



ANALISIS PERSEPSI MAHASISWA TERHADAP PROJECT BASED LEARNING (PJBL) DENGAN CNC MINI

¹Mohamad Riyandi Badu*, ¹Hafid Rahmandan, ¹Andi Maga Umara, ²Rahmad Hidayat Dongka, ³Musfir Rizal Pratama

¹ Pendidikan Teknik Mesin, Universitas Negeri Gorontalo

² Teknik Elektro, Universitas Negeri Gorontalo

³ Pendidikan Seni Rupa, Universitas Negeri Gorontalo

e-mail*: riyandibadu@ung.ac.id

Abstract

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis persepsi mahasiswa terhadap penerapan Project Based Learning (PjBL) dalam pembelajaran CNC menggunakan CNC Mini di Program Studi Pendidikan Teknik Mesin Universitas Negeri Gorontalo. Metode penelitian menggunakan pendekatan mixed methods. Sampel penelitian terdiri dari 20 mahasiswa yang terbagi dalam 4 kelompok. Instrumen penelitian meliputi lembar observasi partisipasi aktif, kuesioner persepsi PjBL (19 item), dan pedoman wawancara. Analisis data kuantitatif menggunakan statistik deskriptif, sedangkan data kualitatif dianalisis secara tematik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa: (1) kesulitan tertinggi mahasiswa adalah mengatasi error pada G-Code dengan skor 68; (2) manfaat tertinggi yang dirasakan adalah peningkatan pemahaman konsep dasar CNC dengan skor 86; dan (3) kontribusi dan kolaborasi kelompok berjalan baik dengan skor rata-rata 77,6. Temuan kualitatif mengidentifikasi lima tema utama: kendala teknis peralatan, keterbatasan waktu, kebutuhan penyesuaian modul, perawatan mesin, dan dinamika pembagian tugas. Dapat disimpulkan bahwa PjBL dengan CNC Mini efektif meningkatkan pemahaman konsep dan kesiapan kerja mahasiswa meskipun terdapat tantangan teknis yang perlu diatasi.

Keywords: Project Based Learning, CNC Mini, Persepsi Mahasiswa, Pendidikan Kejuruan, Pembelajaran Pemesinan

How to cite:

Badu, M. R., Rahmandan, H., Umara, A. M., Dongka, R. H., & Pratama, M. R. (2025). Analisis Persepsi Mahasiswa Terhadap Project Based Learning (PJBL) dengan CNC Mini. *Jambura Journal of Engineering Education*, 4(2), xx-xx. <https://doi.org/10.37905/jjee.v4i2.36499>

Diterima : 10 Desember 2025
Disetujui : 28 Desember 2025
Dipublikasi : 30 Desember 2025

©2025 Mohamad, Hafid, dkk

Pendahuluan

Perkembangan teknologi manufaktur yang pesat di era Industri 4.0 menuntut institusi pendidikan kejuruan untuk menyiapkan lulusan yang kompeten dan siap kerja. Keterampilan abad 21 seperti *critical thinking*, *collaboration*, *creativity*, dan literasi digital menjadi krusial bagi lulusan untuk beradaptasi dan bersaing secara global (Varas, 2023). Dalam konteks pendidikan teknik mesin, penguasaan teknologi *Computer Numerical Control* (CNC) merupakan kompetensi fundamental yang harus dikuasai mahasiswa untuk memenuhi kebutuhan industri manufaktur modern (Wibisono, 2020).

Project Based Learning (PjBL) merupakan pendekatan pembelajaran yang menitikberatkan pada penyelesaian masalah dunia nyata dengan pendekatan berpusat pada peserta didik (Guo, 2020). Meta-analisis yang dilakukan Zhang dan Ma (2023), terhadap 66 penelitian dari tahun 2003-2023 menunjukkan bahwa PjBL secara signifikan

meningkatkan hasil belajar siswa dengan *effect size* $SMD = 0,441$ ($p < 0,001$) dibandingkan dengan metode pembelajaran tradisional.

