



Ekliptika : Jurnal Inovasi Teknologi Berkelanjutan

Vol. 5 No. 2 Desember 2024 / Hal. 91–100

doi: <https://doi.org/10.55757/ekliptika.v5i2/1116>



Pembelajaran Gambar Teknik Menggunakan SketchUp dan Potensinya dalam Pencegahan Limbah Material

Adinda Agung Salsabilla^{1*}, Misnatul Sa'ada², Rudi Kurniawan³

¹ Fakultas Teknik, Universitas Nahdlatul Ulama Pasuruan, Indonesia

*Email korespondensi: Adindasalsabilla2006@gmail.com

Email penulis: alldaa201023@gmail.com; Rudi@unupasuruan.ac.id

Abstrak

Penelitian ini mendeskripsikan perkembangan kemampuan gambar teknik menggunakan SketchUp serta membahas potensinya dalam pencegahan limbah material. Pembelajaran berbasis praktik dilaksanakan dalam delapan sesi pada mahasiswa semester pertama Program Studi Teknik Industri Universitas Nahdlatul Ulama Pasuruan. Data yang tersedia mencakup empat pasangan skor pre-test dan post-test serta uraian hambatan teknis. Analisis dilakukan secara deskriptif dengan menghitung selisih skor dan kenaikan relatif terhadap skor awal. Rata-rata skor meningkat dari 52,50 menjadi 85,43, dengan kenaikan 32,93 poin; seluruh pasangan skor menunjukkan peningkatan sebesar 10,00–46,70 poin. Angka hambatan teknis 78% yang dilaporkan belum dapat diverifikasi karena jumlah responden survei tidak dicantumkan. Pemodelan digital berpotensi mendukung pemeriksaan ukuran, konsistensi proyeksi, dan kebutuhan material sebelum pembuatan prototipe fisik. Namun, data tidak memuat pengukuran limbah, konsumsi energi, atau kelompok pembanding manual sehingga penurunan limbah dan efektivitas relatif metode belum dapat ditetapkan. Pembahasan mengaitkan pembelajaran dengan target SDG 12.2, 12.5, dan 12.8 serta menekankan kebutuhan evaluasi desain, pencatatan penggunaan bahan, dan penilaian daur hidup.

Kata kunci: gambar teknik; SketchUp; pemodelan digital; limbah material; SDG 12

Abstract

This study describes developments in technical drawing skills using SketchUp and discusses their potential relevance to material-waste prevention. Practice-based learning comprised eight sessions for first-semester Industrial Engineering students at Universitas Nahdlatul Ulama Pasuruan. Available data include four paired pre-test and post-test scores and descriptions of technical barriers. Descriptive analysis calculates score differences and increases relative to initial scores. Mean scores rose from 52.50 to 85.43, an increase of 32.93 points; all pairs improved by 10.00–46.70 points. The reported 78% incidence of technical barriers cannot be verified because the survey denominator is unspecified. Digital modeling may support checks of dimensions, projection consistency, and material requirements before physical prototyping. However, waste, energy consumption, and manual-control-group measurements are unavailable, preventing conclusions about waste reduction or comparative effectiveness. The discussion relates learning to SDG targets 12.2, 12.5, and 12.8 and emphasizes design validation, material-use records, and life-cycle assessment.

Keywords: technical drawing; SketchUp; digital modeling; material waste; SDG 12

[1] A. A. Salsabilla, M. Sa'ada, and R. Kurniawan, "Pembelajaran Gambar Teknik Menggunakan SketchUp dan Potensinya dalam Pencegahan Limbah Material," *Ekliptika: Jurnal Inovasi Teknologi Berkelanjutan*, vol. 5, no. 2, pp. 91–100, 2024, doi: 10.55757/ekliptika.v5i2.1116.



PENDAHULUAN

Ketepatan gambar teknik menentukan kejelasan informasi ukuran, bentuk, dan hubungan antarkomponen dalam perancangan. Kesalahan yang diketahui sebelum pembuatan produk dapat diperbaiki pada tahap desain sehingga kebutuhan pengerjaan ulang berpotensi berkurang. Dalam manufaktur berkelanjutan, keputusan perancangan perlu mempertimbangkan fungsi produk, penggunaan sumber daya, dan dampak sepanjang daur hidup. Rosen dan Kishawy [1] membahas hubungan desain dan praktik manufaktur berkelanjutan, sedangkan Bocken dkk. [2] menjelaskan strategi desain dalam ekonomi sirkular.

