokognitif untuk memecahkan masalah kebaruan (*novelty*) tanpa bergantung pada pengetahuan yang dihafal sebelumnya [18]. *Fluid creativity* melibatkan kemampuan untuk menghasilkan ide-ide baru dan relevan, serta kemampuan untuk mengubah perspektif dan pendekatan dalam menghadapi masalah. Dalam konteks pendidikan sains, *fluid creativity* memungkinkan siswa untuk mengembangkan solusi inovatif terhadap tantangan ilmiah, serta untuk beradaptasi dengan perubahan dan ketidakpastian dalam pengetahuan ilmiah.

1. Relational Reasoning:

Fluid creativity didasarkan pada *relational reasoning*, yaitu kemampuan kritis untuk melihat hubungan antara variabel yang tampak tidak berhubungan dan menunjukkan fleksibilitas kognitif yang tinggi.

2. Embodiment sebagai Basis:

Ditegaskan bahwa input haptik dan kinestetik menyediakan pertukaran motorik yang lebih luas bagi otak untuk melakukan *conceptual blending* dan meningkatkan *relational reasoning*.

- **Inquiry Science Approach (ISA) sebagai Epistemic Scaffolding**

ISA dalam penelitian ini dimaknai sebagai struktur epistemik, bukan sekedar daftar prosedur. Tujuan ISA di sini adalah mencapai ISA Rizomatik (non-linier), yang memungkinkan eksplorasi fleksibel.

1. Material Scaffolding:

Fitur haptik *Pop-Up Book* bertindak sebagai *material scaffolding* yang mendukung struktur kognitif HOTS.

2. Memicu Disonansi Kognitif:

Desain interaktif buku secara sengaja menciptakan *cognitive dissonance*, yang secara alamiah memicu fase *inquiry* (menanya, merumuskan hipotesis).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Mixed Methods* dengan desain *Exploratory Sequential*:

- **Data Kualitatif:**

Diambil melalui *Think-Aloud Protocols* dan *micro-coding* interaksi haptik (H1-H3).

- **Data Kuantitatif:**

Menggunakan desain *Pretest-Posttest Non-equivalent Control Group*. Analisis statistik dilakukan dengan MANCOVA untuk menetralkan pengaruh skor awal (*pre-test*).

- **Subjek:**

60 siswa Kelas V SD (Kelompok Eksperimen n=30, Kelompok Kontrol n=30).

- **Instrumen:**

Lembar observasi *Micro-Coding Haptik*, Tes HOTS (C4-C5), dan Tes Torrance untuk *Fluid Creativity*.

Analisis Micro-Coding Haptik (H1-H3) digunakan untuk memahami dinamika interaksi siswa dengan media secara mendalam, dengan klasifikasi sebagai berikut:

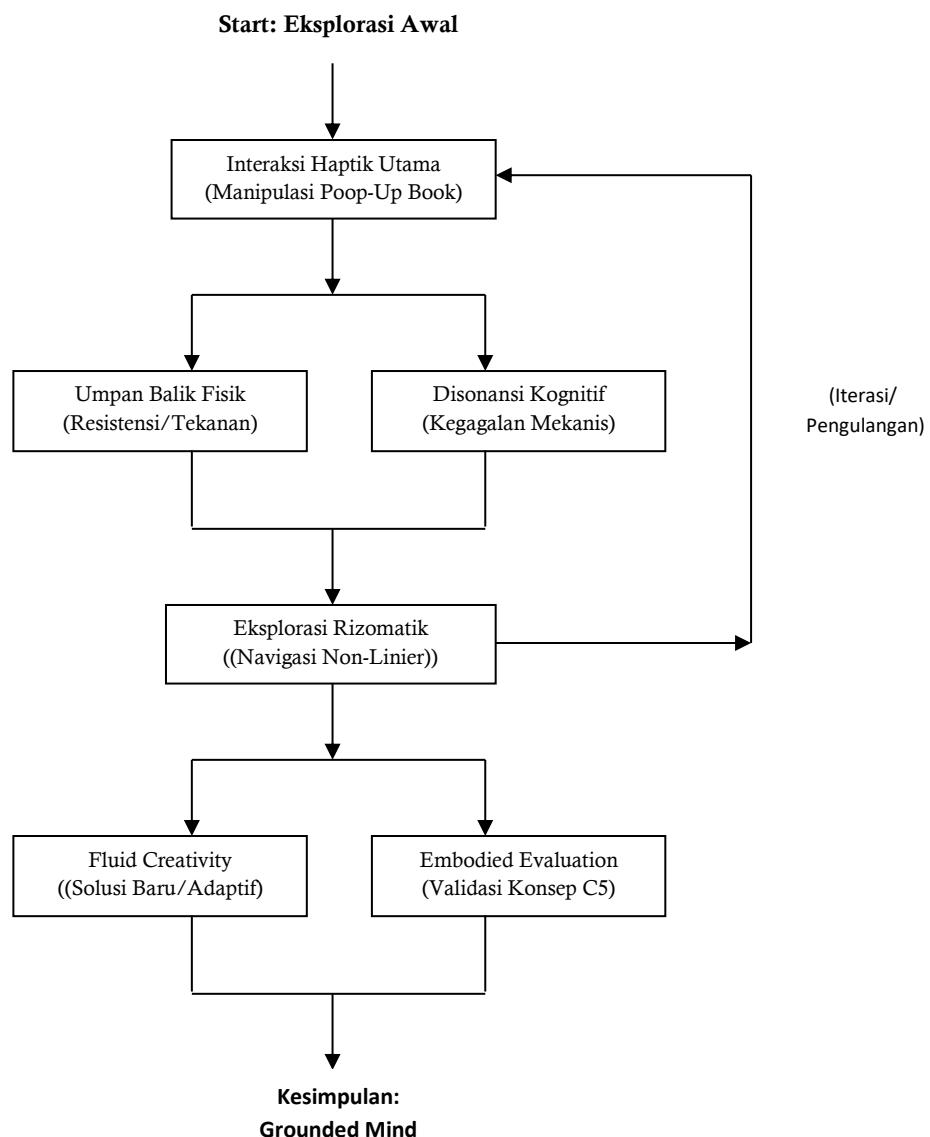
1. **H1 (Visual Haptik):** Interaksi awal di mana siswa menyentuh atau menggerakkan fitur *Pop-Up* hanya untuk mengonfirmasi informasi visual tanpa eksplorasi mekanis yang mendalam.
2. **H2 (Manipulasi Prosedural):** Siswa mengoperasikan tuas atau roda gigi sesuai dengan urutan instruksi yang tersedia untuk melihat hasil yang diprediksi.
3. **H3 (Eksplorasi Rizomatik):** Tingkat tertinggi di mana siswa melakukan manipulasi berulang, mencoba berbagai konfigurasi non-linier, dan tetap bereksperimen saat menghadapi resistensi atau kegagalan mekanis untuk menemukan hubungan kausalitas yang baru.

HASIL DAN PEMBAHASAN

- **Proses Kognitif Mikro dalam Interaksi Haptik (Hasil Fase I)**

Hasil pengujian menunjukkan bahwa intervensi haptik memberikan dampak signifikan pada seluruh variabel terikat jika dibandingkan dengan metode konvensional. Hal ini berakar pada dinamika interaksi yang terjadi selama proses pembelajaran, di mana pola ketiga yang ditemukan adalah Eksplorasi Rizomatik (H3) sebagai level interaksi haptik paling kompleks. Pada fase ini, siswa tidak lagi terpaku pada prosedur linier, melainkan melakukan eksplorasi iteratif yang dinamis. Resistensi material pada *Pop-Up Book* memicu siswa untuk mencoba berbagai konfigurasi alternatif secara berulang dan fleksibel hingga ditemukan hubungan kausalitas yang tepat. Pola H3 ini menjadi bukti nyata adanya dekonstruksi prosedur inkuiri yang kaku menjadi proses eksploratif yang dinamis dan adaptif, yang pada akhirnya memicu lonjakan kemampuan evaluatif siswa.

