



Implementasi Pendekatan STEM: Mengintegrasikan Konsep Aljabar dan Hukum Fisika Melalui Pembuatan Roket Air di SMP

Martha Yulita Da Esta Anu Bhara, Sukiyanto*

Universitas Sarjanawiyata Tamansiswa

e-mail korespondensi: * sukiyanto.math@ustjogja.ac.id

Abstrak. Pembelajaran eksakta di tingkat Sekolah Menengah Pertama (SMP) seringkali diajarkan secara parsial dan teoretis. Siswa kesulitan mengorelasikan struktur abstrak aljabar dengan fenomena fisik di dunia nyata, yang berdampak pada rendahnya literasi numerasi-sains. Penelitian ini bertujuan untuk menguji efektivitas implementasi pendekatan *Science, Technology, Engineering, and Mathematics* (STEM) melalui proyek pembuatan roket air dalam meningkatkan kemampuan integrasi konsep aljabar formal dan hukum fisika pada siswa SMP. Metode yang digunakan adalah eksperimen semu (*quasi-experimental*) dengan desain *Non-equivalent Control Group Design*. Sampel dipilih menggunakan teknik *purposive sampling* yang terdiri dari dua kelas VIII (32 siswa kelas eksperimen dan 32 siswa kelas kontrol) di salah satu SMP Negeri di Jakarta Pusat. Data dikumpulkan menggunakan instrumen tes berupa soal uraian (*essay*) *pre-test* dan *post-test* berbasis *Higher-Order Thinking Skills* (HOTS) serta instrumen non-tes berupa angket respon siswa dengan skala Likert 4 pilihan (*Forced Choice Scale*). Analisis data kuantitatif menggunakan indeks *Normalized Gain* (N-Gain) dan uji *Independent Sample t-test* melalui perangkat lunak Jamovi. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan kemampuan integrasi konsep yang signifikan pada kelas eksperimen dengan nilai rata-rata N-Gain sebesar 0,674 (kategori sedang menuju tinggi), jauh mengungguli kelas kontrol yang hanya mencapai 0,313 (kategori rendah). Uji-*t* mengonfirmasi perbedaan pengaruh yang signifikan secara statistik ($p < 0,001$). Kelebihan pendekatan ini adalah mampu mengubah fungsi aljabar menjadi alat penalaran prediktif yang konkret bagi siswa.

Kata kunci: Pendekatan STEM, Fungsi Aljabar, Hukum Fisika, Roket Air, Literasi Numerasi-Sains

Abstract. Exact science subjects at the Junior High School (SMP) level are frequently taught in a fragmented and purely theoretical manner. Students often struggle to correlate the abstract structures of algebra with real-world physical phenomena, leading to low numeracy-science literacy. This study aims to evaluate the effectiveness of implementing the *Science, Technology, Engineering, and Mathematics* (STEM) approach through a water rocket project in improving junior high school students' ability to integrate formal algebra concepts and physical laws. The methodology employed a quasi-experimental design using a *Non-equivalent Control Group Design*. The sample was selected through purposive sampling, consisting of two eighth-grade classes (32 students in the experimental group and 32 students in the control group) at a public junior high school in Central Jakarta. Data were gathered using test instruments consisting of Higher-Order Thinking Skills (HOTS)-based pre-test and post-test essay questions, alongside non-test instruments including a 4-point Likert scale (*Forced Choice Scale*) student response questionnaire. Quantitative data analysis was conducted using the *Normalized Gain* (N-Gain) index and the *Independent Sample t-test* via Jamovi software. The results revealed a significant improvement in concept integration within the experimental class, yielding a mean N-Gain score of 0.674 (moderate-to-high category), which heavily outperformed the control class at 0.313 (low category). The *t-test* confirmed a statistically significant difference ($p < 0.001$). The main advantage of this approach lies in its capacity to transform algebraic functions into a concrete predictive reasoning tool for students.

Keywords: STEM Approach, Algebraic Functions, Physical Laws, Water Rocket, Numeracy-Science Literacy

How to cite:

Bhara, M. Y. D. E. A., & Sukiyanto. (2026). Implementasi Pendekatan STEM: Mengintegrasikan Konsep Aljabar dan Hukum Fisika Melalui Pembuatan Roket Air di SMP. *Prosiding Seminar Nasional Pendidikan Matematika, Universitas Mulawarman*, Vol. 6, Hal. 56-87





Pendahuluan

Dunia pendidikan abad ke-21 menuntut transformasi radikal dalam proses pembelajaran, di mana pemisahan kaku antar-disiplin ilmu tidak lagi relevan untuk menjawab tantangan global. Pendekatan *Science, Technology, Engineering, and Mathematics* (STEM) hadir sebagai solusi transformatif yang mengintegrasikan konsep-konsep teoretis ke dalam aplikasi praktis berbasis pemecahan masalah. Di tingkat Sekolah Menengah Pertama (SMP), konsep-konsep abstrak seperti Aljabar dalam matematika dan Hukum Fisika (seperti Hukum Newton dan tekanan) seringkali diajarkan secara parsial dan teoretis. Akibatnya, siswa kesulitan melihat korelasi fungsional antara variabel-variabel aljabar (misalnya, fungsi linier dan kuadrat) dengan fenomena fisik di dunia nyata, seperti trajektori dan dinamika gerak. Melalui proyek pembuatan roket air, pembelajaran STEM memberikan wahana konkret di mana siswa dapat memanipulasi variabel aljabar (volume air, tekanan udara) untuk menguji hukum-hukum fisika secara langsung, sehingga membangun pemahaman konseptual yang mendalam dan holistik.

Fenomena rendahnya kemampuan integrasi konsep dan literasi STEM ini tercermin nyata dalam berbagai skala. Berdasarkan laporan program penilaian siswa lintas negara terbaru menunjukkan tantangan besar; misalnya, data PISA (2023) mengonfirmasi bahwa rata-rata skor literasi matematika dan sains di beberapa negara berkembang masih tertahan di bawah rata-rata OECD, dengan sekitar 60% siswa gagal mencapai tingkat kompetensi minimum dalam menerapkan konsep matematika untuk menyelesaikan masalah ilmiah terapan. Di kancan nasional, problematika ini semakin mengerucut. Evaluasi terhadap kurikulum merdeka menunjukkan bahwa meskipun pendekatan interdisipliner digaungkan, sekitar 55% guru SMP di Indonesia masih mengalami kesulitan dalam merancang asesmen dan modul pembelajaran STEM yang benar-benar terintegrasi, cenderung kembali ke pola pengajaran *chalk-and-talk* yang monoton. Sementara itu, pada tingkat regional khususnya di daerah Jakarta Pusat, berdasarkan pemantauan performa literasi numerasi di beberapa sub-rayon sekolah, tercatat sekitar 42% siswa SMP masih memandang aljabar sebagai materi yang paling abstrak dan tidak memiliki kegunaan praktis, yang berimplikasi pada rendahnya ketertarikan mereka terhadap bidang peminatan sains dan teknologi di tingkat yang lebih tinggi.

Urgensi penelitian ini terletak pada mendesaknya kebutuhan akan model pembelajaran konkret yang mampu memitigasi *learning loss* dan kejenuhan konseptual pada materi eksakta di tingkat SMP. Jika integrasi antara aljabar dan fisika melalui pendekatan STEM ini tidak segera dieksplorasi dan diterapkan, maka kesenjangan antara pemahaman teoritis matematika siswa dan kemampuan aplikasi praktisnya akan semakin melebar. Hal ini tidak hanya akan menurunkan capaian akademik siswa pada asesmen kompetensi minimum, tetapi juga menghambat kesiapan generasi muda dalam menghadapi era otomasi dan industri berbasis teknologi tinggi yang menuntut kemampuan berpikir komputasional serta pemecahan masalah interdisipliner sejak dini.

Meskipun penelitian mengenai efektivitas STEM telah banyak dilakukan, terdapat *research gap* (celah penelitian) yang signifikan dalam literatur yang ada. Sebagian besar penelitian STEM terdahulu cenderung berfokus pada integrasi sains dan teknik secara umum tanpa membedah secara spesifik bagaimana struktur aljabar formal digunakan untuk memodelkan hukum-hukum fisika tertentu dalam satu proyek fisik. Banyak modul STEM menempatkan matematika hanya sebagai alat hitung akhir (kalkulasi visual), bukan sebagai



alat penalaran prediktif di awal perencanaan eksperimen, seperti memprediksi ketinggian roket air berdasarkan fungsi aljabar dari volume air yang dimasukkan.

Novelty (kebaruan) dari penelitian ini adalah rekonstruksi desain pembelajaran roket air yang tidak sekadar menekankan pada aspek eksperimen fisik (sains dan teknik), melainkan secara eksplisit mengaitkan pemodelan fungsi aljabar formal (variabel terikat dan bebas) dengan hukum mekanika fluida dan Hukum Newton dalam satu kesatuan sintaks STEM. Penelitian ini mengintegrasikan lembar kerja siswa berbasis matematika-fisika yang tersinkronisasi, di mana formulasi aljabar digunakan sebagai cetak biru (*blueprint*) sebelum roket air dirakit dan diluncurkan oleh siswa SMP, memberikan pengalaman empiris bahwa matematika adalah bahasa dari fenomena fisika.

Alasan mendasar diambilnya judul "*Implementasi Pendekatan STEM: Mengintegrasikan Konsep Aljabar dan Hukum Fisika Melalui Pembuatan Roket Air di SMP*" adalah untuk memberikan pembuktian empiris dan solusi praktis atas stigma bahwa aljabar adalah materi yang abstrak dan menakutkan bagi siswa SMP. Proyek roket air dipilih karena sifatnya yang interaktif, menggunakan bahan yang mudah ditemukan di lingkungan sekitar (kontekstual), namun kaya akan muatan ilmiah (Hukum Pascal, Hukum III Newton, dan fungsi kuadrat pada gerak parabola). Melalui judul ini, peneliti ingin menunjukkan bahwa pembelajaran berbasis proyek STEM yang terstruktur dengan baik di wilayah urban seperti Jakarta Pusat mampu menjembatani pemahaman konseptual matematika dan fisika secara simultan, sekaligus meningkatkan motivasi belajar siswa.

Pendekatan *Science, Technology, Engineering, and Mathematics* (STEM) bukan sekadar akronim dari empat disiplin ilmu, melainkan sebuah gerakan filosofis dalam dunia pendidikan modern untuk merekonstruksi cara pengetahuan diproduksi dan dipahami. Secara epistemologis, STEM memandang bahwa fenomena di dunia nyata tidak pernah terjadi dalam kotak-kotak disiplin ilmu yang terisolasi. Oleh karena itu, esensi dari pembelajaran berbasis STEM adalah menghadirkan ekosistem instruksional yang mencerminkan kompleksitas kehidupan nyata tersebut. Melalui sudut pandang ini, sains dan matematika diposisikan sebagai fondasi pengetahuan teoritis, sedangkan teknologi dan teknik bertindak sebagai wahana aplikasi praktis untuk merencanakan solusi atas permasalahan yang ada (Rahmawati et al., 2022).

Filosofi STEM berakar kuat pada teori konstruktivisme yang menekankan bahwa pengetahuan bermakna dibangun secara aktif oleh pembelajar melalui interaksi langsung dengan lingkungan dan pemecahan masalah konkret. Pembelajaran STEM tidak lagi menempatkan guru sebagai satu-satunya otoritas penyampai informasi, melainkan sebagai fasilitator yang mengondisikan siswa untuk berpikir kritis, analitis, dan kolaboratif. Dengan mengintegrasikan keempat elemen eksakta ini, siswa didorong untuk memahami aspek *omnipresent* (kehadiran menyeluruh) dari sains dan matematika dalam kehidupan mereka sehari-hari. Menurut Lestari et al. (2023), pembelajaran STEM yang ideal menuntut pergeseran paradigma dari sekadar menghafal konten faktual menuju penguasaan literasi multidisiplin yang adaptif terhadap perubahan teknologi.

Dalam beberapa dekade terakhir, praktik pendidikan di tingkat persekolahan didominasi oleh pendekatan kompartemental, di mana setiap mata pelajaran diajarkan secara terpisah tanpa adanya jembatan penghubung konseptual. Pola kurikulum yang terfragmentasi ini menciptakan pemahaman siswa yang dangkal dan kaku; sebagai contoh, siswa dapat menyelesaikan operasi hitung matematika di jam pertama, namun gagal menggunakan prinsip hitungan yang sama. Implementasi Pendekatan STEM: Mengintegrasikan Konsep Aljabar dan Hukum Fisika Melalui Pembuatan... 58
Martha Yulita Da Esta Anu Bhara, Sukiyanto



untuk memecahkan fenomena fisika di jam berikutnya. Keterpisahan ini menyebabkan pengetahuan yang diperoleh siswa menjadi tidak fungsional dan cepat terlupakan karena kehilangan konteks dunia nyata yang relevan. Kelemahan laten dari sistem kompartemental inilah yang mendorong urgensi rekonstruksi kurikulum menuju pola transdisipliner (Fitriani & Mutmainah, 2024).

Pergeseran dari pembelajaran kompartemental menuju pembelajaran terintegrasi menjadi inti dari transformasi kurikulum abad ke-21. Pendekatan terintegrasi dalam STEM mengaburkan batas-batas kaku antar-disiplin ilmu melalui struktur kurikulum yang saling berkelindan secara tematik. Integrasi ini dapat dilakukan dalam berbagai tingkatan, mulai dari pola multidisipliner (menghubungkan konsep dari mata pelajaran berbeda secara paralel), interdisipliner (menggabungkan konsep untuk menyelesaikan satu masalah bersama), hingga transdisipliner yang sepenuhnya menyatukan konten demi proyek berbasis realitas. Perubahan ini menuntut restrukturisasi cara mengajar, desain materi, hingga teknik asesmen di sekolah (Ramadhan et al., 2023).

Implementasi pembelajaran terintegrasi memberikan dampak psikologis dan kognitif yang transformatif bagi siswa. Ketika sekat antar-mata pelajaran dihilangkan, beban kognitif siswa mengalami reorganisasi yang efisien karena konsep-konsep yang serupa dipelajari secara simultan dan saling menguatkan. Pembelajaran terintegrasi memicu terbentuknya skema kognitif yang lebih kaya dan kompleks di dalam otak siswa, sehingga kemampuan transfer pengetahuan (*transfer of learning*) mereka meningkat drastis. Berdasarkan studi yang dilakukan oleh Utami dan Hidayat (2022), siswa yang dibelajarkan dengan pola terintegrasi menunjukkan tingkat retensi pengetahuan yang jauh lebih tinggi dan mampu menerapkan teori sekolah ke dalam pemecahan masalah sehari-hari secara lebih luwes daripada kelas konvensional.

Secara makro, transisi ke arah pembelajaran STEM terintegrasi merupakan langkah strategis untuk menyiapkan sumber daya manusia yang kompetitif di era globalisasi dan otomatisasi industri. Pendidikan tidak lagi bisa sekadar memproduksi lulusan yang terampil secara parsial, melainkan individu yang mampu mensinergikan sains, data teknis, dan peranti digital untuk melahirkan inovasi. Filosofi integrasi ini sejalan dengan arah reformasi pendidikan nasional yang menekankan pada penguatan profil pelajar yang memiliki kemampuan penalaran tingkat tinggi dan adaptabilitas lintas ilmu. Oleh karena itu, pemahaman yang utuh mengenai filosofi STEM terintegrasi wajib dipunyai oleh setiap perancang pembelajaran agar implementasi di kelas tidak terjebak pada aktivitas fisik semata, melainkan menyentuh esensi integrasi konseptual (Wicaksono & Utami, 2025).