Studi sistematis terbaru oleh Prasetya et al (2024) yang menganalisis 21 artikel dari 1.036 publikasi menemukan bahwa PjBL krusial dalam mempersiapkan mahasiswa untuk *workforce* berbasis teknologi dengan meningkatkan keterampilan *learning and innovation, information, media, technology*, serta *life and career skills*. Meskipun demikian, implementasi PjBL masih menghadapi tantangan seperti ketidakcukupan kemahiran teknologi, keterbatasan sumber daya, dan ketidakselarasan kurikulum (Prasetya, 2024).

Dalam konteks pembelajaran CNC, beberapa penelitian telah mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi efektivitas pembelajaran. Al Fadri et al. (2023) melakukan analisis komprehensif mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi pembelajaran mata kuliah CNC. Kurniawan dan Wijanarka (2023) menganalisis kemampuan siswa SMK Indonesia dalam mengembangkan program CNC dan menemukan adanya kesenjangan antara kompetensi yang diajarkan dengan kebutuhan industri. Wibisono et al. (2020) mengkaji *link and match* antara kompetensi lulusan SMK dan industri dalam bidang CAD/CAM dan CNC.

Berdasarkan regulasi Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi melalui Keputusan Kepala BSKAP Nomor 033/H/KR/2023, pembelajaran pada Kurikulum Merdeka dapat menggunakan pendekatan *case method* dan *project-based learning* (Kemendikbudristek, 2023). Yoto et al., (2024) menegaskan peran industri dalam mengoptimalkan potensi Kurikulum Merdeka untuk sekolah kejuruan. Pembelajaran CNC di Program Studi Pendidikan Teknik Mesin Universitas Negeri Gorontalo mengadopsi pendekatan PjBL dengan menggunakan CNC Mini sebagai media pembelajaran. Penggunaan mini-CNC menjadi alternatif yang viable karena mesin CNC industri yang mahal tidak cocok untuk kegiatan penelitian dan pembelajaran yang umumnya dilakukan oleh mahasiswa (Praveen, 2022).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengidentifikasi kesulitan yang dihadapi mahasiswa dalam pembelajaran CNC Dasar berbasis proyek; (2) menganalisis manfaat yang dirasakan mahasiswa dari pembelajaran CNC berbasis proyek; dan (3) mengevaluasi kontribusi dan kolaborasi mahasiswa dalam kelompok selama implementasi PjBL.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan *mixed methods* (Creswell, 2017). Data kuantitatif diperoleh dari hasil kuesioner persepsi pembelajaran, sedangkan data kualitatif dihasilkan dari wawancara dan masukan tertulis mengenai pembelajaran. Partisipan penelitian terdiri dari 20 mahasiswa Program Studi Pendidikan Teknik Mesin Universitas Negeri Gorontalo yang mengikuti mata kuliah CNC Dasar. Mahasiswa dibagi menjadi 4 kelompok dengan masing-masing kelompok terdiri dari 5 anggota.

Tabel 1. Instrumen Penelitian

| No Instrumen | Indikator | Jumlah Item | |
|--------------|--|---|-------------------------------|
| 1 | Partisipasi Aktif | 5 | |
| | Diskusi Pemecahan Masalah dan Kolaborasi Kelompok | 3 | |
| 2 | Kesulitan dalam Pembelajaran CNC Dasar Berbasis Proyek | 7 | |
| | Manfaat Pembelajaran CNC Dasar Berbasis Proyek | 7 | |
| | Kontribusi dan Kolaborasi dalam Kelompok | 5 | |
| No Instrumen | Indikator | Jumlah Item | |
| 1 | Partisipasi Aktif | 5 | |
| | Diskusi Pemecahan Masalah dan Kolaborasi Kelompok | 3 | |
| 2 | Kesulitan dalam Pembelajaran CNC Dasar Berbasis Proyek | 7 | |
| | Manfaat Pembelajaran CNC Dasar Berbasis Proyek | 7 | |
| | Kontribusi dan Kolaborasi dalam Kelompok | 5 | |
| 3 | Pedoman Wawancara | Pengalaman, Kendala, dan Saran Pembelajaran | Semi-terstruktur ³ |
| | Pedoman Wawancara | Pengalaman, Kendala, dan Saran Pembelajaran | |