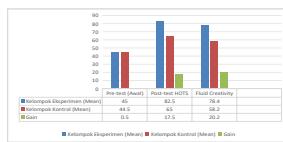
Dinamika navigasi non-linier dalam pola H3 ini secara visual diilustrasikan dalam gambar diagram berikut:

Gambar 1. Diagram Alur Inkuiiri Non-Linier (ISA Rizomatik)

Visualisasi pada Gambar 1. Diagram Alur Inkuiiri Non-Linier (ISA Rizomatik) menunjukkan bahwa pola eksplorasi rizomatik ini memungkinkan siswa untuk melakukan navigasi kognitif yang adaptif. Berbeda dengan kelompok kontrol yang cenderung pasif mengikuti instruksi linier, kelompok eksperimen memanfaatkan umpan balik sensorimotor dari *Pop-Up Book* sebagai kompas untuk memvalidasi atau merevisi pemahaman mereka secara instan. Fleksibilitas dalam berpindah antar tahapan, dari manipulasi fisik kembali ke evaluasi hipotesis inilah yang membangun fondasi kognitif yang kuat. Proses internalisasi konsep yang dinamis ini memberikan penjelasan mendasar mengapa kelompok eksperimen mampu mencapai capaian statistik yang signifikan pada variabel HOTS dan kreativitas, sebagaimana yang disajikan dalam ringkasan hasil analisis MANCOVA pada tabel berikut:

Tabel 1. Deskripsi Skor Rata-rata dan Uji Signifikansi

Indikator Variabel	Kelompok Eksperimen (Mean)	Kelompok Kontrol (Mean)	Gain	Sig. (p)
Pre-test (Awal)	45.0	44.5	0.5	0.892
Post-test HOTS	82.5	65.0	17.5	0.001
Fluid Creativity	78.4	58.2	20.2	0.001

Grafik 1. Perbandingan Capaian Skor Pre-test dan Post-test

Berdasarkan data tabel 1 di atas, terdapat beberapa poin kunci yang memperkuat argumen penelitian ini:

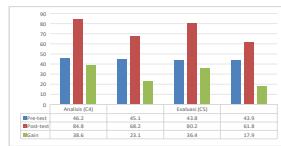
1. Kesetaraan Awal: Hasil *Pre-test* menunjukkan nilai $p = 0.892$, yang berarti tidak ada perbedaan signifikan antara kedua kelompok sebelum eksperimen dimulai. Ini menjamin validitas internal penelitian.
2. Keunggulan Haptik pada HOTS: Kelompok eksperimen mencapai skor 82.5, unggul jauh dari kelompok kontrol (65.0). Hal ini membuktikan bahwa manipulasi haptik melalui *Pop-Up Book* mempermudah transisi kognitif dari benda konkret ke analisis abstrak.
3. Dampak pada *Fluid Creativity*: Peningkatan tertinggi terjadi pada *fluid creativity* (selisih rata-rata 20.2 poin). Dampak ini mengonfirmasi bahwa interaksi fisik yang bersifat "rizomatik" (eksploratif) memicu kelenturan berpikir siswa lebih baik daripada metode instruksional biasa.
4. Kekuatan Intervensi (*Effect Size*): Dengan *Partial Eta Squared* sebesar 0.42, intervensi haptik memiliki kategori pengaruh besar (*large effect*). Intervensi ini memberikan kontribusi nyata sebesar 42% terhadap variansi kemampuan berpikir siswa.

• Efektivitas Intervensi terhadap HOTS dan *Fluid Creativity* (Hasil Fase II)

Berdasarkan data penelitian, berikut adalah rincian peningkatan (*gain*) pada indikator Analisis (C4) dan Evaluasi (C5):

Tabel 2. Analisis Gain Score Berdasarkan Kriteria Hake (g)

Indikator HOTS	Kelompok	Pre-test	Post-test	Gain (g)	Interpretasi
Analisis (C4)	Eksperimen	46.2	84.8	38.6	Tinggi (<i>High</i>)
	Kontrol	45.1	68.2	23.1	Sedang (<i>Medium</i>)
Evaluasi (C5)	Eksperimen	43.8	80.2	36.4	Tinggi (<i>High</i>)
	Kontrol	43.9	61.8	17.9	Rendah-Sedang (<i>Low</i>)