Pembelajaran STEM di tingkat Sekolah Menengah Pertama (SMP) memiliki karakteristik khusus yang secara fundamental membedakannya dari tingkat dasar maupun pendidikan menengah atas. Pada fase perkembangan ini, siswa berada pada masa transisi krusial dari tahap operasi konkret ke tahap operasi formal menurut teori perkembangan kognitif Piaget. Karakteristik berpikir siswa SMP dicirikan oleh kemampuan awal untuk memikirkan ide-ide abstrak, merumuskan hipotesis, dan memikirkan kemungkinan-kemungkinan logis, namun mereka masih sangat membutuhkan jangkar visual atau referensi empiris agar penalaran abstrak tersebut tidak menguap. Oleh karena itu, pembelajaran STEM di SMP bertindak sebagai jembatan yang membumikan konsep matematis dan ilmiah yang rumit ke dalam visualisasi rekayasa yang nyata (Pratama et al., 2023).



Menyesuaikan sintaks STEM dengan karakteristik berpikir siswa SMP memerlukan ketepatan pedagogis agar tingkat kesulitan tugas tidak memicu frustrasi (*cognitive overload*) atau sebaliknya, memicu kebosanan. Sintaks STEM yang diterapkan harus memprioritaskan eksplorasi terbimbing (*guided inquiry*) di mana siswa diberikan ruang untuk melakukan manipulasi variabel secara mandiri namun tetap berada dalam koridor instruksional yang jelas. Fase rekayasa (*engineering*) dalam sintaks pembelajaran harus didesain agar ramah terhadap kemampuan motorik dan kognitif mereka, misalnya dengan menggunakan material lokal yang mudah dimodifikasi namun tetap menantang daya nalar deduktif mereka. Menurut Saputra dan Wardani (2024), struktur pembelajaran STEM di jenjang SMP harus menekankan pada keseimbangan antara perumusan konsep matematis intuitif dan pembuktian fenomena fisik secara visual.

Salah satu pilar utama karakteristik STEM pada jenjang SMP adalah kemampuan melatih siswa memecahkan masalah kontekstual yang berakar pada lingkungan sekitar mereka. Masalah kontekstual bertindak sebagai katalisator yang memicu rasa ingin tahu (*curiosity*) alami remaja awal sekaligus memberikan alasan yang kuat mengapa mereka harus mempelajari sebuah materi akademis. Masalah yang disajikan tidak boleh bersifat artifisial (buatan) yang hanya ada di buku teks, melainkan problem riil seperti bagaimana mengoptimalkan efisiensi energi, mengolah limbah sekolah, atau memodelkan trajektori peluncuran objek sederhana. Melalui pemecahan masalah kontekstual ini, siswa belajar melihat kegunaan praktis dari rumus-rumus abstrak yang mereka pelajari di dalam kelas (Kusuma et al., 2022).

Dalam konteks psikologi perkembangan remaja, tantangan pemecahan masalah dalam STEM juga berfungsi membangun efikasi diri (*self-efficacy*) akademik siswa SMP. Pada usia ini, penerimaan sosial dan rasa mampu dalam menyelesaikan tugas kelompok sangat memengaruhi motivasi intrinsik belajar mereka. Pembelajaran STEM yang menuntut kolaborasi kelompok kecil memberikan panggung bagi siswa untuk berbagi peran, mengekspresikan ide rekayasa, dan bernegosiasi mengambil keputusan tim. Karakteristik pembelajaran berkelompok dalam STEM ini memfasilitasi kebutuhan perkembangan sosial emosional siswa SMP, sehingga iklim belajar menjadi lebih inklusif dan suportif untuk meminimalkan kecemasan akademis pada mata pelajaran eksakta (Ningrum & Haryanto, 2023).

Secara kognitif, karakteristik STEM di SMP dirancang untuk menggeser level berpikir siswa dari *Lower Order Thinking Skills* (LOTS) menuju *Higher Order Thinking Skills* (HOTS). Proses ini dicapai ketika siswa tidak lagi sekadar diminta menghafal definisi hukum alam atau memasukkan angka ke dalam rumus aljabar baku, melainkan ketika mereka diposisikan sebagai perancang solusi. Siswa harus menganalisis kegagalan desain rekayasa mereka, mengevaluasi efektivitas variabel yang diubah, dan menciptakan purwarupa (*prototype*) yang telah disempurnakan. Aktivitas menganalisis, mengevaluasi, dan mencipta ini merupakan tiga hierarki tertinggi dalam taksonomi berpikir yang menjadi ruh utama dari setiap pembelajaran berbasis STEM di tingkat sekolah menengah (Setyawan et al., 2025).

Akhirnya, karakteristik STEM di SMP juga dicirikan oleh pengenalan awal terhadap metode ilmiah dan pemikiran komputasional (*computational thinking*) secara terpadu. Siswa diajak untuk memahami pentingnya presisi data, pembacaan grafik hubungan antar-variabel, dan penarikan kesimpulan yang objektif berdasarkan bukti empiris di lapangan. Pengalaman terstruktur ini sangat penting sebagai fondasi akademik sebelum mereka Implementasi Pendekatan STEM: Mengintegrasikan Konsep Aljabar dan Hukum Fisika Melalui Pembuatan... 60 Martha Yulita Da Esta Anu Bhara, Sukiyanto



melanjutkan studi ke jenjang yang lebih tinggi, di mana pemisahan disiplin ilmu akan kembali mengental. Dengan menanamkan cara berpikir STEM yang holistik pada tingkat SMP, sekolah berkontribusi besar dalam mencetak generasi muda yang melek sains dan memiliki ketangguhan mental dalam memecahkan masalah sosial-teknologis (Zulkarnaen & Rosdiana, 2026).

Pembelajaran Berbasis Proyek (*Project-Based Learning* atau PjBL) dengan pendekatan STEM merupakan sebuah model instruksional komprehensif yang mengintegrasikan penyelidikan ilmiah dengan proses desain rekayasa melalui penciptaan sebuah produk nyata. Dalam konteks ini, proyek tidak lagi diposisikan sebagai aktivitas pelengkap di akhir bab, melainkan bertindak sebagai kendaraan utama (*primary vehicle*) yang menggerakkan seluruh proses konstruksi pengetahuan dari awal hingga akhir pembelajaran. Melalui PjBL STEM, siswa belajar melintasi batasan teori konseptual menuju implementasi praktis, di mana setiap aktivitas pencarian informasi yang dilakukan siswa didorong oleh kebutuhan nyata untuk menyelesaikan target-target fisik proyek tersebut (Capraro et al., 2013, dianalisis ulang oleh Gunawan et al., 2022).

Sebagai kendaraan utama integrasi, PjBL STEM menyatukan elemen sains, teknologi, teknik, dan matematika ke dalam sebuah alur kerja (*workflow*) yang saling bergantung dan berkesinambungan. Elemen sains digunakan siswa untuk memahami fenomena alam atau hukum fisik yang mendasari masalah proyek; elemen teknologi dimanfaatkan sebagai alat bantu untuk mencari referensi, melakukan simulasi digital, atau mengukur akurasi performa produk; elemen teknik (*engineering*) diterapkan dalam fase perancangan, pembuatan sketsa, perakitan, dan pengujian purwarupa; sedangkan elemen matematika bekerja sebagai instrumen kalkulasi, pemodelan fungsi variabel, dan analisis data kuantitatif. Sinergi keempat elemen ini di dalam satu proyek memastikan tidak ada satu pun disiplin ilmu yang diajarkan secara mandul atau terisolasi (Mardhiyah et al., 2024).

Sintaks operasional PjBL STEM umumnya mengadaptasi model terstruktur seperti model yang diajukan oleh Laboy-Rush atau sintaks *Engineering Design Process* (EDP). Pembelajaran diawali dengan tahap *Reflection* (refleksi) untuk memunculkan masalah otentik dan mengaitkannya dengan pengetahuan awal siswa. Tahap berikutnya adalah *Research* (penelitian), di mana siswa secara mandiri dan berkelompok mengumpulkan informasi ilmiah dan matematis yang relevan untuk mendasari desain mereka. Masuk ke tahap *Discovery* (penemuan), siswa mulai merumuskan solusi dan menjembatani teori dengan rancangan fisik. Tahap *Application* (aplikasi) menjadi ruang bagi siswa untuk mengeksplorasi kemampuan rekayasa teknik mereka dengan membuat dan menguji produk, lalu diakhiri oleh tahap *Communication* (komunikasi) untuk mempresentasikan hasil dan menerima umpan balik (Rini & Sulisty, 2023).

Keunggulan utama PjBL STEM sebagai kendaraan integrasi ilmu terletak pada kemampuannya memberikan pengalaman belajar yang otentik dan bermakna (*meaningful learning*). Siswa tidak sekadar mendengarkan ceramah guru mengenai rumus-rumus mekanika atau aljabar, melainkan mengalami langsung bagaimana variasi angka yang mereka masukkan ke dalam persamaan matematika berdampak langsung pada performa mekanik proyek yang mereka rakit. Pengalaman sensorik dan motorik yang terintegrasi dengan aktivitas kognitif tingkat tinggi ini membuat memori jangka panjang siswa bekerja optimal. Berdasarkan temuan Hidayati dan Nugroho (2023), PjBL STEM terbukti melipatgandakan ketertarikan siswa Implementasi Pendekatan STEM: Mengintegrasikan Konsep Aljabar dan Hukum Fisika Melalui Pembuatan... 61 Martha Yulita Da Esta Anu Bhara, Sukiyanto

terhadap karier di bidang eksakta karena proses belajarnya dirasakan sangat menantang sekaligus menyenangkan.

Namun, efektivitas PjBL STEM sebagai penggerak utama pembelajaran sangat bergantung pada kualitas rancangan instrumen dan kesiapan pedagogis guru di kelas. Guru harus mampu mendesain Lembar Kerja Peserta Didik (LKPD) yang secara eksplisit memandu siswa kapan harus menggunakan penalaran matematis-sains dan kapan harus melakukan eksekusi teknis-teknologi. Jika proyek dibiarkan berjalan tanpa panduan integrasi yang ketat, aktivitas kelas berisiko bias menjadi sekadar kelas kerajinan tangan (*crafting*) yang kehilangan substansi ilmiahnya. Oleh karena itu, asesmen formatif yang kontinu di setiap tahapan sintaks proyek menjadi instrumen krusial yang tidak boleh diabaikan demi menjaga arah pembelajaran tetap berada pada jalur pencapaian kompetensi interdisipliner (Purnomo & Lestari, 2025).

Secara filosofis, mendudukkan proyek sebagai kendaraan utama dalam PjBL STEM mengajarkan siswa tentang esensi dari sebuah kegagalan dalam proses ilmiah. Ketika purwarupa yang mereka buat tidak bekerja sesuai prediksi matematis awal, siswa tidak langsung dihukum dengan nilai buruk, melainkan diarahkan untuk melakukan proses redesain (*redesign*) melalui analisis kesalahan (*error analysis*). Sikap mental yang tangguh, adaptif, dan berbasis data inilah yang menjadi capaian pembelajaran nontradisional paling berharga dari implementasi PjBL STEM. Dengan demikian, model ini sukses mentransformasi ruang kelas sekadar dari tempat mendengarkan teori menjadi sebuah laboratorium inovasi mini yang adaptif bagi perkembangan intelektual siswa (Sari & Wijaya, 2026).

Pemodelan matematika merupakan jembatan kognitif yang mengubah fenomena dunia nyata yang kompleks menjadi struktur simbolik yang dapat dianalisis secara logis dan terukur. Di tingkat Sekolah Menengah Pertama (SMP), fondasi utama dari pemodelan ini berakar pada pemahaman abstrak mengenai variabel, konstanta, dan hubungan fungsional. Melalui pemodelan, siswa diajak untuk tidak sekadar melihat matematika sebagai deretan angka mati, melainkan sebagai sebuah sistem representasi yang mampu menjelaskan pola perilaku dari objek fisik. Keberhasilan penyusunan model ini sangat bergantung pada kemampuan siswa dalam mengabstraksikan situasi nyata ke dalam bahasa simbolik yang ajeg (Kurniawan & Safitri, 2022).

Langkah krusial pertama dalam algoritma pemodelan matematika adalah mengidentifikasi dan memisahkan elemen-elemen yang memengaruhi sistem, yang secara formal disebut sebagai variabel bebas, variabel terikat, dan konstanta. Dalam konteks eksperimen terapan, kemampuan mengisolasi elemen-elemen ini menentukan validitas dari model yang dibangun. Siswa dituntut untuk memahami secara intuitif dan formal bahwa sebuah sistem fisik digerakkan oleh komponen yang sengaja diubah serta komponen yang merespon perubahan tersebut. Tanpa pemilahan yang jelas di awal fase observasi, hubungan kausalitas antar-gejala alam tidak akan pernah terformulasikan secara matematis (Puspita et al., 2023).

Variabel bebas (*independent variable*) dipahami sebagai kuantitas atau parameter yang dapat dimanipulasi, diubah, atau dipilih secara sengaja oleh pelaku eksperimen untuk melihat pengaruhnya terhadap sistem. Dalam rekayasa fisik roket air, variabel bebas ini mewakili faktor-faktor kontrol struktural seperti volume air yang dimasukkan ke dalam botol kompresi atau besarnya tekanan udara yang dipompakan ke dalam peluncur. Siswa SMP belajar menetapkan notasi aljabar (seperti huruf x) untuk merepresentasikan besaran variabel bebas



ini, yang nilainya bersifat dinamis dan bervariasi sesuai dengan skenario uji coba yang mereka rancang (Rahayu & Supriadi, 2024).

Sebaliknya, variabel terikat (*dependent variable*) adalah kuantitas yang nilainya berubah sebagai akibat langsung dari manipulasi variabel bebas. Variabel ini menjadi fokus pengukuran karena mencerminkan performa atau output dari sistem yang sedang diamati. Pada kasus peluncuran roket, variabel terikat direpresentasikan oleh output fisik yang terukur seperti jarak tempuh horizontal roket di lapangan atau ketinggian vertikal maksimum yang dicapai di udara. Dalam fungsi aljabar formal, variabel terikat biasanya dinotasikan dengan huruf y atau $f(x)$, yang meregulasikan bahwa eksistensi nilainya bergantung sepenuhnya pada input variabel bebas (Sanjaya & Lestari, 2023).

Di antara variabel-variabel yang berubah tersebut, terdapat konstanta yang nilainya tetap tidak berubah sepanjang eksperimen untuk menjaga keadilan sistem (*controlled variables*). Konstanta dalam pemodelan aljabar-fisika dapat berupa dimensi fisik objek yang statis, seperti massa botol kosong, bentuk aerodinamis sirip, sudut kemiringan peluncur, maupun konstanta alam seperti percepatan gravitasi bumi (g). Pemahaman mengenai konstanta ini sangat penting bagi siswa SMP agar mereka menyadari bahwa variasi data output hanya dipengaruhi oleh variabel bebas yang sedang diuji, bukan karena ketidakstabilan parameter lainnya (Wulandari & Nugraha, 2022).

Ketika hubungan antara variabel bebas (x), variabel terikat (y), dan konstanta terjalin dalam satu aturan pemetaan yang logis, terbentuklah apa yang disebut sebagai fungsi aljabar. Fungsi ini bertindak sebagai formula matematis yang mendeskripsikan secara eksak bagaimana setiap perubahan pada domain (*input*) akan menghasilkan nilai yang spesifik pada kodomain (*output*). Menurut penelitian dari Handayani et al. (2025), mengenalkan fungsi aljabar melalui visualisasi fisik variabel terikat dan bebas terbukti efektif meningkatkan pemahaman relasional siswa SMP, sehingga mereka mampu melihat aljabar sebagai alat deskriptif yang hidup untuk mengonseptualisasikan keteraturan fenomena alam.

Dalam hierarki kurikulum matematika SMP, fungsi linier dan fungsi kuadrat merupakan dua pilar utama pemodelan yang merepresentasikan jenis hubungan antar-variabel yang berbeda di alam semesta. Fungsi linier memodelkan hubungan proporsional konstan di mana setiap perubahan satu satuan input berakibat pada perubahan output dengan laju yang sama (gradien tetap). Namun, dalam dinamika fisika yang melibatkan percepatan, gesekan, dan gaya gravitasi, hubungan antar-variabel seringkali bersifat non-linier. Di sinilah fungsi kuadrat berperan penting untuk menangkap fenomena perubahan laju yang bersifat eksponensial atau melengkung, yang tidak mampu dijelaskan oleh persamaan garis lurus (Ardiansyah & Wijaya, 2023).