Computer-Aided Design (CAD) membantu penyusunan serta pemeriksaan representasi digital, tetapi hasilnya tetap bergantung pada kemampuan pengguna dan kelengkapan informasi teknis. Pemodelan tiga dimensi dapat membantu pembacaan bentuk yang sulit dipahami melalui gambar dua dimensi. AlFajri dan Nasution [3] membahas tahapan gambar bangunan secara manual dan digital. Atmajayani [4] menelaah pelatihan AutoCAD untuk kompetensi dasar menggambar teknik. Kedua kajian menempatkan perangkat lunak sebagai bagian dari proses pembelajaran, dengan kebutuhan latihan dan dukungan perangkat yang sesuai.

SketchUp dalam penelitian ini digunakan untuk membentuk objek geometris, menyusun model bangunan, dan menghasilkan tampak dua dimensi. Harianja [5] membahas penerapan media tiga dimensi SketchUp pada pembelajaran menggambar dengan perangkat lunak. Waluya dan Wiyono [6] menelaah pembelajaran proyeksi ortogonal menggunakan SketchUp. Temuan pada konteks sekolah kejuruan memberi dasar perbandingan metodologis, tetapi tidak langsung menetapkan hasil pada mahasiswa Teknik Industri atau besaran manfaat lingkungan.

Kemampuan spasial merupakan aspek yang relevan dalam membaca hubungan bentuk dan proyeksi. Sorby [7] membahas pengembangan keterampilan spasial mahasiswa teknik, sementara Uttal dkk. [8] menelaah keterampilan spasial melalui meta-analisis studi pelatihan. Kemampuan ini perlu diukur dengan instrumen yang sesuai. Perubahan skor tugas gambar tidak secara otomatis menunjukkan perubahan kemampuan spasial, karena skor juga dapat dipengaruhi penguasaan alat, pengalaman latihan, dan kriteria penilaian.

Pembelajaran berbasis praktik memberi kesempatan untuk mencoba alat, memeriksa hasil, dan memperbaiki kesalahan. Prince [9] meninjau bukti mengenai pembelajaran aktif; Freeman dkk. [10] membahas kinerja mahasiswa pada pembelajaran aktif di bidang sains dan teknik. Literatur tersebut mendukung penyusunan kegiatan belajar yang melibatkan peserta. Penetapan efektivitas suatu aplikasi pada kasus tertentu tetap memerlukan rancangan dan pengukuran yang memadai.

Penelitian ini bertujuan mendeskripsikan perubahan skor pada empat pasangan data yang tersedia, mengidentifikasi keterbatasan pelaporan hambatan teknis, dan membahas hubungan pemodelan digital dengan pencegahan limbah material. Ruang lingkup temuan empiris berada pada hasil pembelajaran. Hubungan dengan keberlanjutan dibahas sebagai mekanisme potensial yang memerlukan pengujian penggunaan bahan dan dampak lingkungan.