Grafik 2. Perbandingan Skor Post-Test per Indikator

Berdasarkan data pada Tabel 2, terlihat perbedaan performa kognitif yang mencolok antara kedua kelompok. Pada indikator Analisis (C4), kelompok eksperimen mencapai *gain* sebesar 38.6 (kategori Tinggi), secara signifikan melampaui kelompok kontrol yang hanya mencapai 23.1 (kategori Sedang). Diferensiasi performa yang paling kontras muncul pada indikator Evaluasi (C5). Sementara kelompok kontrol hanya menunjukkan efektivitas peningkatan pada kategori rendah-sedang (17.9), kelompok eksperimen justru menunjukkan akselerasi peningkatan dengan kategori tinggi (*High*) dengan skor 36.4. Fenomena ini membuktikan bahwa tanpa interaksi material yang memberikan umpan balik haptik, siswa kesulitan memvalidasi pemikiran mereka pada tingkat evaluatif, sehingga pertumbuhan kognitif cenderung stagnan.

Keunggulan signifikan kelompok eksperimen pada capaian HOTS (82.5) dan *fluid creativity* (78.4) mengindikasikan bahwa intervensi haptik tidak sekadar berfungsi sebagai alat bantu visual, melainkan sebagai mesin penggerak kognisi. Ketajaman perbedaan ini, terutama pada indikator Evaluasi (C5) dengan *gain* sebesar 36.4, membuktikan bahwa tanpa umpan balik material, pertumbuhan kognitif siswa cenderung stagnan pada level hafalan. Fenomena ini secara mekanistik dijelaskan melalui pola Eksplorasi Rizomatik (H3), di mana resistensi fisik dari mekanisme *pop-up* memicu disonansi kognitif yang memaksa otak melakukan evaluasi instan melalui indra peraba. Dengan demikian, lonjakan statistik tersebut merupakan manifestasi dari transformasi pengetahuan yang kini bertumpu pada realitas fisik atau *grounded knowledge*.

- **Uji Hipotesis (Hasil MANCOVA)**

Uji MANCOVA dilakukan untuk menjawab pengaruh intervensi haptik terhadap HOTS dan *fluid creativity* secara simultan dengan mengontrol kemampuan awal (*pre-test*).

Tabel 3. Hasil Uji Multivariate Analysis of Covariance (MANCOVA)

Sumber Variasi	Variabel Terikat	F-hitung	Sig. (p)	Partial Eta Squared
Intervensi Haptik	HOTS (C4-C5)	24.15	0.000	0.42
	Fluid Creativity	18.82	0.000	0.38

Pengujian hipotesis menggunakan MANCOVA menunjukkan hasil sebagai berikut:

1. Peningkatan HOTS (C4 & C5): Terdapat perbedaan signifikan dalam skor Analisis dan Evaluasi antara kelompok eksperimen dan kontrol. Siswa pada kelompok haptik menunjukkan kemampuan penalaran spasial yang lebih kokoh karena konsep abstrak telah tertambat pada pengalaman fisik (*grounded cognition*).
2. Peningkatan *Fluid Creativity*: Kelompok eksperimen menunjukkan skor fleksibilitas kognitif yang lebih tinggi secara signifikan dibandingkan kelompok visual murni. Hal ini dibuktikan dengan kemampuan siswa menghasilkan solusi desain yang lebih beragam (rizomatik) saat diberikan masalah non-rutin.
3. Korelasi Intervensi Haptik-*Fluid Creativity*: Hasil uji Korelasi Pearson mengonfirmasi adanya hubungan positif yang kuat antara skor IH (Intervensi Haptik) dengan *fluid creativity*. Semakin dalam keterlibatan fisik siswa dengan artefak, semakin tinggi kapasitas mereka untuk melakukan *relational reasoning*.

- **Analisis Micro-Coding Haptik**

Melalui observasi mendalam berbasis protokol *micro-coding*, ditemukan alasan mekanistik mengapa kelompok haptik mencapai skor yang jauh lebih tinggi:

1. Iterasi Haptik (H1-H3): Siswa dengan skor tinggi menunjukkan pola manipulasi berulang. Mereka tidak hanya melihat, tetapi "berdialog" dengan tuas atau roda gigi saat menghadapi soal evaluasi (C5) yang sulit.
2. Trigger Disonansi: Skor tinggi dipicu oleh momen "perlawanan material". Ketika mekanisme buku terasa berat atau macet, terjadi disonansi kognitif yang memaksa otak melakukan evaluasi instan melalui indra peraba.