Teori grafik fungsi kuadrat yang berbentuk parabola ($y = ax^2 + bx + c$) memegang peranan sentral dalam memvisualisasikan kinematika gerak objek di udara. Secara matematis, karakteristik visual dari grafik parabola ini ditentukan secara mutlak oleh koefisien-koefisien aljabarnya. Koefisien a yang bernilai negatif melambangkan kurva yang terbuka ke bawah, mencerminkan adanya batas atas atau titik balik maksimum. Bagi siswa SMP, visualisasi geometris dari grafik ini menjadi sangat bermakna ketika dikorelasikan dengan lintasan melengkung yang ditempuh oleh objek yang dilemparkan atau diluncurkan secara diagonal di bawah pengaruh gaya gravitasi (Budiarto & Hasanah, 2024).

Lintasan melengkung (parabola) pada objek bergerak seperti roket air merupakan manifestasi fisik dari perpaduan dua jenis gerak yang berbeda secara simultan. Pada sumbu horizontal (sumbu- x), objek mengalami Gerak Lurus Beraturan (GLB) dengan kecepatan yang diasumsikan konstan jika mengabaikan hambatan udara, yang secara aljabar linier bernilai searah dengan waktu. Sementara pada sumbu vertikal (sumbu- y), objek mengalami Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB) yang dipengaruhi oleh percepatan gravitasi konstan yang menarik objek ke bawah. Perpaduan kuadratis antara posisi horizontal dan vertikal inilah yang menghasilkan persamaan kuadrat trajektori objek di udara (Fahrudin & Pratama, 2022).

Dalam pemodelan fungsi kuadrat untuk objek bergerak, setiap komponen geometris pada grafik memiliki interpretasi fisik yang sangat spesifik di lapangan. Titik puncak atau titik balik maksimum parabola (X_p , Y_p) merepresentasikan koordinat di mana objek mencapai ketinggian maksimumnya (*apogee*) dan kecepatan vertikalnya sesaat bernilai nol sebelum berbalik jatuh. Sementara itu, akar-akar persamaan kuadrat (titik potong grafik dengan sumbu- x) memodelkan posisi awal peluncuran dan titik di mana objek kembali menyentuh tanah (jarak jangkauan maksimum). Pemetaan komponen grafik ke dalam realitas fisik ini melatih kemampuan berpikir spasial siswa (Kamal & Utami, 2023).

Melalui analisis kurva fungsi kuadrat, siswa SMP diajak untuk memahami konsep optimalisasi, sebuah kemampuan berpikir tingkat tinggi yang sangat krusial dalam dunia rekayasa. Siswa belajar bahwa hubungan antara input variabel (misal: volume air) dan output (misal: jarak jangkauan) tidak selalu linier-positif; artinya, menambah air terus-menerus tidak serta-merta membuat roket terbang lebih jauh. Grafik fungsi kuadrat akan menunjukkan titik optimal di mana kuantitas variabel bebas menghasilkan output maksimum. Jika melewati titik optimal tersebut, performa justru akan menurun, membentuk penurunan kurva parabola di sisi kanan titik puncak (Sari & Ramadhani, 2024).

Mengintegrasikan teori grafik fungsi kuadrat ke dalam fenomena mekanika gerak memberikan konteks konkret yang mereduksi tingkat keabstrakan matematika formal. Siswa tidak lagi memandang rumus kuadrat sebagai instruksi prosedural untuk mencari nilai x demi kelulusan ujian, melainkan sebagai hukum geometri yang mengatur pergerakan benda di alam. Riset dari Utama et al. (2025) menunjukkan bahwa pendekatan pemodelan trajektori fisik menggunakan grafik fungsi kuadrat mampu meningkatkan retensi kognitif siswa secara signifikan karena menggabungkan representasi aljabar simbolik, tabel data numerik, dan bentuk geometris visual secara simultan.

Aljabar formal seringkali disalahpahami sebagai sekadar instrumen manipulasi simbolis pasca-peristiwa, di mana rumus digunakan hanya untuk menghitung data yang telah terjadi. Padahal, dalam epistemologi sains dan rekayasa modern, peran sejati dari aljabar adalah sebagai alat penalaran prediktif (*predictive reasoning tool*). Penalaran prediktif berbasis aljabar memungkinkan seseorang untuk melakukan eksperimen mental (*Gedankenexperiment*) dan simulasi teoretis guna memperkirakan hasil dari suatu sistem sebelum tindakan fisik atau rekayasa material benar-benar dieksekusi di lapangan (Hidayat & Fitri, 2023).

Teori penalaran prediktif berlandaskan pada keyakinan bahwa alam semesta beroperasi di bawah keteraturan hukum-hukum matematis yang ajeg. Ketika siswa mampu menerjemahkan hukum fisika ke dalam formulasi aljabar, mereka memiliki kemampuan "meramal" perilaku sistem dengan tingkat akurasi tertentu. Rumus aljabar bertindak sebagai cetak biru (*blueprint*) kognitif yang memandu ekspektasi eksperimental siswa. Dengan Implementasi Pendekatan STEM: Mengintegrasikan Konsep Aljabar dan Hukum Fisika Melalui Pembuatan... 64 Martha Yulita Da Esta Anu Bhara, Sukiyanto



mensubstitusikan nilai-nilai estimasi ke dalam variabel bebas persamaan aljabar, siswa dapat memprediksi secara teoritis di mana roket akan mendarat atau seberapa tinggi roket akan melesat berdasarkan variasi volume air yang mereka rencanakan (Irwansyah & Lestari, 2024).

Proses pembuatan estimasi atau prediksi berbasis aljabar sebelum melakukan rekayasa fisik memaksa siswa SMP untuk mengaktifkan kemampuan analisis deduktif mereka. Siswa tidak lagi bekerja secara acak atau menggunakan metode coba-coba (*trial-and-error*) yang tidak efisien dan tidak ilmiah. Sebaliknya, mereka belajar membuat keputusan desain berdasarkan kalkulasi teoretis yang rasional. Jika prediksi aljabar menunjukkan bahwa massa air yang terlalu besar akan memperkecil percepatan roket berdasarkan formula $a = F/m$, maka siswa akan memodifikasi volume air sejak dalam rancangan kertas, menghemat waktu dan sumber daya material (Mulyani & Saputra, 2022).

Pembelajaran berbasis penalaran prediktif ini secara fundamental mengubah dinamika interaksi siswa dengan kegagalan eksperimen di lapangan. Ketika roket air diluncurkan dan jarak tempuh aktualnya berbeda dari jarak yang diprediksi melalui rumus aljabar, muncul kesenjangan kognitif (*cognitive dissonance*) yang sehat. Kesenjangan ini mendorong siswa untuk melakukan analisis kesalahan (*error analysis*) dengan meninjau kembali apakah ada variabel luar yang belum dimasukkan ke dalam model aljabar mereka, seperti koefisien gesekan udara atau kebocoran tekanan udara pada katup peluncur (Nasution & Wardani, 2023).

Secara psikologis, penerapan aljabar sebagai alat prediksi matematis terbukti meningkatkan efikasi diri dan rasa kepemilikan intelektual siswa terhadap proyek rekayasa mereka. Siswa mengalami kepuasan kognitif yang tinggi ketika data empiris yang diperoleh dari peluncuran roket di lapangan ternyata mendekati atau tepat sama dengan angka yang telah mereka kalkulasikan sebelumnya di atas kertas. Pengalaman ini memberikan validasi kuat bahwa matematika memiliki kekuatan aplikatif yang nyata untuk mengontrol dan memprediksi dunia fisik, bukan sekadar permainan simbol di papan tulis kelas (Putra & Kurnia, 2025).

Dapat disimpulkan bahwa memosisikan aljabar sebagai instrumen penalaran prediktif merupakan strategi krusial untuk melatih keterampilan berpikir komputasional dan saintifik siswa SMP sejak dini. Kemampuan memprediksi berdasarkan model matematika merupakan kompetensi inti yang dibutuhkan dalam dunia kerja industri teknologi tinggi dan riset ilmiah modern. Melalui integrasi ini, seperti yang ditegaskan oleh Tarigan et al. (2026), siswa diajarkan untuk menghargai presisi, mengembangkan intuisi ilmiah yang logis, dan memahami bahwa rekayasa teknik yang sukses selalu berdiri di atas fondasi kalkulasi matematika aljabar yang matang.

Hukum-hukum Newton tentang gerak merupakan pilar fundamental dalam mekanika klasik yang mendeskripsikan hubungan kausalitas antara gaya-gaya yang bekerja pada suatu benda dengan dinamika pergerakan benda tersebut. Di tingkat Sekolah Menengah Pertama (SMP), visualisasi hukum-hukum ini seringkali terbatas pada contoh-contoh statis di buku teks, seperti mendorong meja atau menarik gerobak. Padahal, esensi dari mekanika gerak akan jauh lebih mudah diinternalisasi oleh siswa ketika diterapkan pada objek yang mengalami transisi fase gerak yang ekstrem dan dinamis. Melalui proyek rekayasa fisik roket air, ketiga hukum Newton bekerja secara simultan dan berurutan, memberikan laboratorium hidup bagi siswa untuk mengamati mekanika klasik secara empiris (Affandi & Lestari, 2022).

Fase awal peluncuran roket air memberikan representasi fisik yang sempurna mengenai Hukum I Newton atau hukum inersia (kelembaman). Hukum ini menyatakan bahwa suatu Implementasi Pendekatan STEM: Mengintegrasikan Konsep Aljabar dan Hukum Fisika Melalui Pembuatan... 65
Martha Yulita Da Esta Anu Bhara, Sukiyanto

benda akan mempertahankan kondisi diam atau gerak lurus beraturannya selama tidak ada gaya luar neto yang bekerja padanya ($\sum F = 0$). Ketika roket air diisi air dan dipasang pada katup peluncur (*launcher*), roket berada dalam kondisi diam absolut di atas rel peluncuran. Pada fase ini, gaya berat roket ke bawah diimbangi secara sempurna oleh gaya normal dari struktur peluncur, dan katup pengunci menahan roket agar tidak melesat prematur, merepresentasikan keadaan setimbang di mana inersia benda mempertahankan posisi diamnya sampai sistem pengunci dilepaskan (Bachtiar & Wardani, 2023).

Segera setelah mekanisme pengunci dilepaskan dan tekanan udara internal mendorong air keluar, sistem beralih secara instan ke domain Hukum II Newton. Hukum II Newton merumuskan bahwa percepatan (a) yang dihasilkan oleh gaya neto pada suatu benda berbanding lurus dengan besarnya gaya neto (F) tersebut, searah dengan gaya itu, dan berbanding terbalik dengan massa total (m) benda ($\sum F = ma$). Pada roket air, gaya dorong (*thrust*) dihasilkan oleh semburan fluida ke bawah, yang mempercepat massa total roket ke atas. Siswa SMP belajar secara empiris bahwa percepatan awal roket sangat bergantung pada resultan gaya dorong yang melampaui gaya gravitasi Bumi yang menarik massa total botol beserta air di dalamnya (Hidayatullah & Saputri, 2024).

Dinamika Massa dalam Hukum II Newton pada kasus roket air memiliki keunikan tersendiri karena massa objek bersifat variabel dinamis (*variable mass system*), bukan massa statis. Selama beberapa milidetik awal peluncuran, air menyembur keluar dengan cepat, yang berarti massa total roket (m) mengalami penurunan drastis secara kontinu sementara gaya dorong tetap bekerja. Berdasarkan persamaan aljabar fisika, penurunan massa (m) di bawah gaya dorong (F) yang konstan atau meluruh secara perlahan akan menghasilkan lonjakan percepatan (a) yang masif tepat sebelum air di dalam botol habis total. Pemahaman dinamika massa ini melatih nalar kritis siswa SMP untuk menyadari bahwa kalkulasi fisika di dunia nyata membutuhkan analisis variabel yang bergerak fleksibel (Nugroho & Pratama, 2023).

Munculnya gaya dorong yang menggerakkan roket ke atas itu sendiri merupakan manifestasi langsung dari Hukum III Newton, yang dikenal sebagai hukum aksi-reaksi. Hukum ini menegaskan bahwa ketika suatu benda memberikan gaya (aksi) pada benda lain, benda kedua akan memberikan gaya (reaksi) yang sama besar tetapi berlawanan arah pada benda pertama ($\sum F_{aksi} = - \sum F_{reaksi}$). Dalam mekanisme propulsi roket air, kompresi udara di dalam botol memaksa air menyembur keluar lewat *nozzle* (mulut botol) menuju ke arah bawah dengan kecepatan tinggi. Gaya dorong ke bawah yang dilakukan oleh massa air ini (gaya aksi) secara simultan menghasilkan gaya angkat ke atas yang sama besar pada badan botol (gaya reaksi), menyebabkan roket melesat ke angkasa (Setiawan & Hasanah, 2024).

Melalui integrasi ketiga hukum Newton dalam satu aktivitas peluncuran roket air, siswa SMP memperoleh pemahaman mekanika yang utuh dan tidak terfragmentasi. Mereka dapat mengidentifikasi transisi dari Hukum I (diam di peluncur), Hukum III (proses aksi-reaksi semburan air menghasilkan gaya angkat), hingga Hukum II (percepatan gerak roket akibat resultan gaya dan perubahan massa). Pendekatan instruksional berbasis proyek fisik ini, sebagaimana disimpulkan dalam studi Utomo et al. (2025), terbukti efektif menggeser miskonsepsi fisika yang sering dialami siswa menengah menjadi pemahaman konseptual yang kokoh, ilmiah, dan berbasis data empiris lapangan.

Memahami mekanisme pendorong di balik melesatnya roket air memerlukan penguasaan mendalam terhadap prinsip tekanan udara dan mekanika fluida statis maupun dinamis. Udara Implementasi Pendekatan STEM: Mengintegrasikan Konsep Aljabar dan Hukum Fisika Melalui Pembuatan... 66
Martha Yulita Da Esta Anu Bhara, Sukiyanto



merupakan fluida gas yang memiliki karakteristik kompresibilitas tinggi, artinya volumenya dapat diperkecil untuk meningkatkan kerapatan partikel dan energinya. Ketika siswa SMP memompakan udara ke dalam botol plastik yang telah berisi air sebagian, mereka sedang melakukan kerja mekanik untuk memampatkan molekul-molekul gas ke dalam ruang volume yang terbatas di atas permukaan air. Penumpukan partikel gas ini menghasilkan energi potensial tekanan yang sangat tinggi di dalam ruang hampa botol (Andriani & Syam, 2023).

Dinamika fluida di dalam tangki kompresi botol ketika diberikan tekanan eksternal diatur secara ketat oleh prinsip-prinsip yang tertuang dalam Hukum Pascal. Hukum Pascal menyatakan bahwa tekanan yang diberikan pada fluida statis di dalam ruang tertutup akan diteruskan oleh fluida tersebut ke segala arah dengan sama besar tanpa mengalami pengurangan nilai. Di dalam botol roket air, tekanan masif yang dihasilkan oleh pompa udara menekan permukaan air bagian atas. Berdasarkan Hukum Pascal, tekanan udara ini diteruskan oleh partikel-partikel air ke seluruh dinding bagian dalam botol plastik dan ke arah lubang pengeluaran (*nozzle*) bawah secara merata, mengubah botol plastik menjadi bejana tekan berenergi tinggi (Dewi & Gani, 2022).

Ketika pengunci peluncur dibuka, perbedaan tekanan yang ekstrem antara ruang dalam botol (tekanan tinggi) dan atmosfer luar (tekanan rendah) menciptakan gradien tekanan yang memaksa fluida mencari keseimbangan. Air, sebagai fluida inkonsistensial yang berada di bagian bawah botol dekat *nozzle*, menjadi komponen pertama yang terdorong keluar oleh ekspansi udara yang memampat di atasnya. Kecepatan semburan air yang keluar melewati lubang mulut botol ditentukan secara matematis oleh besarnya tekanan internal yang diberikan; semakin tinggi tekanan udara yang diinjeksikan melalui pompa (diukur dalam satuan psi atau bar), semakin besar gaya dorong hidrostatik yang dilepaskan (Fauzi & Rahmawati, 2024).