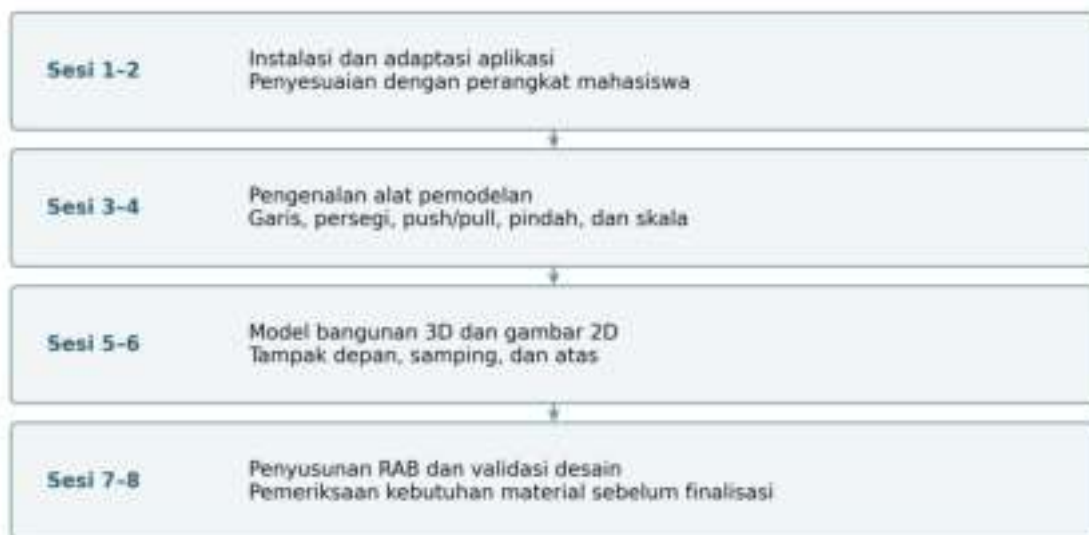
METODE PENELITIAN

Rancangan dan Peserta

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif pada mahasiswa semester pertama Program Studi Teknik Industri Universitas Nahdlatul Ulama Pasuruan. Peserta dipilih melalui purposive sampling. Jumlah peserta total, waktu pelaksanaan, kriteria terperinci, dan bukti kesetaraan awal tidak dicantumkan. Analisis menggunakan empat pasangan skor yang tersedia tanpa mengasumsikan keterwakilan seluruh mahasiswa.

Sumber menyebut tujuan membandingkan pembelajaran manual dan digital, tetapi tidak menyajikan skor kelompok manual secara terpisah. Oleh karena itu, rancangan yang dapat ditelaah dari data adalah pengamatan skor sebelum dan sesudah pembelajaran. Penetapan perbedaan efektivitas terhadap metode manual dan hubungan sebab-akibat tidak dilakukan.

Prosedur Pembelajaran dan Instrumen



Gambar 1. Urutan delapan sesi pembelajaran berbasis praktik yang dilaporkan.

Penilaian pre-test dan post-test dilaporkan mencakup ketepatan ukuran, kebersihan gambar, dan keakuratan proyeksi. Rincian bobot, indikator, kesetaraan tugas, serta prosedur pemeriksaan antarpemilai tidak tersedia. Tampak depan, samping, dan atas memerlukan konsistensi representasi ortogonal; ISO 5456-2 [11] digunakan sebagai rujukan konseptual proyeksi. Kepatuhan seluruh hasil tugas terhadap standar tersebut belum dapat diverifikasi karena gambar tugas tidak dilampirkan.

Analisis Skor

$$\Delta S_i = S_{post,i} - S_{pre,i} \quad (1)$$

$$K_i = (\Delta S_i / S_{pre,i}) \times 100 \% \quad (2)$$

ΔS_i menyatakan selisih dalam poin dan K_i kenaikan relatif. Persamaan (2) digunakan bila skor awal > 0. Rata-rata memakai empat pasangan dengan bobot sama. Uji inferensial dan korelasi tidak dilakukan. Skor 66,7 dipertahankan sesuai sumber.

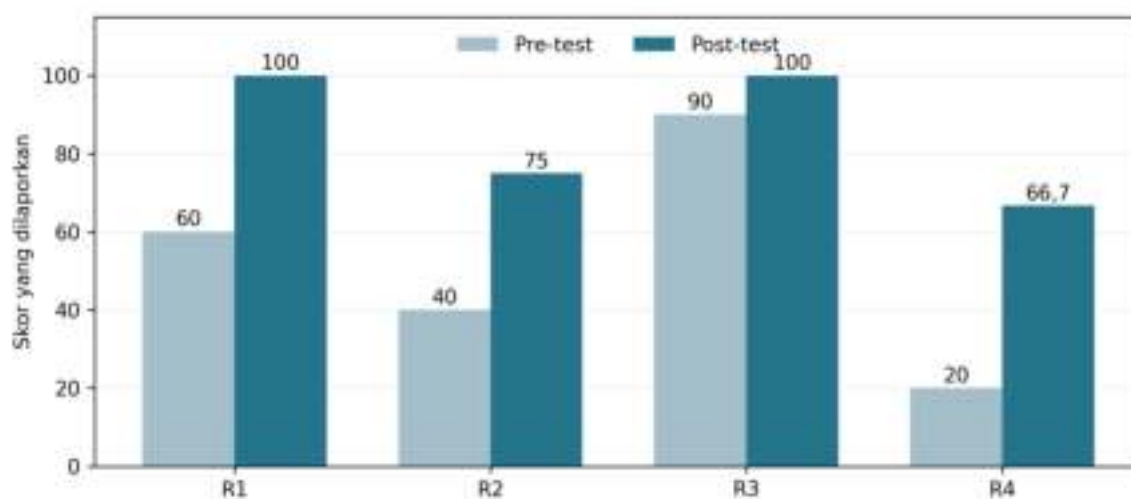
HASIL DAN PEMBAHASAN

Perubahan Skor pada Empat Pasangan Data

Tabel 1. Skor sebelum dan sesudah pembelajaran serta perubahan yang dihitung

Kode	Pre-test	Post-test	Selisih (poin)	Kenaikan relatif (%)
R1	60,00	100,00	40,00	66,67
R2	40,00	75,00	35,00	87,50
R3	90,00	100,00	10,00	11,11
R4	20,00	66,70	46,70	233,50

R1–R4 mengikuti urutan empat responden pada tabel sumber; identitas tidak ditampilkan. Skor berasal dari naskah, sedangkan selisih dan kenaikan relatif dihitung dengan Persamaan (1)–(2). Skor dan selisih ditampilkan dua desimal untuk konsistensi penulisan, tanpa menambah ketelitian pengukuran sumber.