Tabel 4. Hasil Uji Korelasi Pearson (Kelompok Eksperimen)

Variabel	Fluid Creativity (Skor Post-test)	Interpretasi
Intervensi Haptik (IH)	$r = 0.78$	Hubungan Positif Kuat
Signifikansi (p)	0.000	Sangat Signifikan

Hasil uji Korelasi Pearson mengonfirmasi adanya hubungan positif yang kuat antara skor Intervensi Haptik (IH) dengan *Fluid Creativity* ($r = 0.78$; $p < 0.001$). Nilai koefisien yang tinggi ini menunjukkan bahwa 42% hingga 60% variansi kreativitas adaptif siswa dipengaruhi oleh kedalaman keterlibatan fisik mereka dengan artefak.

Secara mekanistik, hal ini dijelaskan melalui pola H3 (Eksplorasi Rizomatik): siswa yang paling sering melakukan manipulasi fisik saat menghadapi resistensi material

(tekanan) terbukti memiliki skor fleksibilitas kognitif yang lebih tinggi. Data ini memvalidasi bahwa input haptik menyediakan perbendaharaan motorik bagi otak untuk melakukan *relational reasoning* dan pemecahan masalah non-rutin secara instan.

Temuan penelitian menunjukkan bahwa prostetik kognitif ini bekerja dengan cara memberikan umpan balik instan yang tidak dapat disediakan oleh simulasi digital. Ketika siswa memanipulasi katalis fisik, terjadi dialog antara pikiran dan materi. *Scaffolding* material yang dihadirkan oleh struktur *Pop-Up* mekanis tersebut memberikan tumpuan bagi siswa untuk mencapai level evaluasi (C5). Dengan demikian, objek material ini bukan sekadar alat bantu visual, melainkan bagian integral dari proses berpikir siswa (*extended mind*). Hal ini selaras dengan pandangan Malafouris [13] dalam *Material Engagement Theory* bahwa materi fisik mampu mendikte arah pemikiran melalui resistensi dan *affordance* yang diberikannya.

• Pembahasan: Sintesis Temuan

Integrasi temuan antara Fase I (kualitatif) dan Fase II (kuantitatif) mengungkapkan pola kausalitas yang kokoh mengenai bagaimana intervensi haptik mentransformasi kapasitas kognitif siswa. Temuan ini menegaskan bahwa keunggulan kelompok eksperimen bukanlah sekadar akumulasi informasi faktual, melainkan manifestasi dari pergeseran epistemologis ke arah pengetahuan yang bertubuh (*embodied knowledge*).

Analisis protokol Micro-Coding haptik pada Fase I membuktikan bahwa keterlibatan fisik dengan *cognitive interactive Pop-Up Book* memicu dinamika kognitif non-linier yang disebut sebagai Eksplorasi Rizomatik (H3). Berbeda dengan kelompok kontrol yang cenderung pasif menerima representasi visual, siswa kelompok eksperimen melakukan navigasi aktif saat menghadapi resistensi mekanis pada media. Sensasi fisik berupa "hambatan" atau "tekanan" pada tuas bukan dianggap sebagai gangguan, melainkan umpan balik proprioseptif intens yang menyuplai data kognitif secara real-time. Dalam kerangka *Material Engagement Theory* (MET), proses ini memosisikan tangan sebagai prostetik kognitif—sebuah perpanjangan pikiran yang memungkinkan siswa "merasakan" konsep gaya dan gerak, sehingga pemahaman abstrak menjadi lebih "tebal" dan autentik.

Konsistensi antara proses kognitif mikro dan capaian makro divalidasi secara empiris melalui uji MANCOVA. Hasil statistik menunjukkan pengaruh signifikan intervensi haptik terhadap HOTS dan *fluid creativity* secara simultan ($p < 0.001$), dengan *effect size* sebesar 0.42 (*Partial Eta Squared*). Temuan yang paling krusial muncul pada indikator Evaluasi (C5) dengan lonjakan gain sebesar 36.4. Fenomena ini mengonfirmasi teori 'Evaluasi Bertubuh'; siswa mampu melakukan validasi saintifik secara lebih akurat karena memiliki kepastian data sensorimotor yang tidak dapat disediakan oleh simulasi digital statis. Kepastian data melalui sentuhan fisik inilah yang menjadi fondasi bagi kemampuan penalaran tingkat tinggi yang lebih resilien.