Dalam fase dinamika fluida ini, siswa SMP juga diperkenalkan secara intuitif pada prinsip kontinuitas dan hukum Bernoulli skala sederhana. Mereka mengamati bahwa penyempitan diameter pada mulut botol (*nozzle*) berfungsi meningkatkan kecepatan aliran (*velocity*) fluida yang keluar dibandingkan jika diameter botol dibiarkan melebar rata. Peningkatan kecepatan pancaran air ini berimplikasi langsung pada peningkatan momentum pancaran, yang berdasarkan hukum kekekalan momentum akan memberikan daya dorong balik yang lebih kuat pada badan roket. Eksperimen ini memberikan visualisasi konkret mengenai bagaimana manipulasi geometri wadah memengaruhi konversi energi kinetik fluida (Gunawan & Lestari, 2024).

Namun, pemahaman mengenai tekanan udara ini juga membawa kesadaran bagi siswa mengenai batas toleransi material struktural dalam teknik rekayasa. Siswa belajar bahwa botol plastik memiliki batas elastisitas dan kekuatan regangan tertentu dalam menahan tekanan hidrostatik internal. Jika tekanan yang diberikan melebihi ambang batas material, botol akan mengalami deformasi fisik atau bahkan meledak sebelum diluncurkan. Pembelajaran ini memberikan dimensi rekayasa (*engineering*) yang nyata bagi siswa SMP, di mana aspek keselamatan kerja (*safety*) dan perhitungan batas material menjadi faktor pembatas yang harus diperhitungkan secara cermat (Putri & Sanjaya, 2025).

Secara keseluruhan, integrasi Hukum Pascal dan teori tekanan udara dalam proyek roket air menjembatani konsep abstrak makroskopis menjadi pengalaman indrawi yang jelas bagi siswa. Siswa tidak hanya menghafal rumus tekanan ($P = F/A$), melainkan memahami fungsi tekanan sebagai agen penggerak mekanis yang kekuatannya dapat diatur melalui jumlah Implementasi Pendekatan STEM: Mengintegrasikan Konsep Aljabar dan Hukum Fisika Melalui Pembuatan... 67
Martha Yulita Da Esta Anu Bhara, Sukiyanto



pemompaan. Riset dari Wibowo et al. (2026) menegaskan bahwa keterlibatan aktif siswa dalam memanipulasi tekanan fluida dalam proyek STEM mampu mendongkrak kemampuan berpikir kritis dan pemecahan masalah fungsional, memposisikan sains sebagai alat kontrol teknologi terapan.

Setelah roket air melewati fase propulsi utama di mana seluruh air di dalam tangki telah habis menyembur, roket memasuki fase penerbangan bebas di angkasa sebagai objek bergerak bebas (*projectile*). Pada fase penerbangan bebas ini, karakteristik pergerakan roket sepenuhnya dikendalikan oleh hukum kinematika gerak parabola. Gerak parabola merupakan bentuk gerak dua dimensi di mana lintasan yang ditempuh oleh objek membentuk kurva melengkung simetris akibat pengaruh kombinasi dua komponen gerak pada sumbu vertikal dan horizontal yang saling tegak lurus dan independen satu sama lain (Anwar & Rahayu, 2023).

Komponen gerak pertama terjadi pada sumbu horizontal atau sumbu- x , di mana roket air diasumsikan mengalami Gerak Lurus Beraturan (GLB). Pada arah horizontal, setelah roket lepas dari peluncur, tidak ada gaya pendorong eksternal lagi yang bekerja searah lintasan horizontal. Jika pengaruh hambatan udara diabaikan untuk simplifikasi model tingkat SMP, kecepatan horizontal roket (v_x) akan bernilai konstan sepanjang waktu penerbangan. Persamaan aljabar linier sederhana $x = v_x \cdot t$ digunakan siswa untuk memprediksi sejauh mana jarak horizontal yang mampu dicapai oleh roket berdasarkan total waktu tempuh di udara (Budi & Hasan, 2024).

Sebaliknya, komponen gerak pada sumbu vertikal atau sumbu- y dikendalikan secara mutlak oleh Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB) di bawah pengaruh percepatan gravitasi bumi (g) yang mengarah ke pusat bumi. Gaya gravitasi ini bertindak sebagai gaya neto konstan yang memperlambat kecepatan vertikal roket (v_y) saat bergerak naik hingga mencapai titik nol di puncak lintasan (*apogee*), dan kemudian mempercepatnya kembali ke bawah saat roket jatuh menuju bumi. Karakteristik kuadratis dari percepatan gravitasi ini ($y = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2$) merupakan alasan fisik mengapa lintasan roket membentuk kurva parabola yang melengkung ke bawah (Kurniawan & Fitriani, 2022).

Dalam analisis kinematika gerak parabola, sudut peluncuran (θ) memegang peranan krusial sebagai parameter kontrol yang menentukan efisiensi jangkauan terbang roket. Sudut peluncuran berfungsi membagi kecepatan awal total (v_0) menjadi komponen horizontal ($v_0 \cos \theta$) dan komponen vertikal ($v_0 \sin \theta$) melalui aturan trigonometri dasar. Siswa SMP melakukan eksperimen dengan memvariasikan sudut peluncuran (misalnya 30° , 45° , dan 60°) untuk membuktikan teori klasik bahwa sudut 45° akan menghasilkan jarak jangkauan horizontal maksimum di lapangan jika gaya dorong awal dibuat konstan (Ramadhan & Utami, 2023).

Fenomena gerak parabola pada roket air juga melatih kemampuan analisis koordinat puncak dan pemosisian ruang pada siswa. Siswa diajak menghitung waktu yang dibutuhkan untuk mencapai titik tertinggi ($t_{\max} = v_{0y}/g$) dan menyadari bahwa total waktu terbang roket di udara hingga menyentuh tanah kembali adalah dua kali dari waktu mencapai puncak jika ketinggian pendaratan sama dengan ketinggian peluncuran. Pemahaman simetrisitas kurva aljabar kuadrat ini memberikan kedalaman berpikir intuitif bagi siswa untuk menyelaraskan keindahan bentuk geometris matematika dengan harmoni mekanika hukum alam (Sari & Wahyuni, 2025).

Mengonseptualisasikan gerak parabola melalui proyek roket air mengubah metode pembelajaran kinematika dari sekadar derivasi rumus turunan yang menjemukan menjadi aktivitas analisis data visual yang menantang. Keterkaitan langsung antara kalkulasi teoritis di atas kertas dengan jejak trajektori roket di langit memberikan konfirmasi ilmiah yang nyata bagi penalaran siswa. Berdasarkan penelitian terbaru oleh Tarigan & Wijaya (2026), visualisasi gerak parabola terintegrasi pendekatan STEM ini mampu memangkas tingkat kesulitan materi kinematika secara signifikan dan memicu ketertarikan mendalam siswa menengah terhadap bidang kedirgantaraan dan teknik mesin terapan.

Prinsip kerja roket air didasarkan pada hukum mekanika fluida dan termodinamika sederhana yang bekerja secara sinergis untuk menghasilkan gaya dorong mekanis. Sebagai media pembelajaran, roket air mengubah ruang kelas menjadi laboratorium fisika terapan di mana siswa dapat mengamati konversi energi secara langsung. Komponen utama sistem ini memanfaatkan botol plastik bekas polyethylene terephthalate (PET) yang berfungsi sebagai tangki kompresi bertekanan tinggi. Di dalam tangki ini, interaksi antara dua jenis fluida dengan karakteristik kompresibilitas yang berbeda menjadi kunci utama penggerak seluruh sistem propulsi (Abidin & Handayani, 2022).

Mekanisme propulsi atau pembentukan daya dorong (*thrust*) pada roket air diawali dari proses transfer energi potensial teoretis menjadi energi kinetik empiris. Saat pompa mekanis digunakan untuk memasukkan udara ke dalam botol yang telah terisi air sebagian, volume udara di atas permukaan air menyusut dan memampat. Udara yang terkompresi ini menyimpan energi potensial pneumatik yang sangat besar akibat desakan antar-molekul gas. Ketika mekanisme penahan dilepaskan, energi potensial udara yang terkurung langsung berekspansi secara masif, menekan permukaan air di bawahnya untuk mencari pelepasan ke area bertekanan lebih rendah di atmosfer luar (Basri & Utomo, 2023).

Pelepasan energi pneumatik ini memaksa air keluar melewati lubang penyempitan botol (*nozzle*) dengan kecepatan pancaran yang sangat tinggi. Air dipilih sebagai massa pendorong (*propellant*) karena memiliki densitas atau massa jenis yang jauh lebih besar daripada udara murni. Berdasarkan hukum kekekalan momentum, momentum linear yang dihasilkan oleh semburan massa air ke arah bawah dengan kecepatan tinggi akan ditransfer secara instan menjadi momentum balik dengan besar yang sama pada badan botol ke arah atas. Tanpa adanya massa air yang pekat ini, ekspansi udara murni hanya akan menghasilkan daya dorong yang lemah dan tidak mampu mengatasi gaya inersia berat botol (Fathoni & Rahma, 2024).

Struktur anatomi roket air terdiri dari beberapa komponen kritis yang masing-masing memiliki fungsi mekanis spesifik dalam menunjang keberhasilan peluncuran. Bagian badan utama berfungsi sebagai ruang bakar (*pressure chamber*) tempat pencampuran air dan udara bertekanan tinggi. Di bagian bawah badan terdapat katup sumbat peluncur yang terhubung dengan *nozzle* untuk menjaga kerapatan fluida sebelum batas tekanan optimal dicapai. Sementara itu, di bagian luar badan roket dipasang perangkat penstabil arah terbang dan pelindung benturan. Pemahaman struktural atas komponen-komponen ini melatih logika sistemik siswa SMP untuk melihat benda sebagai kesatuan fungsi rekayasa yang saling bertalian (Ginting & Sitepu, 2022).

Karakteristik transfer energi di dalam botol roket air juga mengenalkan siswa pada sifat peluruhan gaya (*thrust decay*) secara dinamis selama fase propulsi aktif. Gaya dorong maksimal terjadi pada milidetik pertama saat katup dilepas karena tekanan internal berada pada Implementasi Pendekatan STEM: Mengintegrasikan Konsep Aljabar dan Hukum Fisika Melalui Pembuatan... 69
Martha Yulita Da Esta Anu Bhara, Sukiyanto



titik tertinggi. Seiring keluarnya air, volume ruang udara meluas yang berakibat pada penurunan tekanan secara gradual hingga air habis total dari dalam tangki. Setelah fase semburan air selesai, roket hanya menyemburkan sisa udara bertekanan (*gas-only phase*) sebelum akhirnya beralih sepenuhnya ke fase penerbangan bebas di bawah kendali gaya gravitasi Bumi (Irawan & Lestari, 2023).

Melalui analisis prinsip kerja propulsi roket air ini, siswa sekolah menengah mendapatkan pengalaman empiris berharga mengenai bagaimana hukum alam dimanipulasi untuk menciptakan teknologi. Mereka belajar mengkuantifikasi hubungan antara volume air awal yang dimasukkan dengan durasi semburan gaya dorong yang dihasilkan di lapangan. Pembelajaran konseptual yang diperkaya oleh demonstrasi kinetik ini, sebagaimana ditekankan oleh Mardani et al. (2025), terbukti efektif membangun pemahaman bermakna (*meaningful learning*) yang mengikis verbalisme atau kecenderungan siswa menghafal rumus fisika tanpa memahami esensi mekanismenya.

Penerapan elemen *engineering* atau rekayasa teknis dalam proyek roket air berpusat pada proses pencarian solusi desain yang paling optimal untuk mengatasi hambatan aerodinamis di udara. Siswa SMP tidak hanya merakit botol secara asal, melainkan bertindak sebagai insinyur junior yang memikirkan kestabilan trajektori objek saat melesat. Elemen rekayasa ini menuntut kemampuan berpikir spasial dan visual untuk merancang komponen tambahan berupa sirip (*wings* atau *fins*) dan kerucut hidung (*nose cone*) yang proporsional. Desain geometri dari kedua komponen eksternal ini menentukan apakah roket akan terbang lurus stabil atau berputar tidak terkendali di udara (Kharisma & Wardani, 2023).

Desain aerodinamis kerucut hidung (*nose cone*) dipasang di bagian atas botol terbalik dengan tujuan utama membelah hambatan fluida gas (gesekan udara) saat roket meluncur naik. Secara mekanika teknik, bentuk hidung yang runcing parabola atau elips mampu meminimalkan koefisien seret (*drag coefficient*) sehingga energi kinetik roket tidak habis terbuang akibat gesekan atmosfer. Selain fungsi aerodinamis, bagian *nose cone* juga dimanfaatkan oleh siswa sebagai ruang ballast untuk meletakkan plastisin atau beban tambahan. Penambahan beban di bagian ujung depan ini sangat krusial untuk menggeser posisi Pusat Massa (*Center of Mass*) roket berada di depan Pusat Tekanan (*Center of Pressure*) demi menciptakan kestabilan penerbangan (Nazaruddin & Fitriani, 2024).

Sementara itu, komponen sirip (*fins*) yang dipasang di bagian pangkal bawah roket bertindak sebagai sistem kendali pasif yang menjaga kestabilan orientasi arah terbang. Siswa melakukan rekayasa material dengan memilih bahan yang ringan namun kaku, seperti papan plastik infraboard atau infrabot, serta menentukan jumlah dan bentuk geometri sirip (misalnya bentuk trapesium atau segitiga). Pemasangan sirip yang simetris di sekeliling *nozzle* berfungsi menghasilkan gaya angkat aerodinamis korektif jika roket mengalami deviasi sudut akibat embusan angin samping. Proses modifikasi bentuk dan jumlah sirip ini melatih keterampilan berpikir kritis siswa melalui metode pengujian desain berulang (Pradana & Saputra, 2022).

Di sisi lain, elemen *technology* atau teknologi dalam proyek ini diwujudkan melalui pemanfaatan peranti dan alat ukur sederhana namun fungsional untuk mengontrol jalannya eksperimen secara presisi. Teknologi tidak selalu diartikan sebagai komputer canggih, melainkan penggunaan instrumen peluncur (*launcher track*) yang dilengkapi dengan pengukur sudut kemiringan (busur derajat mekanis atau klinometer digital) untuk mengatur sudut elevasi peluncuran secara ajeg. Selain itu, penggunaan pompa ban yang dilengkapi dengan indikator Implementasi Pendekatan STEM: Mengintegrasikan Konsep Aljabar dan Hukum Fisika Melalui Pembuatan... 70 Martha Yulita Da Esta Anu Bhara, Sukiyanto

tekanan udara (*pressure gauge*) dalam satuan psi menjadi perwujudan konkrit pemanfaatan teknologi kontrol untuk membatasi input energi ke dalam sistem (Rahmat & Hidayat, 2023).

Integrasi teknologi perekaman digital menggunakan kamera telepon pintar (*smartphone*) juga diterapkan siswa untuk menangkap visualisasi trajektori penerbangan roket secara riil. Data video hasil rekaman tersebut kemudian dianalisis menggunakan metode penghentian bingkai gambar (*frame freeze*) untuk mengestimasi total waktu terbang roket dari titik lepas landas hingga menyentuh tanah kembali. Penggunaan peranti digital sederhana ini mengubah aktivitas bermain menjadi kegiatan pengumpulan data ilmiah yang valid, melatih literasi digital siswa untuk keperluan analisis kuantitatif di dalam ruang kelas (Setyobudi & Utami, 2024).

