

Peningkatan Kapasitas UMKM Berbasis Ekonomi Hijau melalui Strategi Hemat Energi dan Bahan Baku

Enhancing the Capacity of MSMEs through Green Economy-Based Energy and Raw Material Efficiency Strategies

Arniwita^{1*}, Mega Arum², Cikita Berlian Hakim³, Sri Juminawati⁴,
Ilza Febrina⁵, Siska Mayratih⁶, Eko Sudarmanto⁷

¹ Universitas Muhammadiyah Jambi, Indonesia

² Universitas Pamulang, Indonesia

³ Universitas Muhammadiyah Kudus, Indonesia

⁴ Universitas Boash, Indonesia

⁵ Universitas Teknologi Muhammadiyah Jakarta, Indonesia

^{6,7} Universitas Muhammadiyah Tangerang, Indonesia

Email: arniwita38@gmail.com^{1*}, dosen02864@unpam.ac.id², cikitaiberlian@umkudus.ac.id³,
srijuminawati6@gmail.com⁴, ilza.febrina@utmj.ac.id⁵, siskamayratih@gmail.com⁶,
ekosudarmanto.umt@gmail.com⁷

*Penulis Korespondensi: arniwita38@gmail.com

Riwayat Artikel:

Naskah Masuk: 17 Agustus 2026

Revisi: 24 September 2026

Diterima: 01 Oktober 2026

Terbit: 09 Oktober 2026

Keywords: Capacity Building;
Energy Efficiency; Green Economy;
MSMEs; Raw Material Efficiency.

Abstract: The transition toward a green economy encourages micro, small, and medium enterprises (MSMEs) to use energy and raw materials more efficiently while reducing environmental impacts. However, limited knowledge remains a challenge in adopting environmentally friendly business practices. This community service program aimed to improve the understanding of the MSME community regarding the green economy through education and assistance on energy- and raw-material-saving strategies. The program was conducted online on September 26, 2026, in collaboration with the SSQ Holistik Internasional MSME Community in Malang and was attended by 42 participants. The program used a participatory capacity-building approach consisting of needs identification, education, practical assistance, discussion, and evaluation. Evaluation was conducted using pre-tests and post-tests. The results showed that the average level of understanding increased from 63 to 85, representing an increase of 22 points (34.92%). The normalized gain score was 0.59, categorized as moderate. These findings indicate an improvement in participants' knowledge of energy and raw-material efficiency as part of the green economy. However, increased knowledge does not necessarily indicate actual changes in business practices. Further assistance is needed to encourage implementation and measure energy, raw-material, waste, and cost efficiency in MSME operations.

Abstrak

Transisi menuju ekonomi hijau mendorong usaha mikro, kecil, dan menengah (UMKM) untuk menggunakan energi dan bahan baku secara lebih efisien serta mengurangi dampak lingkungan. Namun, keterbatasan pengetahuan menjadi salah satu kendala dalam penerapan praktik usaha yang ramah lingkungan. Kegiatan pengabdian kepada masyarakat (PkM) ini bertujuan meningkatkan pemahaman komunitas UMKM tentang ekonomi hijau melalui edukasi dan pendampingan strategi hemat energi dan bahan baku. Kegiatan dilaksanakan secara daring pada 26 September 2026 bekerja sama dengan Komunitas UMKM SSQ Holistik Internasional, Malang, dan diikuti 42 peserta. Metode menggunakan *participatory capacity building* melalui identifikasi kebutuhan, edukasi, pendampingan, diskusi, dan evaluasi. Evaluasi dilakukan melalui *pre-test* dan *post-test*. Hasil menunjukkan rata-rata pemahaman meningkat dari 63 menjadi 85, atau naik 22 poin (34,92%). Nilai *normalized gain* sebesar 0,59 termasuk kategori sedang. Hasil ini menunjukkan adanya peningkatan pengetahuan peserta mengenai efisiensi energi dan bahan baku sebagai bagian dari ekonomi hijau. Namun,

peningkatan pengetahuan belum menunjukkan perubahan praktik usaha secara aktual. Pendampingan lanjutan diperlukan untuk mendorong penerapan dan mengukur efisiensi energi, bahan baku, limbah, dan biaya usaha.

Kata Kunci: Capacity Building; Efisiensi Bahan Baku; Efisiensi Energi; Ekonomi Hijau; UMKM.

1. PENDAHULUAN

Transisi menuju ekonomi hijau semakin penting seiring meningkatnya kebutuhan untuk mengintegrasikan pertumbuhan ekonomi dengan efisiensi sumber daya dan perlindungan lingkungan. Dalam konteks usaha, ekonomi hijau tidak hanya berkaitan dengan penggunaan teknologi ramah lingkungan, tetapi juga dengan kemampuan pelaku usaha mengurangi penggunaan energi, bahan baku, air, dan sumber daya lainnya secara tidak efisien. Pendekatan tersebut relevan bagi usaha mikro, kecil, dan menengah (UMKM) karena keberlanjutan usaha sangat dipengaruhi oleh kemampuan mengendalikan biaya operasional sekaligus merespons tuntutan lingkungan. Kajian mengenai keberlanjutan UMKM menunjukkan bahwa karakteristik, keterbatasan sumber daya, serta kapasitas internal UMKM memerlukan pendekatan keberlanjutan yang berbeda dibandingkan perusahaan besar (Moursellas et al., 2023).