Korelasi positif yang kuat antara skor Intervensi Haptik (IH) dan Fluid Creativity ($r = 0.78$) menunjukkan bahwa fleksibilitas kognitif berkembang seiring dengan intensitas interaksi material. Munculnya disonansi kognitif (*cognitive dissonance*) akibat kegagalan mekanis pada buku memaksa siswa untuk melakukan iterasi kreatif dan refleksi instan. Di sinilah intervensi haptik berperan sebagai Material Scaffolding, jembatan fisik yang membantu siswa melampaui keterbatasan simulasi mental. Proses Re-Materialisasi ini berhasil mengubah manipulasi simbolik yang abstrak menjadi pengalaman nyata, memastikan bahwa konsep sains yang dipelajari tertambat (*grounded*) pada realitas fisik.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi teoretis baru dalam pendidikan sains di sekolah dasar dengan membuktikan bahwa pikiran siswa bersifat tertambat pada tubuh. Re-materialisasi epistemologi sains melalui intervensi haptik berbasis *Inquiry Science Approach* (ISA) terbukti efektif tidak hanya dalam meningkatkan skor akademik, tetapi juga dalam memulihkan kapasitas siswa untuk melakukan penalaran sains yang kreatif. Temuan ini menjadi antitesis krusial terhadap krisis “reduksionisme digital,” menawarkan jalan kembali menuju pembelajaran yang menyatukan kembali pikiran, tubuh, dan materi.

KESIMPULAN

Hasil penelitian ini memberikan landasan fundamental bagi refleksi teoretis bagaimana pengetahuan sains dikonstruksi pada siswa Sekolah Dasar (SD) melalui keterlibatan material secara langsung. Penelitian ini menegaskan bahwa kognisi sains tidak bersifat abstrak simbolik semata, melainkan muncul dari interaksi sensorimotor yang kompleks. Melalui fenomena pikiran yang tertambat (*grounded mind*), keunggulan kelompok haptik membuktikan bahwa tangan berfungsi sebagai “indra pemikir” yang menjembatani hambatan fisik menjadi pemahaman konsep yang mendalam.

Secara teoretis, media *Pop-Up Book* dalam penelitian ini terbukti secara efektif bertindak sebagai *Material Scaffolding* atau Prostetik Kognitif. Berdasarkan *Material Engagement Theory* (MET), material fisik mampu memicu disonansi kognitif melalui hambatan mekanis yang tidak dapat disediakan oleh media digital statis. Hal ini mendorong siswa mencapai level Evaluasi (C5) dan memicu kreativitas rizomatik.

Poin-poin kunci temuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- **Transformasi Kognitif melalui Intervensi Haptik:** Intervensi haptik (IH) terbukti menjadi katalisator utama dalam transformasi kognitif siswa, yang dibuktikan dengan kenaikan signifikan sebesar 36.4 poin pada indikator evaluasi (C5). Data ini menunjukkan bahwa saat siswa merasakan beban dan gerak secara kinestetik, pengetahuan mereka bertumpu pada realitas fisik (*grounded knowledge*).
- **Aktivasi Kreativitas Rizomatik:** Peningkatan sebesar 20.2 poin pada skor kreativitas mencerminkan terjadinya pola pikir *fluid/rhizomatic*. Mekanisme fisik yang interaktif melalui Pola H3 (Eksplorasi Rizomatik) memaksa siswa untuk terus beradaptasi dan mencari solusi baru secara instan saat menghadapi kendala mekanis.
- **Signifikansi Pengaruh:** Temuan angka *effect size* sebesar 0.42 (*Partial Eta Squared*) menjadi bukti statistik kuat bahwa hampir separuh dari peningkatan kognisi dan kreativitas siswa merupakan kontribusi murni dari intervensi haptik dibandingkan pendekatan konvensional.