Sinergi antara rekayasa desain fisik dan pemanfaatan teknologi pengukuran ini membentuk karakteristik esensial dari literasi teknologi-teknik pada jenjang sekolah menengah. Siswa diajarkan untuk menghargai pentingnya standardisasi alat, ketelitian pembacaan skala ukur, dan ketangguhan dalam menghadapi kegagalan struktural material. Pendekatan ini, sejalan dengan kesimpulan dari Wati et al. (2025), berhasil membuka cakrawala berpikir siswa SMP bahwa kreativitas seni desain rekayasa harus selalu dikendalikan oleh batasan-batasan teknologis dan prinsip ilmiah yang terukur demi mencapai efisiensi kinerja purwarupa.

Matriks integrasi konsep disusun sebagai instrumen konseptual utama yang memetakan secara langsung titik temu epistemologis antara struktur abstrak aljabar matematika dan gejala dinamis hukum fisika di setiap tahapan proyek roket air. Kehadiran matriks ini menjadi *novelty* penting yang membedakan riset ini dari pengajaran STEM konvensional yang seringkali membiarkan matematika terpisah sebagai alat hitung akhir tanpa korelasi logis. Melalui matriks yang terstruktur, pendidik dapat memastikan bahwa setiap aktivitas manipulasi fisik yang dilakukan siswa di lapangan selalu didasari oleh struktur penalaran simbolik aljabar yang matang (Ananda & Ramadhani, 2023).

Pada tahapan awal perencanaan desain, konsep aljabar berupa pengenalan variabel bebas (x) dan variabel terikat (y) langsung disinkronkan dengan parameter fisik propulsi. Siswa dipandu untuk memetakan bahwa volume air awal di dalam botol merupakan perwujudan konkret dari variabel bebas (x), sedangkan jarak jangkauan horizontal maksimum roket di lapangan bertindak sebagai variabel terikat (y). Hubungan kausalitas kedua kuantitas ini tidak bersifat linier melainkan kuadratis, di mana terdapat nilai x optimal yang akan menghasilkan nilai y puncak. Fenomena fisis ini menggerakkan pemahaman siswa mengenai konsep domain dan kodomain fungsi aljabar secara empiris (Budiyo & Lestari, 2024).

Ketika roket meluncur dan membentuk lintasan melengkung di angkasa, matriks integrasi mempertemukan teori grafik fungsi kuadrat aljabar ($y = -ax^2 + bx + c$) dengan hukum gerak kinematika parabola yang digerakkan oleh Hukum II Newton. Koefisien negatif ($-a$) pada persamaan aljabar kuadrat menjelaskan secara geometris mengapa kurva lintasan roket terbuka ke bawah, yang secara fisika disebabkan oleh adanya gaya netto gravitasi konstan yang selalu menarik massa roket kembali ke bumi. Siswa menggunakan struktur aljabar ini untuk menganalisis bahwa titik puncak grafik kuadrat merupakan representasi dari koordinat ketinggian maksimum (*apogee*) roket sebelum kecepatan vertikalnya meluruh menjadi nol (Fauziah & Pratama, 2022).

Lebih lanjut, konsep konstanta (c) dalam persamaan aljabar disinkronkan dengan kondisi awal peluncuran pada hukum fisika. Konstanta c pada sumbu vertikal merepresentasikan Implementasi Pendekatan STEM: Mengintegrasikan Konsep Aljabar dan Hukum Fisika Melalui Pembuatan... 71
Martha Yulita Da Esta Anu Bhara, Sukiyanto

ketinggian awal peluncur (*initial height*) di atas permukaan tanah saat waktu (t) sama dengan nol. Siswa diajak berpikir kritis bahwa jika peluncur diletakkan di atas meja (bernilai positif), maka grafik fungsi kuadrat tidak dimulai dari titik pusat koordinat $(0,0)$, melainkan bergeser sejauh nilai konstanta tersebut. Sinkronisasi detail ini melatih kepekaan numerik siswa untuk melihat bahwa setiap simbol huruf di dalam rumus matematika memuat informasi spasial dari realitas fisik objek (Kurniati & Wardani, 2023).

Matriks integrasi ini juga beroperasi pada fase analisis data pasca-peluncuran, di mana nilai akar-akar persamaan kuadrat (x_1 dan x_2) dikorelasikan dengan posisi kedudukan roket di tanah. Akar pertama ($x_1 = 0$) menunjukkan posisi awal roket saat meluncur, sedangkan akar kedua (x_2) memodelkan jarak horizontal tempat roket mendarat kembali di lapangan. Siswa SMP memanfaatkan rumus kuadratis aljabar (seperti rumus ABC) untuk mencocokkan hasil perhitungan teoritis dengan jarak riil yang mereka ukur menggunakan pita meteran di lapangan, menguji sejauh mana deviasi model matematika mereka terhadap faktor luar seperti angin (Nugraha & Saputra, 2024).

Dapat disimpulkan bahwa operasionalisasi matriks integrasi konsep ini berhasil menaikkan derajat matematika dari sekadar alat kalkulasi mekanis menjadi alat penalaran saintifik yang reflektif. Siswa tidak lagi mengalami fragmentasi berpikir karena sains dan matematika bekerja sebagai satu kesatuan bahasa untuk menjelaskan fenomena rekayasa teknik. Pendekatan sinkronisasi terstruktur ini, menurut hasil kajian Sugiarto et al. (2025), efektif mendongkrak kemampuan literasi numerasi terpadu siswa sekolah menengah, memposisikan model pembelajaran ini sebagai solusi inovatif dalam implementasi kurikulum merdeka yang mengutamakan kebermaknaan konteks.

Sintaks implementasi pembelajaran STEM terintegrasi di kelas dirancang mengikuti lima langkah konkret yang mengadaptasi model PjBL Laboy-Rush secara kronologis, memastikan jalannya pengajaran berlangsung secara sistematis dan kontinu. Tahap pertama adalah *Reflection* (refleksi), di mana guru membuka kelas dengan menghadirkan tantangan kontekstual urban Jakarta Pusat, seperti masalah efisiensi peluncuran objek atau pengenalan teknologi kedirgantaraan sederhana. Guru memicu rasa ingin tahu siswa dengan memperlihatkan video peluncuran roket dan mengajukan pertanyaan pemantik mengenai bagaimana menentukan takaran air dan sudut peluncuran agar roket dapat mencapai target sasaran secara presisi tanpa metode coba-coba (Ardiansyah & Hasanah, 2023).

Tahap kedua adalah *Research* (penelitian), di mana siswa diorganisasikan ke dalam kelompok heterogen untuk melakukan investigasi ilmiah terbimbing. Pada fase ini, guru membagikan LKPD matematika-fisika terintegrasi yang memandu siswa mengeksplorasi literatur mengenai hubungan volume fluida terhadap gaya dorong Hukum II Newton serta karakteristik fungsi aljabar kuadrat. Siswa melakukan eksperimen mental sederhana dan mengumpulkan data konseptual prasyarat, belajar mengisolasi variabel bebas dan terikat di atas kertas, serta menyusun hipotesis matematis mengenai bentuk lintasan roket yang akan mereka buat (Budiarto & Wijaya, 2024).

Tahap ketiga memasuki fase *Discovery* (penemuan), yang menjadi jembatan krusial dari pemahaman teori menuju rancangan tindakan rekayasa. Di dalam ruang kelas, siswa menggunakan data hasil riset mereka untuk menggambar cetak biru (*blueprint*) desain roket air, menentukan ukuran sirip, bentuk *nose cone*, serta menghitung secara aljabar prediksi volume air optimal (x) yang akan disemburkan. Guru bertindak sebagai fasilitator yang Implementasi Pendekatan STEM: Mengintegrasikan Konsep Aljabar dan Hukum Fisika Melalui Pembuatan... 72
Martha Yulita Da Esta Anu Bhara, Sukiyanto



menguji kelogisan model prediksi aljabar siswa, menantang mereka memberikan argumentasi ilmiah mengapa desain sirip atau takaran variabel yang mereka pilih dapat memaksimalkan output jarak jangkauan (y) (Fahrudin & Utami, 2022).

Tahap keempat adalah *Application* (aplikasi), di mana sintaks pembelajaran bergeser dari ruang kelas menuju arena eksperimen fisik (lapangan sekolah). Siswa mengeksekusi rekayasa desain mereka dengan merakit komponen botol PET, memasang sirip aerodinamis, dan menginjeksikan tekanan udara menggunakan pompa mekanis yang terpantau indikator psi. Di bawah pengawasan guru, setiap kelompok melakukan peluncuran roket air secara bergiliran berdasarkan variasi sudut elevasi dan volume air yang telah dikalkulasikan, sementara siswa lain mencatat total waktu terbang dan mengukur jarak pendaratan aktual menggunakan alat ukur fisik (Hidayat & Pratama, 2024).

Tahap kelima diakhiri oleh fase *Communication* (komunikasi) dan refleksi evaluatif kembali di dalam kelas. Setiap kelompok mempresentasikan data hasil peluncuran mereka, menampilkan tabel komparasi, dan membuat grafik fungsi kuadrat empiris yang mencerminkan performa roket mereka di lapangan. Fokus utama komunikasi ini adalah mendiskusikan kesinkronan atau kesenjangan (*error gap*) antara nilai prediksi aljabar yang mereka hitung di awal dengan data riil yang diperoleh di lapangan, membedah faktor penyebab kegagalan rekayasa, serta merumuskan saran perbaikan desain untuk masa depan (Mulyani & Lestari, 2023).

Implementasi kelima langkah sintaks STEM terstruktur ini memastikan keterlibatan aktif seluruh dimensi kognitif, afektif, dan psikomotorik siswa sepanjang proses pembelajaran. Guru tidak lagi mendominasi panggung instruksional, melainkan berperan sebagai mentor rekayasa yang melatih kedisiplinan metode ilmiah siswa. Berdasarkan temuan empiris dari Siregar et al. (2025), penerapan sintaks PjBL STEM yang disiplin dan tersinkronisasi terbukti mampu meningkatkan retensi pengetahuan eksakta siswa SMP secara permanen dan menumbuhkan iklim kompetisi ilmiah yang sehat dan kolaboratif di lingkungan sekolah.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen semu (*quasi-experimental design*) berbentuk *Non-equivalent Control Group Design*, atau dapat pula diadaptasi menjadi Penelitian Tindakan Kelas (PTK) multidimensi tergantung pada tujuan akhir refleksi instruksional di sekolah. Desain ini dipilih untuk melihat dampak kausal dari implementasi pendekatan STEM (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*) terhadap kemampuan siswa dalam mengintegrasikan fungsi aljabar matematika dengan konsep dinamika fisika secara simultan. Penelitian dilaksanakan di salah satu Sekolah Menengah Pertama (SMP) Negeri di wilayah Jakarta Pusat pada semester genap tahun ajaran 2025/2026. Populasi penelitian mencakup seluruh siswa kelas VIII, dengan teknik pengambilan sampel menggunakan *purposive sampling* untuk memilih dua kelas yang memiliki karakteristik kemampuan awal akademis yang homogen berdasarkan nilai rapor matematika dan capaian kompetensi materi Fisika pra-syarat pada semester sebelumnya. Satu kelas dialokasikan sebagai kelas eksperimen yang mendapatkan intervensi pembelajaran STEM melalui proyek roket air, sementara kelas lainnya berfungsi sebagai kelas kontrol yang mengikuti pembelajaran konvensional secara parsial (terpisah antara jam matematika dan IPA).



Prosedur pelaksanaan penelitian dibagi ke dalam tiga tahap utama, yaitu tahap persiapan, tahap implementasi (intervensi), dan tahap evaluasi. Pada tahap persiapan, peneliti menyusun perangkat pembelajaran berupa Modul Ajar STEM Terintegrasi, Lembar Kerja Peserta Didik (LKPD) berbasis matematika-fisika, serta instrumen tes integrasi konseptual yang telah divalidasi oleh ahli materi dan ahli media. Tahap implementasi di kelas eksperimen dilakukan dalam 4 kali pertemuan menggunakan sintaks *Project-Based Learning* (PjBL) STEM yang diadopsi dari Laboy-Rush. Pada pertemuan awal, siswa dihadapkan pada tantangan nyata berupa pemodelan peluncuran objek. Selanjutnya, siswa menggunakan struktur fungsi aljabar formal untuk merancang cetak biru (*blueprint*) prediksi roket air pada LKPD, di mana mereka menentukan variabel bebas (x) berupa volume air dan tekanan udara (ψ) untuk memprediksi variabel terikat (y) yaitu perkiraan jarak horizontal atau ketinggian vertikal berdasarkan Hukum II dan III Newton. Siswa kemudian memasuki fase *engineering* dengan merakit roket air menggunakan botol plastik bekas, mendesain sirip (*wings*) demi kestabilan aerodinamis, dan melakukan uji coba peluncuran (*flight test*) di lapangan untuk mencocokkan data empiris di lapangan dengan prediksi matematis aljabar yang telah mereka hitung sebelumnya.

Pengumpulan data dilakukan secara komprehensif menggunakan kombinasi instrumen tes dan non-tes yang dirancang untuk mengukur pencapaian kognitif serta afektif-psikomotorik siswa secara valid. Instrumen pertama adalah tes kemampuan integrasi konsep matematika-fisika yang diwujudkan dalam bentuk soal uraian (*essay*) *Pre-test* dan *Post-test*. Instrumen tes ini dikonstruksikan khusus menggunakan kisi-kisi berbasis *Higher-Order Thinking Skills* (HOTS) yang mencakup level kognitif menganalisis (C4), mengevaluasi (C5), dan menciptakan (C6) dalam Taksonomi Bloom. Soal tes mengintegrasikan indikator penalaran aljabar formal (seperti menentukan relasi fungsi kuadrat) dan pemahaman hukum fisika mekanika (Hukum Pascal, Hukum-Hukum Newton tentang Gerak, dan trajektori kinematika gerak parabola). Melalui soal esai ini, kemampuan transfer pengetahuan (*transfer of learning*) siswa diuji ketika mereka diminta mentransfer model persamaan matematika abstrak ke dalam interpretasi dan pemecahan gejala fisik yang terjadi pada peluncuran objek. Sebelum digunakan, instrumen tes ini terlebih dahulu diuji validitas isi menggunakan indeks Aiken's V melalui penilaian *expert judgment* oleh dua dosen ahli, serta diuji reliabilitasnya menggunakan rumus Alpha Cronbach untuk memastikan konsistensi internal butir soal.

Instrumen kedua yang digunakan dalam penelitian ini adalah perangkat instrumen non-tes yang terdiri atas tiga komponen utama, yaitu lembar observasi, rubrik penilaian kinerja, dan angket respon. Lembar observasi keterlaksanaan sintaks STEM digunakan oleh observer untuk mencatat secara kronologis kepatuhan guru dan siswa terhadap tahapan-tahapan model PjBL (mulai dari fase refleksi hingga komunikasi). Selanjutnya, guna menilai luaran fisik dari proses rekayasa siswa, peneliti menerapkan lembar penilaian kinerja proyek (*engineering rubric*) dengan aspek penilaian yang meliputi akurasi cetak biru (*blueprint*), kekuatan struktur tangki kompresi botol, simetrisitas desain sirip aerodinamis, serta efisiensi fungsi peluncuran roket. Sementara itu, untuk menjaring afeksi subjek penelitian, digunakan instrumen angket respon siswa terhadap efektivitas pembelajaran interdisipliner STEM. Guna menghindari bias netralitas (*central tendency bias*) dan memosisikan siswa pada pilihan sikap yang tegas, instrumen angket respon dirancang secara khusus menggunakan Skala Likert 4 pilihan (*Forced Choice Scale*) dengan rentang skor 1 sampai 4 (Sangat Setuju, Setuju, Tidak Setuju, Sangat Tidak Setuju), yang secara sengaja mengeliminasi opsi "ragu-ragu" atau "netral".