Gambar 2. Perbandingan empat pasangan skor pre-test dan post-test.

Seluruh pasangan menunjukkan kenaikan. Rata-rata pre-test sebesar 52,50 dan post-test sebesar 85,425, yang dibulatkan menjadi 85,43. Selisih rata-rata 32,925 dibulatkan menjadi 32,93 poin. Median skor berubah dari 50,00 menjadi 87,50, sedangkan median selisih individual sebesar 37,50 poin. Nilai tersebut mendeskripsikan empat pasangan data, bukan estimasi efektivitas bagi seluruh mahasiswa.

R4 memiliki selisih terbesar sebesar 46,70 poin, diikuti R1 sebesar 40,00 poin, R2 sebesar 35,00 poin, dan R3 sebesar 10,00 poin. Kenaikan relatif R4 dapat melampaui 100% karena dihitung terhadap skor awal 20,00; angka 233,50% tidak berarti skor akhir melampaui batas penilaian. R3 mencapai skor akhir 100,00 dari skor awal 90,00 sehingga ruang kenaikan pada data yang ditampilkan lebih kecil.

Kolom “kenaikan pemahaman” pada sumber mencantumkan persentase dengan dasar penghitungan yang tidak dijelaskan. Tabel 1 menggunakan ukuran yang dapat direproduksi dari pasangan skor. Perubahan skor belum dapat dinyatakan sebagai peningkatan kemampuan spasial secara khusus atau akibat tunggal SketchUp, karena indikator terpisah dan kondisi pembandingan tidak tersedia.

Ketepatan Desain dan Mekanisme Pencegahan Limbah

Pemodelan digital menyediakan ruang pemeriksaan sebelum objek fisik dibuat. Ukuran dapat diperiksa terhadap kebutuhan rancangan, kesesuaian tampak dapat ditelusuri, dan perubahan bentuk dapat dilakukan tanpa langsung menggunakan bahan prototipe. Manfaat tersebut bergantung pada masukan ukuran yang benar, satuan yang konsisten, serta kemampuan pengguna mengenali kesalahan. Tampilan model yang rapi belum menjamin gambar cukup lengkap untuk produksi.

Ketepatan ukuran perlu dibedakan dari banyaknya angka desimal yang ditampilkan. Pernyataan akurasi hingga 0,001 mm belum dapat ditetapkan pada penelitian ini karena tidak tersedia ukuran acuan, hasil pengukuran model, atau evaluasi kesalahan. Toleransi manufaktur juga memerlukan persyaratan produk dan kemampuan proses yang sesuai. Hasil skor gabungan tugas tidak dapat dikonversi menjadi toleransi dimensi atau ketelitian mikro.

Tabel 2. Mekanisme potensial dan data yang diperlukan untuk pengujian

Mekanisme	Hubungan yang dapat diuji	Data yang diperlukan
Pemeriksaan ukuran	Koreksi dimensi sebelum pembuatan prototipe.	Ukuran acuan, hasil model, dan kesalahan dimensi.
Konsistensi proyeksi	Pencegahan informasi tampak yang saling bertentangan.	Gambar tampak, jenis kesalahan, dan revisi.
Perhitungan kebutuhan bahan	Penyusunan kebutuhan material sesuai rancangan.	Volume/jumlah bahan, faktor sisa, dan pembelian aktual.
Pemilihan prototipe fisik	Pembuatan model fisik hanya untuk aspek yang perlu diuji.	Jumlah prototipe, massa, fungsi uji, dan kegagalan.
Penyusunan pola potong	Penilaian efisiensi penempatan komponen.	Ukuran lembar, tata letak potong, dan massa sisa.

Material takeoff memerlukan pemetaan geometri ke jenis, jumlah, dan satuan bahan. Model bangunan tidak otomatis menghasilkan daftar kebutuhan yang lengkap, dan Rencana Anggaran Biaya (RAB) memerlukan harga, koefisien, serta aturan penghitungan. Tidak tersedia dokumen RAB atau daftar material aktual dalam data penelitian, sehingga ketepatan estimasi dan pencegahan pemesanan berlebih belum dapat diukur.