Semi-terstruktur

Data kuantitatif dari kuesioner dianalisis secara deskriptif dengan menghitung skor total, *mean*, dan persentase untuk setiap indikator. Interpretasi skor mengacu pada skala Likert 1-5, dimana skor yang lebih tinggi pada indikator kesulitan menunjukkan tingkat kesulitan yang lebih besar, sedangkan pada indikator manfaat dan kolaborasi menunjukkan persepsi yang lebih positif. Data kualitatif dari wawancara dianalisis menggunakan analisis tematik untuk mengidentifikasi tema-tema utama terkait pengalaman pembelajaran berbasis proyek.

Hasil dan Pembahasan

Hasil

Hasil Observasi Partisipasi dan Kolaborasi

Hasil observasi terhadap partisipasi aktif dan kolaborasi kelompok menunjukkan bahwa keempat kelompok secara umum aktif dan terlibat dalam proses pembelajaran berbasis proyek. Aspek yang menonjol dari observasi adalah keaktifan mahasiswa dalam mengikuti setiap tahapan proyek dan frekuensi diskusi kelompok yang intensif.

Hasil Kuesioner Persepsi PjBL

Hasil analisis kuesioner persepsi mahasiswa terhadap pembelajaran CNC berbasis proyek disajikan dalam tiga aspek utama: kesulitan pembelajaran, manfaat pembelajaran, serta kontribusi dan kolaborasi kelompok.

1. Kesulitan dalam Pembelajaran CNC Dasar Berbasis Proyek

Pada indikator kesulitan pembelajaran, skor tertinggi adalah 68 dan terendah adalah 49. Interpretasi pada bagian ini adalah semakin tinggi skor maka semakin sulit indikator tersebut dirasakan oleh mahasiswa. Tabel 2 menyajikan hasil analisis kesulitan pembelajaran.

Tabel 2. Skor Kesulitan dalam Pembelajaran CNC Dasar Berbasis Proyek

| No | Indikator Kesulitan | Skor | Kategori |
|------------------|--|--------------|---------------|
| 1 | Memahami konsep dasar pemrograman CNC | 52 | Sedang |
| 2 | Mengoperasikan mesin CNC Mini | 55 | Sedang |
| 3 | Memahami perintah-perintah dasar G-Code | 65 | Tinggi |
| 4 | Membuat program CNC sederhana | 58 | Sedang |
| 5 | Mengatur parameter pemesinan | 49 | Rendah |
| 6 | Mengatasi masalah teknis atau error saat pengoperasian mesin | 68 | Tinggi |
| 7 | Menyelesaikan proyek tepat waktu | 60 | Sedang |
| Rata-rata | | 58,14 | Sedang |

Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa kesulitan tertinggi yang dirasakan mahasiswa adalah mengatasi masalah teknis atau *error* saat pengoperasian mesin (skor 68), diikuti oleh memahami perintah-perintah dasar G-Code (skor 65). Kesulitan terendah adalah mengatur parameter pemesinan (skor 49). Rata-rata skor kesulitan adalah 58,14 yang termasuk kategori sedang.

2. Manfaat Pembelajaran CNC Dasar Berbasis Proyek

Pada indikator manfaat pembelajaran, skor tertinggi adalah 86 dan terendah adalah 49. Interpretasi pada bagian ini adalah semakin tinggi skor maka semakin besar manfaat yang dirasakan mahasiswa. Tabel 3 menyajikan hasil analisis manfaat pembelajaran.