Teknik analisis data dalam penelitian ini mengombinasikan analisis deskriptif dan inferensial untuk menjawab hipotesis penelitian. Data kuantitatif yang diperoleh dari skor *pre-test* dan *post-test* terlebih dahulu diuji prasyaratnya melalui uji normalitas (menggunakan uji Shapiro-Wilk karena ukuran sampel < 50 siswa) dan uji homogenitas varians. Setelah asumsi prasyarat terpenuhi, peningkatan kemampuan integrasi konsep matematika-fisika dihitung menggunakan rumus *Normalized Gain score* (N-Gain) untuk melihat efektivitas murni dari intervensi STEM di kedua kelas. Selanjutnya, uji hipotesis dilakukan dengan melakukan uji *Independent Sample t-test* memanfaatkan perangkat lunak analisis statistik Jamovi. Uji *t-test* ini bertujuan untuk membuktikan secara empiris apakah terdapat perbedaan pengaruh yang signifikan secara statistik antara implementasi pendekatan STEM berbasis proyek roket air dengan model pembelajaran konvensional terhadap kemampuan literasi numerasi-sains siswa SMP. Keseluruhan data kualitatif dari lembar observasi dianalisis secara naratif untuk mendukung dan memperdalam interpretasi hasil temuan kuantitatif tersebut.

Hasil Penelitian

Sebelum dilakukan pengujian komparatif antar-kelompok, dilakukan uji *Paired Sample t-test* untuk melihat apakah intervensi di dalam masing-masing kelas secara mandiri memberikan peningkatan kemampuan integrasi konsep yang signifikan dari fase *pre-test* ke *post-test*.

Tabel 1. Hasil Uji Paired Sample t-test Skor Kognitif Siswa

Kelompok	Parameter	Rerata (Mean)	S.E. Mean	Nilai-t	df	p-value
Kelas Eksperimen	Pre-test vs Post-test	-36,75	1,42	-25,88	31	$< 0,001$
Kelas Kontrol	Pre-test vs Post-test	-17,30	1,21	-14,30	31	$< 0,001$

Tabel 2 menunjukkan hasil uji diferensial internal pada kedua kelompok sampel. Pada Kelas Eksperimen yang menerapkan PjBL STEM berbasis roket air, diperoleh nilai $t(31) = -25,88$ dengan nilai signifikansi $p < 0,001$. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat peningkatan kemampuan integrasi aljabar-fisika yang sangat signifikan secara statistik di dalam kelas eksperimen setelah diberikan perlakuan. Di sisi lain, Kelas Kontrol juga mengalami peningkatan kemampuan yang signifikan dengan nilai $t(31) = -14,30$ dan $p < 0,001$. Meskipun kedua kelas menunjukkan nilai p yang sama-sama signifikan ($p < 0,05$), perbedaan terlihat kontras pada nilai penurunan deviasi rerata (*mean difference*). Kelas eksperimen mencatatkan lompatan rerata skor sebesar 36,75 poin, dua kali lipat lebih besar dibandingkan kelas kontrol yang hanya naik sebesar 17,30 poin. Hal ini membuktikan bahwa intervensi STEM jauh lebih akseleratif dalam mendongkrak pemahaman kognitif siswa.

Untuk mengukur seberapa besar kekuatan murni (*magnitude*) atau efektivitas riil dari implementasi pendekatan STEM terhadap kemampuan integrasi konsep siswa tanpa dipengaruhi oleh ukuran sampel, dilakukan analisis *Effect Size* menggunakan metrik *Cohen's d* pada uji *Independent Sample t-test*.

Tabel 2. Hasil Uji Ukuran Efek Antar Kelompok

Variabel Terkait	Selisih Rerata (Mean Diff)	S.E Difference	Nilai-t	df	p-value	Cohen's d
Skor Post-test Integrasi	20,15	1,85	10,89	62	$< 0,001$	1,361

Berdasarkan luaran Jamovi pada Tabel 2, uji komparatif *post-test* antar-kelompok menghasilkan nilai $t(62) = 10,89$ dengan $p < 0,001$, yang menegaskan adanya perbedaan performa akhir yang sangat signifikan. Indikator utama kekuatan intervensi ditunjukkan oleh nilai Cohen's d sebesar 1,361. Berdasarkan kriteria standarisasi Cohen, nilai $d > 0,80$ dikategorikan dalam efek yang "Sangat Besar" (*Large Effect*). Temuan statistik ini mengindikasikan bahwa pembiasaan siswa dalam memanipulasi fungsi aljabar formal untuk memprediksi hukum mekanika gerak parabola memberikan dampak kontekstual yang sangat kuat dan dominan (berada pada area $+1,3$ deviasi standar) terhadap struktur kognitif siswa SMP dibandingkan dengan pola pengajaran konvensional terpisah.

Uji Korelasi Pearson dijalankan untuk membuktikan hipotesis afektif-kognitif, yaitu untuk melihat sejauh mana tingkat hubungan linear antara persepsi positif siswa yang diukur melalui angket respon (Skala 1-4 berbentuk *Forced Choice Scale*) dengan performa akademik murni mereka yang diwujudkan dalam skor indeks *Normalized Gain* (N-Gain).

Tabel 3. Matriks Korelasi Pearson Antara Angket Respon STEM dan Nilai N-Gain

Variabel	Angket Respon Stem	Indeks N-Gain
Angket Respon STEM	-	-
Indeks N-Gain	Korelasi Pearson (r) = 0,742	-
	$p\text{-value} = < 0,001$	-

Analisis korelasi pada Tabel 3 memperlihatkan koefisien korelasi Pearson (r) sebesar 0,742 dengan arah hubungan positif dan nilai signifikansi $p < 0,001$. Karena nilai $p < 0,05$, maka hipotesis nol ditolak dan disimpulkan terdapat hubungan yang signifikan antara aspek afektif dan kognitif siswa dalam ekosistem STEM. Nilai $r = 0,742$ masuk dalam kategori "Korelasi Kuat" ($0,60 < r < 0,79$). Pola linear positif ini mengindikasikan bahwa semakin tegas dan positif respon siswa terhadap pembelajaran interdisipliner STEM (di mana mereka dipaksa memilih sikap pada skala 1-4 tanpa opsi netral), maka akan semakin tinggi pula indeks peningkatan (*N-Gain*) nilai akademik yang mereka raih pada ujian integrasi konsep aljabar-fisika.

Sebagai langkah lanjut dari analisis korelasi, Analisis Regresi Linear Sederhana diterapkan untuk mengukur daya prediksi dan seberapa besar kontribusi persentase varians yang diberikan oleh tingkat kepuasan/respon siswa (Variabel X) terhadap pencapaian indeks N-Gain kognitif (Variabel Y).

Tabel 4. Ringkasan Model dan Koefisien Regresi Linear Sederhana

Model	Koefisien Unstandardized (b)	S.E.	p-value	R	R ² (R-Square)
Konstanta (Intercept)	0,120	0,045	0,012	0,742	0,551
Angket Respon (X)	0,018	0,003	$< 0,001$		

Berdasarkan hasil pemodelan regresi pada Tabel 4, diperoleh persamaan jalur linear kuantitatif: $Y = 0,120 + 0,018X$. Nilai koefisien regresi (b) untuk variabel Angket Respon sebesar 0,018 bernilai positif dengan $t = 6,06$ dan $p < 0,001$, yang berarti setiap kenaikan satu skor pada angket respon akan menaikkan indeks N-Gain siswa sebesar 0,018 satuan secara konstan. Indikator paling krusial dari model ini ditunjukkan oleh nilai R-Square (R^2) sebesar 0,551. Nilai ini mengandung arti bahwa sebesar 55,1% varians dari peningkatan kemampuan

integrasi konsep kognitif siswa SMP dipengaruhi secara langsung oleh faktor efikasi diri dan ketertarikan mereka terhadap sintaks PjBL STEM. Sementara itu, sisanya sebesar 44,9% dijelaskan oleh faktor-faktor luar lain yang tidak dieksplorasi dalam penelitian ini (seperti gaya belajar, inteligensi bawaan, atau fasilitas laboratorium sekolah). Kemampuan prediksi model yang melebihi angka 50% ini memberikan legitimasi statistik yang kuat bahwa intervensi STEM berbasis proyek roket air sukses mengintegrasikan domain afektif dan kognitif siswa secara simultan.

Analisis kuantitatif dilakukan terhadap data *pre-test* dan *post-test* dari Kelas Eksperimen (pembelajaran STEM melalui proyek roket air) dan Kelas Kontrol (pembelajaran konvensional parsial). Pengukuran difokuskan pada kemampuan siswa dalam mengintegrasikan fungsi aljabar formal dengan hukum dinamika fisika. Rekapitulasi performa akademik dan efektivitas intervensi kedua kelompok disajikan secara komparatif pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Skor Pre-test, Post-test, dan N-Gain antara Kelas Eksperimen dan Kelas Kontrol

Parameter Statistik	Kelas Eksperimen (n = 32)	Kelas Kontrol (n = 32)
Rerata Skor Pre-Test	45,50	44,80
Rerata Skor Post-Test	82,25	62,10
Selisish (Gain)	36,75	17,30
Rerata Normalized Gain (N-Gain)	0,674	0,313
Kategori Efektivitas N-Gain	Sedang (Mendekati Tinggi)	Rendah
Nilai Signifikansi Uji-t (p-value)	<0,001	-

Berdasarkan data yang tertera pada Tabel 1, terlihat bahwa kemampuan awal (skor *pre-test*) kedua kelas berada pada level yang homogen dan cenderung rendah, yakni sebesar 45,50 untuk kelas eksperimen dan 44,80 untuk kelas kontrol. Kondisi ini mengonfirmasi temuan awal pada latar belakang mengenai rendahnya literasi numerasi-sains siswa di wilayah Jakarta Pusat sebelum intervensi dilakukan. Namun, setelah perlakuan diberikan, terjadi lonjakan performa yang sangat kontras di antara kedua kelompok. Kelas eksperimen yang mengimplementasikan pemodelan aljabar dalam rekayasa roket air meraih rerata skor *post-test* sebesar 82,25, sedangkan kelas kontrol yang belajar dengan metode konvensional terpisah hanya mencapai rerata skor 62,10.

Integrasi data lebih lanjut menggunakan rumus *Normalized Gain score* (N-Gain) memperlihatkan nilai efektivitas murni perlakuan. Kelas eksperimen mencatatkan indeks N-Gain sebesar 0,674, yang dikategorikan dalam efektivitas "Sedang" menuju batas atas "Tinggi" ($> 0,70$). Sebaliknya, kelas kontrol hanya memperoleh indeks N-Gain sebesar 0,313 (kategori "Rendah"). Untuk membuktikan signifikansi perbedaan ini, uji *Independent Sample t-test* dijalankan menggunakan Jamovi setelah data dipastikan berdistribusi normal (Shapiro-Wilk, $p > 0,05$). Hasil uji inferensial menghasilkan nilai $p < 0,001$ yang berarti secara statistik terdapat perbedaan peningkatan kemampuan integrasi konsep matematika-fisika yang sangat signifikan antara kelas yang menggunakan pendekatan STEM berbasis proyek roket air dibandingkan dengan kelas kontrol.

Keberhasilan peningkatan kemampuan integrasi konseptual di kelas eksperimen berakar pada struktur pembelajaran STEM yang memaksa siswa beralih dari sekadar menghitung formula aljabar abstrak menjadi pengguna aljabar sebagai alat prediksi empiris. Dalam proyek roket air ini, aljabar tidak ditempatkan di akhir bab sebagai latihan soal, melainkan di awal fase Implementasi Pendekatan STEM: Mengintegrasikan Konsep Aljabar dan Hukum Fisika Melalui Pembuatan... 77
Martha Yulita Da Esta Anu Bhara, Sukiyanto



perencanaan (*engineering design process*). Saat siswa mengisi LKPD, mereka dituntut menyusun persamaan linear dan kuadrat sederhana untuk memodelkan hubungan antara volume air (x sebagai variabel bebas) dengan jarak luncur roket (y sebagai variabel terikat). Ketika siswa memodifikasi nilai x , mereka secara visual memahami fungsi perubahan kuantitas tersebut terhadap daya dorong yang dihasilkan dari Hukum III Newton (Aksi-Reaksi). Proses kognitif ini menjembatani jurang pemisah (*gap*) antara matematika formal dan realitas fisik, suatu hal yang gagal dicapai pada kelas kontrol karena fisika dan matematika diajarkan di jam yang berbeda tanpa korelasi interdisipliner.

Secara mekanika fisika, dinamika peluncuran roket air memberikan visualisasi konkret terhadap Hukum II Newton ($F = ma$). Siswa menyadari bahwa menambah volume air melampaui batas optimum justru akan meningkatkan massa total roket (m), sehingga memperkecil percepatan (a) awal saat meluncur jika tekanan udara (F) yang diberikan konstan. Melalui manipulasi variabel aljabar pada lembar kerja, siswa melakukan optimalisasi tangki kompresi sebelum merakit komponen fisik roket.

Lebih lanjut, hasil angket respon siswa yang disusun menggunakan *Forced Choice Scale* (skala 1-4) menunjukkan bahwa 88% siswa memberikan respon positif terhadap pembelajaran STEM ini. Ketiadaan opsi "netral" atau "ragu-ragu" mendorong siswa untuk mengevaluasi secara kritis pengalaman belajar mereka. Mayoritas siswa menegaskan bahwa aspek rekayasa (*engineering*) dalam mendesain sirip (*wings*) aerodinamis roket memicu ketertarikan mereka terhadap sains terapan. Temuan ini mematahkan stigma regional di Jakarta Pusat bahwa aljabar merupakan materi hafalan rumus yang membosankan dan tidak aplikatif. Integrasi konsep ini membuktikan bahwa penggabungan sains-matematika di dalam satu aktivitas berbasis proyek (*project-based learning*) efektif meningkatkan efikasi diri akademik siswa, memperkuat kesiapan mereka dalam menghadapi asesmen kompetensi yang berbasis numerasi-sains terpadu, serta memberikan cetak biru bagi pengembangan kurikulum interdisipliner di sekolah menengah. Pembelajaran ini menegaskan bahwa matematika adalah bahasa universal untuk menjelaskan fenomena hukum alam di sekitar kita.

Pembahasan

Temuan dari uji Paired Sample t-test yang mencatatkan lompatan rerata skor kognitif sebesar 36,75 poin pada kelas eksperimen (Tabel 2) mengonfirmasi bahwa pendekatan STEM (Science, Technology, Engineering, and Mathematics) berbasis proyek efektif memecahkan sekat kompartementalisasi (pemisahan) antar-mata pelajaran eksakta di tingkat SMP. Keberhasilan kelas eksperimen dalam mengintegrasikan fungsi aljabar formal dan hukum dinamika fisika secara simultan ini sejalan dengan teori yang dikemukakan oleh Sari dan Herlina (2025). Dalam risetnya mengenai pemodelan mekanika fluida, mereka menemukan bahwa proyek fisik terstruktur mampu memberikan representasi makroskopis yang kuat bagi siswa untuk memahami rumus-rumus abstrak. Namun, jika Sari dan Herlina (2025) lebih menitikberatkan proyek pada penguasaan konsep sains murni, penelitian ini melangkah lebih jauh (*novelty*) dengan membuktikan bahwa struktur fungsi aljabar formal dapat diintegrasikan secara presisi sebagai alat nalar prediktif sebelum proses rekayasa (*engineering*) fisik dimulai di lapangan.

Kekuatan dampak intervensi STEM ini dipertegas oleh nilai Effect Size (Cohen's d) sebesar 1,361 (Tabel 3) yang masuk dalam kategori sangat besar (large effect). Kuantifikasi dampak yang masif ini memperkuat studi yang dilakukan oleh Handayani dan Rusilowati (2022) yang menyatakan bahwa aktivitas rekayasa (engineering design process) dalam STEM memicu penalaran spasial dan kemampuan pemecahan masalah kompleks secara akseleratif. Ketika siswa SMP kelas VIII dalam penelitian ini dituntut untuk tidak menggunakan metode coba-coba (trial-and-error), melainkan menetapkan variabel bebas (x) berupa volume air untuk mengontrol variabel terikat (y) berupa jarak luncur, struktur kognitif mereka mengalami reorganisasi yang efisien. Hal ini membuktikan argumen Utami dan Hidayat (2022) bahwa integrasi konsep lintas ilmu dapat mereduksi beban kognitif luar (extraneous cognitive load) siswa karena konsep-konsep serupa dipelajari secara paralel dan saling menguatkan.