Model geometris tiga dimensi pada latihan ini disebut model digital atau prototipe digital. Istilah digital twin memerlukan penjelasan hubungan serta pertukaran data dengan objek atau proses fisik. Kritzinger dkk. [12] membedakan model digital, digital shadow, dan digital twin berdasarkan integrasi data. Pembelajaran yang dilaporkan belum menyajikan koneksi tersebut, sehingga tidak dinyatakan sebagai implementasi digital twin.

Pencegahan rework dan optimasi pola potong merupakan arah pemanfaatan lanjutan, bukan hasil terukur. Penelitian tidak menyajikan massa scrap, jumlah prototipe yang dihindari, atau konsumsi energi perbandingan. Besaran reduksi limbah maupun prototipe yang dicantumkan tanpa data pendukung tidak digunakan sebagai temuan kasus ini.

Hambatan Teknis dan Pengembangan Pembelajaran

Uraian sumber menyebut kegagalan aplikasi saat model menjadi kompleks, keterbatasan perangkat mahasiswa, serta kesulitan menggunakan pintasan dan alat. Kompleksitas geometri dapat memperbesar kebutuhan komputasi, tetapi sumber tidak menyediakan ukuran model, spesifikasi perangkat, versi aplikasi, atau catatan kejadian. Penyebab gangguan tidak dapat dipastikan hanya dari laporan umum tersebut.

Angka 78% dilaporkan sebagai proporsi peserta yang mengalami hambatan teknis. Jumlah responden survei, jumlah jawaban yang dihitung, definisi hambatan, dan periode pengamatan tidak disertakan. Persentase tersebut tidak dapat diturunkan dari empat pasangan skor, karena unit data survei dan data skor belum dijelaskan hubungannya. Angka 78% dipertahankan sebagai informasi yang dilaporkan dengan keterbatasan verifikasi; tidak digunakan untuk menghitung jumlah peserta terdampak.

Dukungan pembelajaran dapat diarahkan pada penyesuaian kompleksitas latihan dengan perangkat, pemberian panduan langkah kerja, dan pemeriksaan model secara bertahap. Pengajar dapat mengidentifikasi kesulitan satuan, penggunaan alat, atau konsistensi tampak melalui pemeriksaan hasil tugas. Pilihan fasilitas perlu mengikuti hasil pemetaan perangkat peserta, bukan asumsi bahwa seluruh mahasiswa membutuhkan penggantian perangkat keras.

Tabel 3. Aspek penilaian yang dapat diperjelas pada pembelajaran lanjutan

Aspek	Bukti yang diperiksa	Kebutuhan pelaporan
Ketepatan ukuran	Kesesuaian ukuran model dan acuan tugas.	Satuan, nilai acuan, dan aturan toleransi tugas.
Kebersihan gambar	Keterbacaan dan penataan informasi gambar.	Indikator yang membedakan kategori penilaian.
Keakuratan proyeksi	Kesesuaian bentuk antartampak.	Jenis proyeksi, kriteria kesalahan, dan contoh.
Pertimbangan material	Hubungan rancangan dengan kebutuhan bahan.	Daftar bahan, asumsi sisa, dan alasan pemilihan.

Tiga aspek pertama mengikuti instrumen yang disebut dalam sumber. Aspek pertimbangan material merupakan usulan pengembangan, bukan komponen skor yang telah diterapkan. Tabel tidak menetapkan bobot atau ambang kelulusan baru.

Pre-test dan post-test berikutnya perlu memakai tugas setara serta prosedur penskoran yang terdokumentasi. Jika pembelajaran manual ingin dibandingkan dengan digital, data kedua kondisi harus tersedia bersama informasi kemampuan awal dan waktu latihan. Penilaian antarpemilihan atau pemeriksaan ulang sebagian tugas dapat digunakan untuk menelaah konsistensi skor. Usulan ini belum dilaksanakan pada data yang dianalisis.

Praktik berulang dan umpan balik memberi peluang untuk memperbaiki cara membaca objek serta menjalankan alat. Literatur keterampilan spasial [7], [8] dan pembelajaran aktif [9], [10] mendukung kebutuhan kegiatan terarah. Namun, desain intervensi, durasi, dan instrumen pada masing-masing kajian berbeda sehingga besaran efeknya tidak dipindahkan ke penelitian ini.