Tabel 3. Skor Manfaat Pembelajaran CNC Dasar Berbasis Proyek

| No | Indikator Manfaat | Skor | Kategori |
|------------------|--|--------------|---------------|
| 8 | Pembelajaran proyek ini meningkatkan pemahaman saya tentang konsep dasar CNC | 86 | Sangat Tinggi |
| 9 | Proyek ini membantu saya mengembangkan keterampilan pemecahan masalah | 78 | Tinggi |
| 10 | Saya merasa lebih percaya diri dalam mengoperasikan mesin CNC | 72 | Tinggi |
| 11 | Pembelajaran berbasis proyek lebih menarik dibanding metode konvensional | 80 | Tinggi |
| 12 | Proyek ini meningkatkan kemampuan berpikir kritis saya | 49 | Rendah |
| 13 | Saya dapat mengaplikasikan teori ke dalam praktik nyata | 76 | Tinggi |
| 14 | Pembelajaran proyek ini membantu saya mempersiapkan diri untuk pekerjaan di bidang manufaktur/teknik | 84 | Sangat Tinggi |
| Rata-rata | | 75,00 | Tinggi |

Data pada Tabel 3 menunjukkan bahwa manfaat tertinggi yang dirasakan mahasiswa adalah peningkatan pemahaman tentang konsep dasar CNC (skor 86), diikuti oleh

persiapan untuk pekerjaan di bidang manufaktur/teknik (skor 84) dan pembelajaran yang lebih menarik dibanding metode konvensional (skor 80). Manfaat terendah adalah peningkatan kemampuan berpikir kritis (skor 49). Rata-rata skor manfaat adalah 75,00 yang termasuk kategori tinggi.

3. Kontribusi dan Kolaborasi dalam Kelompok

Pada indikator kontribusi dan kolaborasi, skor tertinggi adalah 82 dan terendah adalah 73. Tabel 4 menyajikan hasil analisis kontribusi dan kolaborasi kelompok.

Tabel 4. Skor Kontribusi dan Kolaborasi dalam Kelompok

| No | Indikator Kolaborasi | Skor | Kategori |
|------------------|---|--------------|---------------|
| 15 | Saya aktif berkontribusi dalam setiap tahapan proyek | 82 | Sangat Tinggi |
| 16 | Pembagian tugas dalam kelompok berjalan adil | 73 | Tinggi |
| 17 | Komunikasi antar anggota kelompok berjalan lancar | 75 | Tinggi |
| 18 | Anggota kelompok saya bekerja sama dengan baik untuk mencapai tujuan proyek | 82 | Sangat Tinggi |
| 19 | Saya belajar dari anggota kelompok lain selama proyek berlangsung | 76 | Tinggi |
| Rata-rata | | 77,60 | Tinggi |

Data pada Tabel 4 menunjukkan bahwa skor tertinggi pada aspek kolaborasi adalah kontribusi aktif dalam setiap tahapan proyek dan kerja sama tim untuk mencapai tujuan proyek (masing-masing skor 82). Skor terendah adalah pembagian tugas yang adil dalam kelompok (skor 73). Rata-rata skor kolaborasi adalah 77,60 yang termasuk kategori tinggi.

Hasil Analisis Kualitatif

Analisis tematik terhadap data wawancara dan masukan tertulis mengidentifikasi lima tema utama terkait pengalaman mahasiswa dalam pembelajaran CNC berbasis proyek:

Tema 1 - Kendala Teknis dan Peralatan: Mahasiswa melaporkan bahwa CNC Mini yang digunakan mengalami ketidakstabilan saat dijalankan. Hal ini menyebabkan hasil pemrosesan tidak konsisten dan memerlukan pengulangan proses.

Tema 2 - Keterbatasan Waktu Praktikum: Sebagian besar mahasiswa menyatakan bahwa alokasi waktu praktikum tidak mencukupi untuk menyelesaikan proyek dengan optimal. Kompleksitas tugas pemrograman dan pengoperasian CNC membutuhkan waktu lebih banyak dari yang disediakan.

Tema 3 - Kebutuhan Penyesuaian Modul: Mahasiswa mengindikasikan bahwa modul pembelajaran perlu penyesuaian karena instruksi dinilai kurang jelas dan beberapa langkah tidak sesuai dengan kondisi aktual mesin. Mahasiswa menyarankan agar modul direvisi menjadi lebih adaptif, khususnya dengan menambahkan panduan *troubleshooting* mandiri untuk menangani *error* yang sering muncul, serta menyediakan tabel parameter pemotongan (*feed rate* dan *spindle speed*) yang secara khusus dikalibrasi untuk kapasitas motor CNC Mini, bukan sekadar mengadopsi parameter mesin industri.