Sebagai refleksi, Penelitian ini melakukan dekonstruksi kritis terhadap paradigma “reduksionisme digital” yang memisahkan pikiran dari tubuh. Tubuh (tangan) dan materi fisik adalah mitra berpikir yang esensial (*extended mind*). Oleh karena itu, direkomendasikan kepada para pendidik untuk mengintegrasikan alat peraga manipulatif yang memberikan umpan balik sensorimotor dalam pembelajaran IPA untuk menciptakan pembelajaran yang bermakna, mendalam, dan kreatif di tingkat sekolah dasar.

DAFTAR REFERENSI

1. Adib, K. M., & Hestenes, D. (2017). The role of the body in conceptual change in physics education. *Physics Education Research Section (PER)*, 13(1), 010107.

2. Aktamis, H., & Ergin, O. (2021). The influence of Piaget's theory of cognitive development on science education: From concrete to formal operational thinking. *International Journal of Research in Education and Science (IJRES)*, 7(3), 856–868.
3. Barad, K. (2007). *Meeting the universe halfway: Quantum physics and the entanglement of matter and meaning*. Duke University Press.
4. Barsalou, L. W. (2010). Grounded cognition: Past, present, and future. *Topics in Cognitive Science*, 2(4), 716–724.
5. Bennett, J. (2010). *Vibrant matter: A political ecology of things*. Duke University Press.
6. Cattell, R. B. (1963). Theory of fluid and crystallized intelligence: A critical experiment. *Journal of Educational Psychology*, 54(1), 1–22.
7. Fragkiadaki, G., & Ravanis, K. (2021). Materiality and embodied learning in early childhood science education: A review. *European Journal of Education Studies*, 8(10).
8. Gallagher, S. (2017). *Enactivist interventions: Rethinking the mind*. Oxford University Press.
9. Glenberg, A. M., & Gallese, V. (2012). The embodied nature of language: Implications for education. *Educational Psychology Review*, 24(3), 381–392.
10. Kaufman, J. C., & Glaveanu, V. P. (Eds.). (2019). *The Cambridge handbook of creativity across domains*. Cambridge University Press.
11. Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan. (2020). *Peraturan Menteri Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2020 tentang Rencana Strategis Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Tahun 2020–2024*.
12. Kontra, K. J., Goldin-Meadow, S., & Beilock, S. L. (2019). Embodied cognition and STEM learning. In L. B. Resnick, I. C. S. R. L. R. K. W., & R. L. R. K. W. (Eds.), *The Cambridge handbook of the learning sciences* (3rd ed.). Cambridge University Press.
13. Malafouris, L. (2013). *How things shape the mind: A theory of material engagement*. The MIT Press.
14. Mangen, A. (2016). The digitization of literary reading: Contributions from empirical research. *Orbis Litterarum*, 71(3), 240–262.
15. Newen, A., de Bruin, L., & Gallagher, S. (Eds.). (2018). *The Oxford handbook of 4E cognition*. Oxford University Press.
16. Puspitasari, D. (2023). Tantangan guru dalam pengembangan media pembelajaran untuk meningkatkan kreativitas siswa sekolah dasar. *Jurnal Inovasi Pendidikan Dasar*, 7(1), 45–58.
17. Resnick, M. (2017). *Lifelong kindergarten: Cultivating creativity through projects, passion, peers, and play*. MIT Press.
18. Runco, M. A., & Jaeger, G. J. (2012). The standard definition of creativity. *Creativity Research Journal*, 24(1), 92–98.
19. Sari, Y., & Hidayat, R. (2024). Analisis kebutuhan *pop-up book* sebagai media pembelajaran IPA: Tinjauan dari perspektif guru. *Jurnal Pendidikan Sains*, 12(3), 112–125.
20. Senge, K., & He, X. (2020). The efficacy of manipulatives for teaching conceptual knowledge: A meta-analysis. *Review of Educational Research*, 90(2), 221–252.
21. Triona, L. M., & Klahr, D. (2013). The relative effectiveness of physical and virtual materials in engineering design projects. *Learning and Instruction*, 28, 1–15.
22. Varela, F. J., Thompson, E., & Rosch, E. (1991). *The embodied mind: Cognitive science and human experience*. The MIT Press.

23. Widyastuti, P. (2023). Pengaruh penggunaan alat peraga manipulatif terhadap pemahaman konsep IPA siswa kelas V SD. *Jurnal Pendidikan Dasar Nusantara*, 9(2), 150–165.