Material Prototipe dan Penilaian Dampak Lingkungan

Prototipe fisik dapat tetap diperlukan untuk memeriksa kesesuaian ukuran, perakitan, atau respons material yang tidak cukup dinilai melalui geometri digital. Jika pencetakan tiga dimensi digunakan, pemilihan filamen perlu mengikuti kebutuhan uji dan kondisi pengelolaan sisa. ABS dan PLA dibahas sebagai contoh bahan, tanpa menyatakan bahwa mahasiswa pada penelitian ini telah mencetak prototipe atau mengukur dampaknya.

Tabel 4. Pertimbangan ABS dan PLA untuk prototipe fisik

Aspek	ABS	PLA	Implikasi penilaian
Sumber bahan	Umumnya berbasis bahan baku fosil.	Dapat dibuat dari bahan baku hayati melalui proses industri.	Sumber bahan belum menentukan keseluruhan dampak.
Sifat penggunaan	Sifat mengikuti formulasi dan kebutuhan aplikasi.	Sifat mekanik dan termal dipengaruhi formulasi serta pemrosesan.	Kesesuaian fungsi perlu diperiksa sebelum substitusi.
Akhir pemakaian	Memerlukan pengelolaan limbah plastik yang sesuai.	Penguraian/pengomposan bergantung kondisi dan spesifikasi produk.	PLA tidak diasumsikan terurai di semua lingkungan.
Emisi pencetakan	Dapat menghasilkan partikel dan senyawa volatil.	Dapat pula menghasilkan partikel dan senyawa volatil.	Periksa kombinasi filamen, mesin, dan parameter proses.
Energi proses	Dipengaruhi suhu, durasi, dan konfigurasi mesin.	Juga dipengaruhi suhu, durasi, dan konfigurasi mesin.	Perlu data energi per prototipe yang memenuhi fungsi.

Kajian Vink dkk. [13] menggunakan penilaian daur hidup pada produksi PLA. Farah dkk. [14] membahas sifat fisik serta mekaniknya, dan Song dkk. [15] menjelaskan perbedaan bahan berbasis hayati, biodegradabilitas, serta pengomposan. Pemilihan PLA tidak otomatis membentuk sistem sirkular; hasilnya bergantung pada desain, kebutuhan fungsi, pemilahan, dan fasilitas akhir pemakaian.

Stephens dkk. [16] dan Azimi dkk. [17] melaporkan emisi partikel maupun senyawa volatil pada pencetakan filamen. Karena itu, perbandingan bahan tidak cukup menggunakan aroma atau menyatakan satu bahan sepenuhnya aman. Tabel 4 menyajikan kebutuhan evaluasi proses tanpa menetapkan besaran emisi atau kondisi paparan pada ruang belajar yang tidak diukur.

Kreiger dan Pearce [18] membandingkan dampak pencetakan terdistribusi dengan manufaktur konvensional dalam kondisi studi tertentu. Penerapannya pada pembelajaran ini memerlukan batas sistem dan fungsi prototipe yang setara. Kerangka ISO 14040 [19] dapat menjadi dasar penilaian daur hidup yang mencakup tujuan, lingkup, inventori, penilaian dampak, dan interpretasi. Penelitian ini belum melakukan inventori tersebut.

Kaitan dengan SDG 12 dan Pengukuran Lanjutan

SDG 12 memuat sasaran konsumsi serta produksi yang bertanggung jawab. Pembelajaran gambar teknik dapat dikaitkan dengan pengelolaan sumber daya, pencegahan limbah, dan pendidikan keberlanjutan. Pemetaan pada Gambar 3 menggunakan target 12.2, 12.5, dan 12.8 dalam Agenda 2030 [20]. Hubungan ini menunjukkan arah pembelajaran, bukan capaian indikator SDG yang telah diukur.



Gambar 3. Hubungan konseptual pembelajaran desain dengan target SDG 12 [20].

Target 12.2 berkaitan dengan pengelolaan serta penggunaan sumber daya alam secara efisien. Latihan dapat meminta mahasiswa menelusuri hubungan ukuran dengan kebutuhan material dan menjelaskan asumsi estimasi. Target 12.5 berkaitan dengan pengurangan timbulan limbah melalui pencegahan, pengurangan, daur ulang, dan penggunaan kembali. Kegiatan yang relevan adalah pemeriksaan kesalahan sebelum prototipe dibuat serta pencatatan sisa bahan saat prototipe diperlukan.