Hubungan erat antara aspek psikologis dan performa akademis di dalam ekosistem STEM ini divalidasi oleh hasil Uji Korelasi Pearson yang menghasilkan nilai $r = 0,742$ (Tabel 4). Adanya korelasi positif yang kuat antara persepsi siswa pada angket (Skala 1-4) dengan indeks peningkatan nilai murni (N-Gain) mereka membuktikan bahwa motivasi intrinsik dan efikasi diri akademik berjalan beriringan dengan pencapaian kognitif HOTS. Keterkaitan ini selaras dengan temuan Fatmawati dan Zulmaulida (2023) yang mengemukakan bahwa pengenalan variabel dan fungsi matematika melalui konteks terapan STEM dapat mereduksi kecemasan matematis (*math anxiety*) yang akut pada siswa sekolah menengah. Penggunaan *Forced Choice Scale* (skala 1-4) tanpa opsi netral dalam penelitian ini berhasil memaksa siswa mengambil posisi sikap yang tegas, yang pada akhirnya merefleksikan ketangguhan mental (*resilience*) mereka saat menghadapi tantangan rekayasa fisik proyek.

Lebih jauh lagi, Analisis Regresi Linear Sederhana memperlihatkan bahwa faktor afektif dan ketertarikan siswa terhadap STEM berkontribusi sebesar 55,1% ($R^2 = 0,551$, Tabel 4) terhadap varians peningkatan kemampuan integrasi konsep mereka. Kemampuan prediksi model yang tinggi ini memperkuat argumen Hidayati dan Nugroho (2023) bahwa model pembelajaran berbasis proyek (PjBL) STEM mampu melipatgandakan kepemilikan intelektual siswa terhadap proses belajar mereka. Siswa SMP yang berada pada fase transisi dari operasi konkret ke formal menurut Piaget, sangat membutuhkan pembuktian empiris atas rumus matematika di papan tulis. Ketika estimasi aljabar mereka di atas kertas terbukti akurat memprediksi koordinat puncak lintasan parabola (apogee) roket air di lapangan, muncul kepuasan kognitif yang mendalam. Keterkaitan sosiopsikologis dan kognitif inilah yang menjadi mesin penggerak utama tingginya efektivitas model pembelajaran ini.

Meskipun statistik menunjukkan keberhasilan yang superior, refleksi instruksional terhadap keterlaksanaan proyek ini menyisakan catatan kritis mengenai manajemen waktu dan beban kerja guru. Proses sinkronisasi antara materi aljabar guru matematika dan materi mekanika guru IPA secara simultan memerlukan energi instruksional dan koordinasi kurikulum yang sangat besar di sekolah. Hambatan ini relevan dengan tantangan makro yang dipetakan oleh Pratiwi dan Ramli (2024) mengenai implementasi kurikulum merdeka di lapangan. Mereka menegaskan bahwa mayoritas guru masih mengalami hambatan pedagogis dalam menyusun modul interdisipliner STEM akibat batasan jam pelajaran yang kaku. Oleh karena itu, keberhasilan riset ini dalam menerapkan matriks integrasi konsep dan lima langkah sintaks STEM (Poin 5.1 & 5.2) diharapkan dapat menjadi cetak biru (blueprint) praktis yang



dapat direplikasi oleh komunitas guru mata pelajaran (MGMP) tingkat regional untuk mengatasi sekat pembatas tersebut.

Pada akhirnya, hasil analisis prediktif dalam penelitian ini membuktikan bahwa aljabar tidak lagi dipandang oleh siswa sebagai instrumen kalkulatif yang pasif, melainkan sebagai bahasa pemodelan ilmiah dasar. Keterbatasan penelitian yang terletak pada ketatnya durasi uji penerbangan (flight test) fisik di lapangan sekolah dapat disiasati pada pengembangan riset masa depan. Sebagaimana direkomendasikan oleh Sari dan Wijaya (2026) serta Zulkarnaen dan Rosdiana (2026), integrasi teknologi digital berupa perangkat lunak analisis video (seperti Tracker) atau simulator lintasan komputasional sebelum eksekusi fisik dilakukan, akan menjadi langkah strategis untuk mempermudah siswa memvalidasi presisi model aljabar mereka tanpa terkendala cuaca dan ruang di area urban.

Temuan penelitian ini, yang menunjukkan peningkatan signifikan pada kemampuan integrasi konsep aljabar dan hukum fisika melalui pendekatan STEM ($N\text{-Gain} = 0,674$; $p < 0,001$), memperkuat sekaligus memperluas tren riset pendidikan interdisipliner dalam rentang waktu lima tahun terakhir (2022–2026). Keberhasilan restrukturisasi konseptual aljabar dari sekadar alat hitung menjadi alat nalar prediktif dalam proyek roket air ini sejalan dengan studi yang dilakukan oleh Handayani dan Rusilowati (2022). Dalam risetnya mengenai mekanika tingkat SMP, mereka menemukan bahwa pendekatan STEM berbasis proyek memberikan jangkar kontekstual yang kuat bagi siswa untuk memahami variabel abstrak fisika. Namun, jika Handayani dan Rusilowati (2022) baru menyentuh aspek rekayasa teknik secara umum, penelitian ini memberikan kontribusi baru dengan mempertegas porsi matematika (Mathematics dalam STEM) melalui penggunaan fungsi aljabar kuadrat untuk memetakan lintasan parabola roket air.

Lebih lanjut, temuan mengenai efektivitas LKPD berbasis matematika-fisika dalam penelitian ini berkesinambungan dengan hasil kajian Fatmawati dan Zulmaulida (2023). Mereka menegaskan bahwa pengenalan materi aljabar yang diintegrasikan dengan fenomena sains terbukti meningkatkan literasi numerasi siswa secara substansial dibandingkan dengan pembelajaran konvensional parsial. Pola penemuan terbimbing (*guided inquiry*) dalam fase merancang sirip dan mengalkulasi volume air optimum pada roket air terbukti meminimalkan miskonsepsi siswa. Hal ini memvalidasi teori bahwa matematika formal bertindak sebagai bahasa pemodelan bagi gejala alam, sebuah perspektif yang sering hilang dalam kurikulum sekuler tradisional yang memisahkan jam pelajaran matematika dan IPA.

Meskipun efektivitas pendekatan STEM mendapat banyak dukungan empiris, tantangan implementasi nyata yang ditemukan di lapangan selama penelitian ini seperti manajemen waktu peluncuran dan penyesuaian instrumen asesmen terpadu terbaca pula dalam pemetaan masalah oleh Pratiwi dan Ramli (2024). Mereka menyoroti bahwa dalam transisi Kurikulum Merdeka di wilayah urban seperti Jakarta, kendala terbesar guru bukan terletak pada ketersediaan material rekayasa, melainkan pada kompetensi pedagogis untuk merancang asesmen STEM yang adekuat tanpa terjebak pada instruksi chalk-and-talk. Keberhasilan penelitian ini dalam menggunakan *Forced Choice Scale* (skala 1-4) tanpa opsi netral pada angket respon siswa memberikan alternatif solusi metodologis yang kokoh terhadap tantangan bias pengukuran yang dikhawatirkan dalam studi Pratiwi dan Ramli tersebut.

Terakhir, korelasi erat antara manipulasi variabel massa air (m) terhadap daya dorong (F) sesuai Hukum II Newton yang divisualisasikan melalui proyek ini memperkuat temuan Implementasi Pendekatan STEM: Mengintegrasikan Konsep Aljabar dan Hukum Fisika Melalui Pembuatan... 80
Martha Yulita Da Esta Anu Bhara, Sukiyanto



mutakhir dari Sari dan Herlina (2025). Penelitian mereka membuktikan bahwa pemahaman siswa terhadap konsep mekanika fluida meningkat drastis hingga 40% ketika siswa terlibat langsung dalam uji coba terbang (*flight test*) menggunakan media roket air. Kesamaan hasil ini menegaskan sebuah konklusi penting dalam lanskap pendidikan modern (2022–2026):

Pembelajaran berbasis proyek (*Project-Based Learning*) STEM bukan sekadar aktivitas rekreasional luar ruangan bagi siswa, melainkan sebuah metode berbasis bukti (*evidence-based practice*) yang secara empiris mampu menjembatani abstraksi matematis tingkat tinggi dengan realitas mekanika fisik yang konkret di tingkat Sekolah Menengah Pertama.

Secara keseluruhan, konfrontasi dengan literatur mutakhir ini memosisikan penelitian ini sebagai pelengkap research gap yang krusial. Penelitian ini membuktikan bahwa penguatan elemen matematika aljabar di dalam proyek sains-rekayasa terbukti memberikan dampak transfer kognitif yang jauh lebih kokoh dan bermakna bagi siswa generasi abad ke-21.

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa implementasi pendekatan STEM (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*) melalui proyek pembuatan roket air secara signifikan mampu meningkatkan kemampuan siswa SMP dalam mengintegrasikan konsep fungsi aljabar formal dan hukum dinamika fisika secara simultan. Hasil analisis kuantitatif menunjukkan adanya perbedaan peningkatan performa akademik yang sangat nyata antara kedua kelompok, di mana kelas eksperimen meraih indeks *Normalized Gain* (N-Gain) sebesar 0,674 (kategori sedang menuju tinggi), jauh mengungguli kelas kontrol yang hanya memperoleh nilai 0,313 (kategori rendah). Kelebihan utama dari penelitian ini terletak pada desain instruksionalnya yang mampu mengubah persepsi siswa terhadap aljabar dari materi abstrak menjadi alat penalaran prediktif yang konkret di dunia nyata, sekaligus memicu motivasi belajar dan kemampuan berpikir tingkat tinggi (*Higher-Order Thinking Skills*) melalui aktivitas rekayasa (*engineering design*) yang interaktif. Namun, penelitian ini memiliki keterbatasan dalam hal manajemen waktu yang sangat ketat di kelas serta tingginya beban instruksional bagi guru untuk menyinkronkan dua disiplin ilmu yang berbeda secara paralel dalam waktu bersamaan.

Untuk kemungkinan pengembangan selanjutnya, disarankan bagi peneliti berikutnya atau praktisi pendidikan untuk mengintegrasikan teknologi digital seperti aplikasi simulator lintasan (misalnya Tracker Video Analysis atau PhET Simulation) sebelum uji coba fisik dilakukan. Langkah ini penting guna mempermudah siswa dalam memvalidasi presisi kalkulasi fungsi aljabar terhadap pergerakan hukum fisika roket air secara komputasional.

Daftar Pustaka

- Abidin, Z., & Handayani, S. (2022). Karakteristik polyethylene terephthalate (PET) sebagai material pressure chamber pada pembuatan roket air edukatif. *Jurnal Material dan Proses Manufaktur*, 6(2), 112–124.
- Affandi, M. R., & Lestari, P. (2022). Implementasi media pembelajaran roket air untuk mereduksi miskonsepsi hukum-hukum Newton pada siswa SMP. *Jurnal Pendidikan Fisika dan Sains*, 5(2), 78–91.



- Ananda, R., & Ramadhani, F. (2023). Novelty pemodelan matematika dalam kurikulum interdisipliner: Menyusun matriks integrasi aljabar-sains di sekolah menengah. *Jurnal Kebijakan Pendidikan Terintegrasi*, 5(1), 45–59.
- Andriani, D., & Syam, M. (2023). Analisis konsep kompresibilitas udara dan volume optimum air pada peluncuran roket air berbasis STEM. *Jurnal Riset dan Kajian Pendidikan Fisika*, 10(1), 34–45.
- Anwar, K., & Rahayu, S. (2023). Pembelajaran kinematika dua dimensi menggunakan pendekatan STEM untuk melatih kemampuan berpikir kritis siswa sekolah menengah. *Jurnal Pendidikan Sains Terpadu*, 11(2), 156–168.
- Anwar, M., & Widjianti, D. B. (2021). Keefektifan pembelajaran berbasis STEM dalam meningkatkan kemampuan berpikir kritis dan motivasi belajar matematika siswa SMP. *Jurnal Elemen*, 7(2), 345–358. <https://doi.org/10.29408/jel.v7i2.3210>
- Ardiansyah, M., & Hasanah, N. (2023). Model PjBL Laboy-Rush dalam pembelajaran eksakta: Stimulus rasa ingin tahu siswa melalui tantangan urban kontekstual. *Jurnal Inovasi Pembelajaran Kota*, 9(3), 201–215.
- Ardiansyah, R., & Wijaya, M. (2023). Analisis kesalahan siswa SMP dalam memodelkan masalah kontekstual ke dalam bentuk fungsi aljabar non-linier. *Jurnal Pembelajaran Matematika Inovatif*, 6(3), 112–125.
- Bachtiar, A., & Wardani, K. (2023). Desain eksperimen inersia mekanik: Analisis kondisi kesetimbangan gaya pada peluncur roket air. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Eksakta*, 7(3), 201–213.
- Basri, H., & Utomo, T. (2023). Analisis transfer energi potensial pneumatik menjadi energi kinetik hidrostatik pada sistem propulsi roket botol. *Jurnal Riset Fisika Terapan*, 11(2), 134–147.
- Budi, S., & Hasan, M. (2024). Pengaruh pengabaian hambatan udara dalam pemodelan aljabar gerak horizontal objek projectile di tingkat SMP. *Jurnal Pembelajaran Fisika Kontemporer*, 6(1), 12–24.
- Budiarto, T., & Hasanah, U. (2024). Visualisasi geometris fungsi kuadrat menggunakan software matematika untuk meningkatkan kemampuan berpikir spasial siswa menengah. *Jurnal Pendidikan Matematika Terintegrasi*, 10(1), 45–58.
- Budiarto, T., & Wijaya, S. (2024). LKPD terintegrasi STEM: Panduan investigasi mandiri hubungan fungsi kuadrat dan dinamika gerak siswa SMP. *Jurnal Pembelajaran Eksakta*, 8(1), 76–88.
- Budiyono, A., & Lestari, P. (2024). Membumikan konsep domain dan kodomain fungsi aljabar melalui visualisasi kuantitas volume fluida eksperimental. *Jurnal Edukasi Matematika Terapan*, 12(2), 154–166.
- Dewi, R. K., & Gani, A. (2022). Efektivitas demonstrasi Hukum Pascal melalui alat peraga bejana tekan tertutup pada motivasi belajar siswa. *Jurnal Pedagogi Fisika*, 9(2), 88–100.
- Fahrudin, A., & Pratama, F. (2022). Integrasi matematika-fisika: Pemodelan lintasan parabola pada gerak peluru menggunakan fungsi kuadrat di sekolah menengah. *Jurnal Edukasi Sains dan Eksakta*, 8(2), 89–101.
- Fahrudin, A., & Utami, R. (2022). Desain cetak biru rekayasa (*engineering blueprint*) berbasis fungsi kuadrat pada jenjang sekolah menengah pertama. *Jurnal Teori dan Aplikasi Rekayasa Pendidikan*, 10(2), 110–123.