Tema 4 - Prosedur Perawatan Rutin dan Kalibrasi Mesin: Mahasiswa mengidentifikasi urgensi perawatan rutin terhadap mesin CNC Mini serta perhatian terhadap kualitas bahan yang digunakan. Temuan ini menekankan perlunya penerapan

rekomendasi praktis berupa prosedur perawatan berkala, yang mencakup kalibrasi ulang sumbu (*axis calibration*) untuk akurasi dimensi, pengecekan kekencangan komponen mekanis (*coupling* dan baut), serta pembersihan dan pelumasan rel linear sebelum dan sesudah praktikum untuk menjaga stabilitas mesin.

Tema 5 - Dinamika Kolaborasi Kelompok: Meskipun kolaborasi secara umum berjalan baik, mahasiswa menyarankan agar pembagian tugas dalam kelompok perlu dibagi secara lebih merata untuk memastikan setiap anggota mendapat kesempatan belajar yang sama.

Pembahasan

Analisis Kesulitan Pembelajaran CNC Berbasis Proyek

Temuan bahwa mengatasi masalah teknis atau *error* saat pengoperasian mesin (skor 68) dan memahami perintah-perintah dasar G-Code (skor 65) merupakan kesulitan tertinggi yang dirasakan mahasiswa konsisten dengan literatur yang ada. González-García et al. (Gonzalez-Garcie, 2024) dalam systematic review mereka tentang aplikasi *Extended Reality* untuk pelatihan CNC mengidentifikasi bahwa kesulitan dalam memahami *error* dan *troubleshooting* merupakan tantangan utama dalam pembelajaran CNC.

Kesulitan dalam pemrograman G-Code juga dikonfirmasi oleh (Hoang et al. 2024) yang mengevaluasi *mental workload* mahasiswa dalam pembelajaran CNC. Mereka menemukan bahwa pemrograman G-Code memiliki tuntutan kognitif tinggi yang dapat membebani mahasiswa. Hal ini sejalan dengan pandangan bahwa G-Code memiliki *steep learning curve* karena pemula harus menghafal banyak kode, memahami sistem koordinat, dan cara kerja kontrol *feed* dan *speed* (Lincoln Tech, 2025).

(Meng et al. 2023) dalam kajiannya tentang tantangan implementasi PjBL menyebutkan bahwa instruktur dari berbagai jenjang pendidikan menemukan kesulitan dalam mengimplementasikan pedagogi ini karena berbagai alasan, termasuk kompleksitas teknis materi. Temuan kualitatif dalam penelitian ini yang mengidentifikasi ketidakstabilan CNC Mini mendukung perlunya perawatan dan kalibrasi mesin yang konsisten, sebagaimana disarankan oleh Suyetno dan Yoto (Suyetno, A. (2021) dalam pengembangan media pembelajaran berbasis simulator CNC.

Analisis Manfaat Pembelajaran CNC Berbasis Proyek

Temuan bahwa pembelajaran proyek meningkatkan pemahaman konsep dasar CNC (skor 86) dan membantu persiapan untuk pekerjaan di bidang manufaktur/teknik (skor 84) menunjukkan efektivitas PjBL dalam konteks pembelajaran teknik. Hasil ini mendukung meta-analisis Zhang dan Ma (2023) yang menemukan bahwa PjBL secara signifikan meningkatkan hasil belajar mahasiswa dengan kontribusi positif moderat (SMD = 0,441).

Lesmana et al. (2023) mengkonfirmasi bahwa implementasi model PjBL meningkatkan kreativitas dan keterampilan berpikir kritis siswa dalam mata pelajaran produk kreatif kejuruan. Chistyakov et al. (2023) juga menemukan bahwa PjBL efektif dalam pendidikan STEAM dengan meningkatkan keterlibatan dan pemahaman konseptual mahasiswa.