Target 12.8 berkaitan dengan informasi dan kesadaran mengenai pembangunan berkelanjutan. Mahasiswa dapat mengevaluasi alasan memilih bahan, kebutuhan model fisik, dan kemungkinan akhir pemakaian. Target 12.b berkaitan dengan pemantauan pariwisata berkelanjutan sehingga tidak digunakan untuk menyatakan manfaat RAB digital pada penelitian gambar teknik. Pengurangan kertas juga belum dihitung karena data pemakaian sebelum dan sesudah tidak tersedia.

$$R_{limbah} = ((M_{awal} - M_{akhir}) / M_{awal}) \times 100\% \quad (3)$$

Persamaan (3) merupakan usulan ukuran evaluasi, bukan hasil penelitian. M adalah massa limbah pada kondisi pembandingan dengan satuan, fungsi, dan cakupan yang setara; M awal harus lebih besar dari nol. Catatan perlu mencakup sisa potongan, cetakan gagal, dan bahan penunjang yang relevan. Pengurangan massa tidak langsung menunjukkan pengurangan emisi, karena jenis bahan, energi, dan proses akhir pemakaian juga berpengaruh.

Keterbatasan Penelitian

Empat pasangan skor belum disertai informasi jumlah peserta total, data kelompok manual, rincian rubrik, atau pemeriksaan validitas instrumen. Survei hambatan juga tidak memiliki penyebut yang dapat ditelusuri. Tidak tersedia hasil ukur dimensi, kebutuhan material aktual, jumlah prototipe, energi, maupun emisi. Dengan keterbatasan ini, hasil hanya mendeskripsikan perubahan skor yang ditampilkan; peningkatan presisi, pengurangan limbah, dan dampak kausal SketchUp belum dapat ditetapkan.

KESIMPULAN

Empat pasangan skor yang tersedia menunjukkan peningkatan setelah pembelajaran berbasis praktik menggunakan SketchUp. Rata-rata pre-test sebesar 52,50 dan post-test sebesar 85,43, dengan kenaikan rata-rata 32,93 poin. Selisih individual berkisar 10,00–46,70 poin. Temuan ini menggambarkan perkembangan pada data yang dilaporkan dan belum menetapkan efektivitas dibandingkan pembelajaran manual.

Hambatan yang diuraikan meliputi gangguan aplikasi, keterbatasan perangkat, dan adaptasi alat. Persentase 78% belum dapat diverifikasi karena jumlah responden survei serta aturan penghitungannya tidak dicantumkan. Pembelajaran lanjutan memerlukan pendataan perangkat, penilaian terstruktur, dan tugas pembandingan yang setara agar perubahan kompetensi dapat ditafsirkan lebih jelas.

Pemodelan digital berpotensi mendukung pemeriksaan ukuran, konsistensi proyeksi, dan estimasi kebutuhan bahan sebelum pembuatan prototipe. Potensi tersebut relevan dengan target SDG 12.2, 12.5, dan 12.8. Penelitian belum mengukur penurunan limbah, energi, atau emisi sehingga manfaat lingkungan tidak dinyatakan sebagai hasil empiris. Evaluasi berikutnya perlu menghubungkan data kualitas desain dengan penggunaan material dan penilaian daur hidup yang sesuai.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Industri Universitas Nahdlatul Ulama Pasuruan dan peserta pembelajaran atas dukungan terhadap kegiatan praktik gambar teknik. Partisipasi dalam kegiatan tersebut mendukung pembahasan perkembangan kemampuan pemodelan digital dan kebutuhan pengembangan pembelajaran yang mempertimbangkan penggunaan material.

Pernyataan Kontribusi Penulis (CRediT Statement)

Adinda Agung Salsabilla, Misnatul Sa'ada, dan Rudi Kurniawan tercantum sebagai penulis artikel. Rincian pembagian peran berdasarkan taksonomi CRediT tidak dilaporkan dalam naskah sumber.

Pernyataan Ketersediaan Data

Empat pasangan skor dan perhitungan turunannya disajikan dalam Tabel 1 serta Gambar 2. Instrumen penilaian terperinci, hasil tugas, jawaban individual survei hambatan, dan ketentuan akses data mentah tidak disertakan dalam naskah sumber.