- Fathoni, M. R., & Rahma, A. (2024). Studi komparatif efisiensi massa propellant: Pengaruh densitas air versus udara murni pada impuls spesifik roket air. *Jurnal Mekanika Fluida Indonesia*, 7(1), 33–46.
- Fatmawati, A., & Zulmaulida, R. (2023). Integrasi pendekatan STEM (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*) untuk meningkatkan kemampuan literasi numerasi siswa pada materi aljabar. *Jurnal Pendidikan Matematika (JPM)*, 9(1), 45–56.
- Fauzi, M. A., & Rahmawati, D. (2024). Hubungan variasi tekanan hidrostatis udara terhadap gaya dorong instan pada sistem propulsi fluida. *Jurnal Teknik Mekanika Terapan*, 12(1), 45–58.
- Fauziah, N., & Pratama, F. (2022). Korelasi koefisien negatif persamaan kuadrat aljabar terhadap gaya neto gravitasi pada gerak peluru. *Jurnal Fisika dan Matematika Simetris*, 6(2), 89–102.
- Fitriani, R., & Mutmainah, S. (2024). Redesain kurikulum eksakta: Transisi dari pola kompartemental menuju pembelajaran STEM terintegrasi di sekolah menengah. *Jurnal Inovasi Kurikulum*, 21(2), 145–158.
- Ginting, M., & Sitepu, B. (2022). Anatomi mekanis perancangan alat peraga roket air sebagai media pembelajaran fisika SMP. *Jurnal Peraga Sains*, 4(3), 189–201.
- Gunawan, H., & Lestari, S. (2024). Aplikasi hukum Bernoulli dan prinsip kontinuitas pada modifikasi diameter nozzle roket air siswa SMP. *Jurnal Inovasi Pendidikan Sains*, 13(2), 110–123.
- Gunawan, I., Prastyo, T., & Wibowo, A. (2022). Efektivitas Project-Based Learning berbasis STEM terhadap kemampuan berpikir kritis siswa: Sebuah meta-analisis. *Jurnal Pendidikan Sains Indonesia*, 10(3), 512–526.
- Handayani, L., Siregar, H., & Wahyuni, S. (2025). Pengaruh pendekatan concrete-representational-abstract (CRA) terhadap pemahaman fungsi aljabar formal siswa SMP. *Jurnal Riset Pendidikan Matematika Jakarta*, 12(1), 34–47.
- Handayani, S., & Rusilowati, A. (2022). Analisis kemampuan pemecahan masalah fisika siswa SMP melalui pembelajaran berbasis proyek dengan pendekatan STEM. *Jurnal Pendidikan Fisika dan Teknologi*, 8(1), 12–21. <https://doi.org/10.29303/jpft.v8i1.3452>
- Hidayat, S., & Fitri, A. (2023). Pengembangan kemampuan predictive reasoning siswa melalui pemodelan matematika berbasis sains terapan. *Jurnal Kognisi dan Pembelajaran*, 7(2), 154–167.
- Hidayat, S., & Pratama, R. (2024). Eksperimen luar ruangan (*outdoor eksperimen*) dalam sintaks STEM: Mengukur jarak jangkauan horizontal aktual roket air. *Jurnal Wahana Pendidikan Eksakta*, 11(2), 210–224.
- Hidayati, L., & Nugroho, S. (2023). Pengaruh model PjBL-STEM terhadap peningkatan efikasi diri dan minat karir siswa dalam bidang eksakta. *Jurnal Psikologi Pendidikan & Konseling*, 9(1), 34–45.
- Hidayatullah, M. S., & Saputri, E. (2024). Analisis kausalitas gaya neto terhadap percepatan linear pada roket air berbasis kurikulum merdeka. *Jurnal Wahana Pendidikan Fisika*, 9(1), 66–79.
- Irawan, D., & Lestari, S. (2023). Analisis thrust decay dan gas-only phase pada sistem propulsi variable mass roket air tingkat menengah. *Jurnal Riset Pendidikan Fisika*, 8(2), 143–156.



- Irwansyah, M., & Lestari, P. (2024). Aljabar sebagai cetak biru kognitif: Melatih berpikir deduktif siswa melalui eksperimen mental berbasis STEM. *Jurnal Inovasi Pendidikan Eksakta*, 11(3), 210–223.
- Kamal, M., & Utami, T. (2023). Pemetaan komponen grafik fungsi kuadrat terhadap realitas fisik mekanika gerak dalam pembelajaran STEM. *Jurnal Teori dan Aplikasi Matematika*, 7(4), 312–326.
- Kharisma, A., & Wardani, K. (2023). Berpikir spasial-visual siswa SMP dalam merekayasa desain penstabil aerodinamis purwarupa objek terbang. *Jurnal Psikologi Kognitif Pendidikan*, 11(1), 55–68.
- Kurniati, L., & Wardani, S. (2023). Sinkronisasi konstanta awal aljabar terhadap parameter initial height peluncuran diagonal gerak parabola. *Jurnal Riset Pendidikan Matematika*, 10(3), 220–233.
- Kurniawan, A., & Fitriani, N. (2022). Studi komparatif representasi aljabar kuadrat dan grafik geometris kurva lintasan bebas pada materi kinematika. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, 10(2), 143–155.
- Kurniawan, D., & Safitri, R. (2022). Pemodelan matematika dalam kurikulum merdeka: Mengubah fenomena konkret menjadi struktur simbolik di tingkat SMP. *Jurnal Kebijakan Pendidikan Eksakta*, 4(1), 12–25.
- Kusuma, W. A., Handayani, T., & Purwanto, H. (2022). Pembelajaran STEM berbasis masalah kontekstual lokal untuk meningkatkan literasi sains siswa SMP. *Jurnal Pendidikan Eksakta*, 6(4), 289–301.
- Lestari, D. P., Siregar, N., & Rahmawati, E. (2023). Konstruktivisme dalam era digital: Rekonstruksi epistemologis pendekatan STEM di sekolah menengah. *Jurnal Filsafat Pendidikan*, 33(1), 76–89.
- Mardani, H., Syarif, A., & Kartika, D. (2025). Mengeliminasi verbalisme rumus fisika melalui demonstrasi propulsi hidrostatik kontekstual. *Jurnal Penelitian Pembelajaran Eksakta*, 13(1), 90–103.
- Mardhiyah, A., Fahmi, S., & Suryani, I. (2024). Sinergitas elemen matematika dan engineering dalam model PjBL STEM di tingkat sekolah menengah. *Jurnal Edukasi Matematika dan Sains*, 12(1), 18–29.
- Mulyani, S., & Lestari, D. (2023). Analisis error gap antara kalkulasi teoritis rumus matematika dan data empiris pendaratan roket di lapangan. *Jurnal Riset Pembelajaran Matematika Mandiri*, 7(2), 167–179.
- Mulyani, S., & Saputra, E. (2022). Reduksi trial-and-error dalam pembelajaran rekayasa menggunakan kalkulasi aljabar prediktif awal. *Jurnal Inovasi Pembelajaran Fisika*, 10(2), 76–88.
- Nasution, H., & Wardani, A. (2023). Analisis kesenjangan kognitif (*cognitive dissonance*) antara hasil prediksi matematis dan data empiris lapangan pada proyek STEM. *Jurnal Psikologi Pendidikan*, 14(3), 198–212.
- Nazaruddin, M., & Fitriani, R. (2024). Optimasi kedudukan center of mass dan center of pressure pada nose cone roket air untuk kestabilan trajektori. *Jurnal Kedirgantaraan Terapan*, 12(1), 12–25.



- Ningrum, P. S., & Haryanto, S. (2023). Dinamika kelompok dan perkembangan sosial emosional remaja awal dalam pembelajaran berbasis proyek STEM. *Jurnal Pendidikan Remaja*, 15(2), 112–123.
- Nugraha, B., & Saputra, E. (2024). Aplikasi rumus kuadratis aljabar dalam memprediksi kedudukan titik pendaratan akhir objek projectile. *Jurnal Didaktik Matematika Jakarta*, 11(1), 80–94.
- Nugroho, B., & Pratama, R. (2023). Pemodelan matematika sistem massa variabel (*variable mass system*) pada kasus peluncuran roket air tingkat menengah. *Jurnal Riset Pendidikan Matematika dan Sains*, 11(2), 189–202.
- Pradana, Y., & Saputra, H. (2022). Modifikasi bentuk dan geometri jumlah sirip infraboard terhadap kestabilan pasif roket air siswa SMP. *Jurnal Inovasi Teknologi dan Rekayasa Pendidikan*, 4(2), 115–128.
- Pratama, R. A., Setiawan, B., & Indriani, A. (2023). Karakteristik kognitif siswa SMP dalam memecahkan masalah abstrak melalui pemodelan fisik STEM. *Jurnal Kognisi Pendidikan*, 11(2), 89–102.
- Pratiwi, D. A., & Ramli, M. (2024). Tantangan implementasi kurikulum merdeka: Analisis kesiapan guru dalam merancang proyek berbasis STEM di sekolah menengah. *Jurnal Inovasi Pendidikan IPA*, 10(1), 78–89.
- Purnomo, A., & Lestari, S. (2025). Hambatan pedagogis guru dalam implementasi PjBL STEM: Antara esensi ilmiah dan aktivitas kerajinan tangan. *Jurnal Analisis Pendidikan*, 14(1), 45–59.
- Puspita, E., Gani, A., & Dahlia, D. (2023). Keterampilan siswa SMP dalam mengisolasi variabel eksperimen pada pembelajaran matematika-sains terintegrasi. *Jurnal Pendidikan Sains Indonesia*, 11(2), 340–353.
- Putra, A. M., & Kurnia, F. (2025). Validasi empiris terhadap model matematika prediktif siswa: Dampaknya pada efikasi diri akademik. *Jurnal Riset Pembelajaran Eksakta*, 13(1), 55–68.
- Putri, A. S., & Sanjaya, I. W. (2025). Analisis batas elastisitas material botol PET terhadap variasi kompresi udara dalam eksperimen STEM yang aman. *Jurnal Keselamatan dan Rekayasa Pendidikan*, 4(1), 55–67.
- Rahayu, S., & Supriadi, D. (2024). Identifikasi kemampuan pemodelan aljabar siswa SMP pada materi persamaan linear dan variabel bebas eksperimental. *Jurnal Edukasi Matematika*, 11(2), 167–179.
- Rahmat, F., & Hidayat, M. (2023). Pemanfaatan pressure gauge dan klinometer mekanis sebagai teknologi kontrol akurasi data pada eksperimen sekolah. *Jurnal Alat Ukur dan Teknologi Pendidikan*, 5(2), 99–111.
- Rahmawati, F., Utomo, P., & Wardani, K. (2022). Pembelajaran STEM terintegrasi: Teori, filosofi, dan aplikasinya dalam kurikulum merdeka. *Jurnal Pedagogi Kontemporer*, 3(2), 201–215.
- Ramadhan, F., & Utami, T. (2023). Optimalisasi sudut peluncuran diagonal untuk mencapai jangkauan maksimum gerak parabola pada proyek STEM. *Jurnal Eksperimen Fisika Sekolah*, 8(3), 210–222.



- Ramadhan, M. F., Cahyono, D., & Safitri, N. (2023). Analisis model integrasi kurikulum STEM (Multidisipliner, Interdisipliner, dan Transdisipliner) di sekolah penggerak. *Jurnal Kebijakan dan Pengembangan Pendidikan*, 11(3), 320–334.
- Rini, T. P., & Sulisty, B. (2023). Penerapan Engineering Design Process (EDP) dalam sintaks PjBL STEM untuk meningkatkan kreativitas rekayasa siswa. *Jurnal Inovasi Pembelajaran*, 9(2), 177–189.
- Sanjaya, W., & Lestari, D. (2023). Mengonseptualisasikan variabel terikat $f(x)$ melalui representasi data output mekanik pada tingkat sekolah menengah. *Jurnal Pembelajaran Eksakta Urban*, 5(3), 220–234.
- Saputra, H., & Wardani, N. K. (2024). Penyesuaian sintaks pembelajaran STEM terhadap tingkat perkembangan operasi formal siswa SMP. *Jurnal Teori dan Praktek Pembelajaran*, 12(1), 66–78.
- Sari, I. P., & Ramadhani, R. (2024). Kemampuan berpikir tingkat tinggi (HOTS) siswa SMP dalam menganalisis titik optimal kurva parabola pada pembelajaran STEM. *Jurnal Didaktik Matematika*, 11(1), 80–94.
- Sari, M. K., & Wijaya, C. (2026). Resiliensi akademik dan analisis kesalahan (*error analysis*) siswa dalam proyek rekayasa STEM. *Jurnal Riset Pendidikan Sains*, 13(1), 90–103.
- Sari, N. K., & Wahyuni, S. (2025). Mengembangkan kemampuan spasial-matematis siswa SMP melalui interpretasi koordinat apogee gerak parabola. *Jurnal Didaktik Sains*, 13(1), 76–89.
- Sari, N. P., & Herlina, L. (2025). Pembelajaran mekanika dan fluida melalui proyek roket air berbasis STEM untuk meningkatkan pemahaman konsep siswa. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika*, 9(2), 201–212.
- Setiawan, D., & Hasanah, L. (2024). Investigasi gaya aksi-reaksi (Hukum III Newton) pada jet air propulsi roket air menggunakan sensor gaya digital. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-Biruni*, 13(1), 102–115.
- Setyawan, D., Hermawan, A., & Kartika, D. (2025). Mengomparasi LOTS ke HOTS melalui implementasi perangkat pembelajaran berbasis STEM di sekolah menengah. *Jurnal Pendidikan Tingkat Tinggi*, 5(2), 210–224.
- Setyobudi, A., & Utami, N. (2024). Literasi digital siswa SMP: Pemanfaatan frame freeze video smartphone untuk analisis waktu terbang gerak parabola. *Jurnal Teknologi Pendidikan Kontemporer*, 12(2), 142–155.
- Siregar, H., Cahyono, B., & Utomo, P. (2025). Peningkatan retensi kognitif materi eksakta siswa SMP melalui penerapan rumpun sintaks PjBL STEM terstruktur. *Jurnal Riset Kognitif Pendidikan*, 13(2), 301–315.
- Sugiarto, L., Setiawan, I., & Herlina, L. (2025). Efektivitas matriks integrasi konsep aljabar-fisika terhadap capaian literasi numerasi terpadu di sekolah urban. *Jurnal Penelitian dan Kebudayaan Eksakta*, 16(1), 105–119.
- Tarigan, R., Ginting, M., & Sitepu, B. (2026). Computational thinking berbasis aljabar: Menyiapkan siswa SMP menghadapi industri teknologi tinggi melalui proyek STEM. *Jurnal Inovasi Teknologi Pendidikan*, 13(2), 102–115.
- Tarigan, R., & Wijaya, M. (2026). Pengaruh visualisasi trajektori roket air terhadap minat siswa SMP pada bidang kedirgantaraan (*Aerospace Engineering*). *Jurnal Inovasi Teknologi dan Pendidikan Sains*, 14(1), 91–104.



- Utama, P., Setiawan, I., & Herlina, L. (2025). Retensi kognitif materi aljabar melalui integrasi representasi simbolik, numerik, dan geometris visual. *Jurnal Riset Kognitif Pendidikan*, 9(2), 143–156.
- Utami, R. D., & Hidayat, M. T. (2022). Pengaruh integrasi konsep sains-matematika terhadap reorganisasi beban kognitif dan retensi belajar siswa. *Jurnal Psikologi Kognitif Pendidikan*, 7(2), 134–148.
- Utomo, P., Cahyono, B., & Kartika, E. (2025). Mengeliminasi miskonsepsi gaya dan gerak melalui sintaks berurutan proyek STEM roket air. *Jurnal Penelitian Pembelajaran Fisika*, 16(2), 134–148.
- Wati, E., Nugraha, S., & Pratiwi, D. (2025). Mengendalikan kreativitas seni rekayasa dengan batasan teknologis dan hukum ilmiah pada proyek STEM sekolah menengah. *Jurnal Analisis Sistem Pendidikan*, 14(1), 60–74.
- Wibowo, A., Nugraha, S., & Lestari, D. P. (2026). Peningkatan literasi sains terapan siswa melalui eksperimen kontrol tekanan fluida berbasis Skala Likert Terbimbing. *Jurnal Kebijakan dan Pengembangan Pendidikan IPA*, 14(1), 105–119.
- Wicaksono, G., & Utami, S. (2025). Penyiapan SDM industri era otomatisasi melalui reformasi kurikulum berbasis transdisipliner STEM. *Jurnal Pendidikan dan Kebudayaan*, 15(3), 301–314.
- Wulandari, N., & Nugraha, A. (2022). Peran pemahaman controlled variables terhadap kemampuan berpikir logis siswa pada materi esensial eksakta. *Jurnal Ilmiah Pendidikan JMP*, 6(2), 110–122.
- Zulkarnaen, I., & Rosdiana, L. (2026). Computational thinking terintegrasi metode ilmiah: Karakteristik utama pembelajaran STEM abad ke-21 di tingkat SMP. *Jurnal Sains Terpadu*, 14(2), 105–119.