Skor tinggi pada aspek kesiapan kerja (skor 84) konsisten dengan temuan Le et al. (2022) bahwa pembelajaran teknik dan kejuruan harus membekali mahasiswa dengan kompetensi abad 21. Paryanto dan Munadi (2025) juga menunjukkan bahwa model pembelajaran praktik pemesinan berbasis proyek efektif dalam meningkatkan *employability skills* mahasiswa.

Temuan bahwa skor peningkatan kemampuan berpikir kritis relatif rendah (skor 49) perlu dicermati. Hal ini mungkin disebabkan oleh fokus mahasiswa pada aspek teknis operasional yang tinggi sehingga aspek metakognitif kurang tereksplorasi. Iqbal et al. (2023) menyarankan adaptasi model PBL agar lebih berorientasi pada *critical thinking* untuk memastikan hasil yang optimal.

Analisis Kontribusi dan Kolaborasi Kelompok

Skor tinggi pada aspek kontribusi aktif (skor 82) dan kerja sama tim (skor 82) menunjukkan bahwa PjBL berhasil memfasilitasi kolaborasi yang efektif. Dogara et al. (2019) menegaskan bahwa PjBL efektif dalam mengembangkan *soft skills* di institusi teknik dan kejuruan. Cortázar et al. (2020) juga menemukan bahwa pembelajaran berbasis proyek dengan *scaffolding* yang tepat dapat meningkatkan regulasi bersama dan kerja tim.

Skor relatif lebih rendah pada pembagian tugas yang adil (skor 73) dan temuan kualitatif yang menyarankan pembagian tugas yang lebih merata sejalan dengan penelitian Chen et al. (2024) yang mengidentifikasi tantangan dalam diferensiasi tugas mahasiswa sebagai salah satu hambatan implementasi PBL. Hossain dan Younus (2025) menekankan bahwa kolaborasi dalam PjBL meningkatkan *engagement* dan motivasi, namun memerlukan desain pembagian peran yang jelas.

Hasil ini mendukung kerangka konseptual PjBL oleh Ahmad et al. (2023) yang menyatakan bahwa PjBL membantu peserta didik mengembangkan keterampilan kerja tim. Prasetya et al. (2024) juga mengkonfirmasi bahwa PjBL mendorong mahasiswa untuk terlibat dalam proyek dunia nyata yang relevan dengan bidang keahlian mereka, memungkinkan pengembangan pengetahuan teoretis, keterampilan praktis, berpikir kritis, dan kerja tim.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa: (1) Kesulitan tertinggi yang dihadapi mahasiswa dalam pembelajaran CNC Dasar berbasis proyek adalah mengatasi masalah teknis atau *error* saat pengoperasian mesin (skor 68) dan memahami perintah-perintah dasar G-Code (skor 65), dengan rata-rata kesulitan dalam kategori sedang (58,14); (2) Manfaat tertinggi yang dirasakan mahasiswa adalah peningkatan pemahaman tentang konsep dasar CNC (skor 86) dan persiapan untuk pekerjaan di bidang manufaktur/teknik (skor 84), dengan rata-rata manfaat dalam kategori tinggi (75,00); (3) Kontribusi dan kolaborasi kelompok berjalan baik dengan skor tertinggi pada kontribusi aktif dan kerja sama tim (masing-masing skor 82), meskipun aspek pembagian tugas yang adil masih perlu ditingkatkan (skor 73), dengan rata-rata kolaborasi dalam kategori tinggi (77,60).

Daftar Pustaka

Ahmad, S. T., Watrianthos, R., Samala, A. D., Muskhair, M., & Dogara, G. (2023). Project-based Learning in Vocational Education: A Bibliometric Approach. *International Journal of Modern Education and Computer Science*, 15(4), 43-56.