Persetujuan Etik

Penelitian melibatkan mahasiswa melalui penilaian pembelajaran dan survei. Naskah sumber tidak mencantumkan lembaga atau nomor persetujuan etik, rincian persetujuan peserta, maupun prosedur perlindungan data. Status persetujuan etik tidak dapat dipastikan dari informasi yang tersedia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. A. Rosen dan H. A. Kishawy, "Sustainable manufacturing and design: Concepts, practices and needs," *Sustainability*, vol. 4, no. 2, hlm. 154–174, 2012. doi: 10.3390/su4020154.
- [2] N. M. P. Bocken, I. de Pauw, C. Bakker, dan B. van der Grinten, "Product design and business model strategies for a circular economy," *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 33, no. 5, hlm. 308–320, 2016. doi: 10.1080/21681015.2016.1172124.
- [3] S. AlFajri dan I. N. Nasution, "Aplikasi menggambar teknik bangunan dengan menggunakan metode manual dan digital," *Educational Building*, vol. 2, no. 1, hlm. 30–40, 2016. doi: 10.24114/eb.v2i1.3744
- [4] R. D. Atmajayani, "Implementasi penggunaan aplikasi AutoCAD dalam meningkatkan kompetensi dasar menggambar teknik bagi masyarakat," *Briliant: Jurnal Riset dan Konseptual*, vol. 3, no. 2, 2018. doi: 10.28926/briliant.v3i2.174.
- [5] L. Harianja, "Penerapan media 3D Sketchup pada model pembelajaran langsung mata pelajaran menggambar dengan perangkat lunak di SMK Negeri 2 Medan," *Jurnal Pendidikan Teknik Sipil*, vol. 3, no. 2, hlm. 144–150, 2021. doi: 10.21831/jpts.v3i2.36170.
- [6] S. Waluya dan A. Wiyono, "Pengaruh media pembelajaran menggunakan progam Sketchup terhadap kemampuan menggambar proyeksi ortogonal siswa di SMK Negeri 2 Surabaya," *Jurnal Kajian Pendidikan Teknik Bangunan*, vol. 3, no. 3, hlm. 57–74, 2015. doi: 10.26740/jkptb.v1i2.12413
- [7] S. A. Sorby, "Educational research in developing 3-D spatial skills for engineering students," *International Journal of Science Education*, vol. 31, no. 3, hlm. 459–480, 2009. doi: 10.1080/09500690802595839.
- [8] D. H. Uttal, N. G. Meadow, E. Tipton, L. L. Hand, A. R. Alden, C. Warren, dan N. S. Newcombe, "The malleability of spatial skills: A meta-analysis of training studies," *Psychological Bulletin*, vol. 139, no. 2, hlm. 352–402, 2013. doi: 10.1037/a0028446.
- [9] M. Prince, "Does active learning work? A review of the research," *Journal of Engineering Education*, vol. 93, no. 3, hlm. 223–231, 2004. doi: 10.1002/j.2168-9830.2004.tb00809.x.
- [10] S. Freeman, S. L. Eddy, M. McDonough, M. K. Smith, N. Okoroafor, H. Jordt, dan M. P. Wenderoth, "Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111, no. 23, hlm. 8410–8415, 2014. doi: 10.1073/pnas.1319030111.
- [11] International Organization for Standardization, ISO 5456-2:1996 Technical Drawings—Projection Methods—Part 2: Orthographic Representations. Geneva: ISO, 1996.
- [12] W. Kritzing, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, dan W. Sihn, "Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, hlm. 1016–1022, 2018. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
- [13] E. T. H. Vink, K. R. Rábago, D. A. Glassner, dan P. R. Gruber, "Applications of life cycle assessment to NatureWorks polylactide (PLA) production," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 80, no. 3, hlm. 403–419, 2003. doi: 10.1016/S0141-3910(02)00372-5.
- [14] S. Farah, D. G. Anderson, dan R. Langer, "Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications—A comprehensive review," *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 107, hlm. 367–392, 2016. doi: 10.1016/j.addr.2016.06.012.
- [15] J. H. Song, R. J. Murphy, R. Narayan, dan G. B. H. Davies, "Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics," *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 364, no. 1526, hlm. 2127–2139, 2009. doi: 10.1098/rstb.2008.0289.
- [16] B. Stephens, P. Azimi, Z. El Orch, dan T. Ramos, "Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers," *Atmospheric Environment*, vol. 79, hlm. 334–339, 2013. doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.06.050.
- [17] P. Azimi, D. Zhao, C. Pouzet, N. E. Crain, dan B. Stephens, "Emissions of ultrafine particles and volatile organic compounds from commercially available desktop three-dimensional printers with multiple filaments," *Environmental Science & Technology*, vol. 50, no. 3, hlm. 1260–1268, 2016. doi: 10.1021/acs.est.5b04983.
- [18] M. Kreiger dan J. M. Pearce, "Environmental life cycle analysis of distributed three-dimensional printing and conventional manufacturing of polymer products," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 1, no. 12, hlm. 1511–1519, 2013. doi: 10.1021/sc400093k.
- [19] International Organization for Standardization, ISO 14040:2006 Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework. Geneva: ISO, 2006.
- [20] United Nations, Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development, resolusi A/RES/70/1, 2015. <https://docs.un.org/en/A/RES/70/1>