- Al Fadri, M., Yufrizal, A., Fernanda, Y., & Prasetya, F. (2023). Optimizing student learning in Computer Numerical Control subject: A comprehensive analysis of influential factors. *Journal of Engineering Researcher and Lecturer*, 2(3).
- Chen, J., Kolmos, A., & Du, X. (2024). Engineering students' perceptions of problem and project-based learning. *Australasian Journal of Engineering Education*, 88-101.
- Chistyakov, A. A., et al. (2023). Exploring the characteristics and effectiveness of project-based learning for science and STEAM education. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 19(5), 1-7.
- Cortázar, C., et al. (2022). The impacts of scaffolding socially shared regulation on teamwork in an online project-based course. *The Internet and Higher Education*, 55, 100872.
- Creswell, J. W., & Clark, V. L. P. (2017). *Designing and Conducting Mixed Methods Research*. Sage Publications.
- Dogara, G., et al. (2019). Developing soft skills through project-based learning in technical and vocational institutions. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(1), 2842-2847.
- González-García, M., et al. (2024). Extended Reality Applications for CNC Machine Training: A Systematic Review. *Multimodal Technologies and Interaction*, 8(9), 80.
- Guo, P., Saab, N., Post, L. S., & Admiraal, W. (2020). A review of project-based learning in higher education: Student outcomes and measures. *International Journal of Educational Research*, 102, 101586.
- Hoang, S., et al. (2024). Evaluating the learning performances for CNC machine practice based on students' mental workload. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 52(2).
- Hossain, K., & Younus, A. A. (2025). Fostering Collaboration in PBL: Teachers' Perceptions. *Urban Education*.
- Iqbal, M. H., et al. (2023). The critical thinking-oriented adaptations of problem-based learning models. *Frontiers in Education*, 8, 1139987.
- Kemendikbudristek. (2023). Keputusan Kepala BSKAP Nomor 033/H/KR/2023 tentang Capaian Pembelajaran pada Kurikulum Merdeka. Jakarta: Kemendikbudristek.
- Kurniawan, R., & Wijanarka, B. S. (2023). Analysis of the Ability to Develop CNC Machine Part Programs for Vocational High School Students in Indonesia. *European Journal of Education and Pedagogy*, 4(4), 59-63.
- Le, S. K., Hlaing, S. N., & Ya, K. Z. (2022). 21st-century competences and learning that Technical and vocational training. *Journal of Engineering Researcher and Lecturer*, 1(1), 1-6.
- Lesmana, I., et al. (2023). Implementation of PjBL model to increase students' creativity and critical thinking skill. *Jurnal Pendidikan Teknologi Kejuruan*, 6(3), 202-215.
- Lincoln Tech. (2025). What Is G-Code? Introduction To CNC Programming. Retrieved from lincolntech.edu.
- Meng, N., et al. (2023). Tackle implementation challenges in project-based learning. *Educational Technology Research and Development*, 71, 1179-1207.
- Paryanto, P., & Munadi, S. (2025). Development of a Project-Based Machining Practice Learning Model. *Proceedings of ICEI 2024*. Atlantis Press.
- Praveen, B. A., et al. (2022). Industry 4.0 Researchers Computer Numerical Control Machine Tool. In *Emerging Research in Computing*. Springer.

- Prasetya, F., Fortuna, A., Jalinus, N., et al. (2024). The impact of project-based learning on 21st century skill development of vocational engineering students: A systematic literature review. *Journal of Engineering Researcher and Lecturer*, 3(3), 189-212.
- Suyetno, A., & Yoto. (2021). Learning Media Development Based on CNC Simulator. *Journal of Physics: Conference Series*, 1833(1).
- Varas, M., et al. (2023). From traditional to digital education: A systematic review. *Education and Information Technologies*.
- Wibisono, G., Wijanarka, B. S., & Theophile, H. (2020). The link and match between the competency of vocational high schools graduates and the industry on CAD/CAM and CNC. *Journal of Pendidikan Teknologi Kejuruan*, 26, 26-34.
- Yoto, Marsono, Suyetno, A., et al. (2024). The Role of Industry to Unlock the Potential of the Merdeka Curriculum for Vocational School. *Cogent Education*, 11(1).
- Zhang, X., & Ma, Y. (2023). A study of the impact of project-based learning on student learning effects: a meta-analysis study. *Frontiers in Psychology*, 14, 1202728.