UMKM memiliki posisi strategis dalam perekonomian, tetapi aktivitasnya secara kumulatif juga berkaitan dengan penggunaan sumber daya dan timbulan dampak lingkungan. Oleh karena itu, peningkatan efisiensi energi dan bahan baku menjadi salah satu langkah yang relatif aplikatif untuk mendorong transisi UMKM menuju praktik usaha yang lebih hijau. Moursellas et al. (2023) menunjukkan bahwa praktik keberlanjutan pada UMKM antara lain mencakup pengurangan konsumsi energi, efisiensi sumber daya, pengurangan limbah, penggunaan kembali material, dan pengelolaan bahan baku yang lebih bertanggung jawab. Dengan demikian, ekonomi hijau pada tingkat UMKM dapat dimulai dari perubahan praktik operasional yang sederhana, terukur, dan sesuai dengan kapasitas usaha.

Namun, penerapan praktik hijau pada UMKM masih menghadapi berbagai hambatan. Purwandani & Michaud (2021) dan Fuad et al. (2025) menemukan bahwa keterbatasan sumber daya, pengetahuan, kemampuan organisasi, serta berbagai faktor eksternal dapat menghambat adopsi praktik bisnis hijau pada usaha kecil dan menengah. Temuan tersebut sejalan dengan Scipioni et al. (2021) yang menekankan pentingnya proses pembelajaran organisasi dalam membantu UMKM mengatasi hambatan menuju ekonomi sirkular. Dengan kata lain, transformasi menuju usaha yang lebih ramah lingkungan tidak cukup hanya dengan menyediakan informasi mengenai pentingnya keberlanjutan, tetapi memerlukan peningkatan kapasitas agar pelaku UMKM mampu memahami, memilih, dan menerapkan tindakan yang

relevan dengan kondisi usahanya.

Permasalahan kapasitas tersebut juga terlihat dalam konteks adopsi inovasi hijau. Penelitian pada UMKM di Indonesia menunjukkan bahwa penerapan inovasi hijau masih menghadapi berbagai faktor penghambat, sehingga kemampuan dan kesiapan internal menjadi aspek penting dalam mendorong adopsinya (Indrawati et al., 2024). Studi pada negara berkembang lainnya juga menunjukkan bahwa keterbatasan sumber daya, kapabilitas, informasi, dan dukungan organisasi dapat menghambat penerapan keberlanjutan lingkungan pada UMKM (Durrani et al., 2024). Kondisi tersebut menunjukkan adanya kesenjangan antara meningkatnya tuntutan terhadap praktik usaha berkelanjutan dan kapasitas pelaku UMKM untuk menerjemahkan konsep tersebut ke dalam tindakan operasional.

Efisiensi energi merupakan salah satu area yang memiliki relevansi langsung dengan operasional UMKM. Patel et al. (2022) dan Gunawan et al. (2022) menunjukkan bahwa praktik manajemen energi pada UMKM dapat meningkatkan efisiensi energi serta memberikan implikasi terhadap kinerja lingkungan dan finansial. Sementara itu, Millán et al. (2022) menunjukkan bahwa pelatihan keterlibatan dalam efisiensi energi dapat digunakan untuk meningkatkan kesadaran dan keterlibatan pelaku UMKM dalam pengelolaan energi. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa intervensi berbasis edukasi dan peningkatan kapasitas dapat menjadi pintu masuk untuk mendorong praktik efisiensi yang lebih sistematis.

Selain energi, efisiensi bahan baku menjadi aspek penting karena penggunaan material yang berlebihan berpotensi meningkatkan biaya produksi sekaligus menghasilkan limbah. Praktik seperti pengurangan penggunaan material, penggunaan kembali, perbaikan, dan daur ulang merupakan bagian dari pendekatan keberlanjutan yang telah diterapkan pada berbagai UMKM (Moursellas et al., 2023). Oleh karena itu, strategi hemat bahan baku tidak semata-mata diposisikan sebagai tindakan lingkungan, tetapi juga sebagai strategi efisiensi usaha yang berpotensi memperkuat pengendalian biaya dan pemanfaatan sumber daya. Perspektif tersebut penting bagi UMKM karena praktik hijau akan lebih mudah diterima apabila manfaat lingkungan dapat dikaitkan secara langsung dengan kebutuhan operasional dan keberlanjutan usaha.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu lebih banyak mengidentifikasi faktor pendorong, hambatan, kapabilitas, dan hubungan antara praktik hijau dengan kinerja UMKM. Purwandani dan Michaud (2021), misalnya, berfokus pada drivers dan barriers adopsi praktik bisnis hijau, sedangkan Singh et al. (2022) dan Pangarso et al. (2022) mengkaji orientasi keberlanjutan lingkungan dan kapabilitas hijau dalam kaitannya dengan kinerja lingkungan UMKM. Penelitian lainnya juga banyak menempatkan inovasi hijau dan

kapabilitas organisasi sebagai faktor yang menjelaskan keberlanjutan UMKM (Rodrigues & Franco, 2023; Wasiq et al., 2023).

Research gap yang dapat diidentifikasi adalah masih terbatasnya kajian yang menerjemahkan temuan mengenai hambatan dan kapabilitas tersebut ke dalam intervensi PkM yang sederhana, partisipatif, dan secara khusus mengintegrasikan edukasi ekonomi hijau dengan strategi hemat energi dan bahan baku pada komunitas UMKM. Padahal, pengembangan kapasitas melalui pelatihan dapat membantu membangun kompetensi tindakan keberlanjutan pada UMKM (Schröder et al., 2023). Dengan demikian, terdapat kebutuhan untuk mengembangkan model pendampingan yang tidak berhenti pada peningkatan kesadaran, tetapi memberikan pemahaman praktis mengenai tindakan efisiensi yang dapat dilakukan dalam aktivitas usaha sehari-hari.

Berdasarkan kondisi tersebut, kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini dilaksanakan bersama Komunitas UMKM SSQ Holistik Internasional di Malang sebagai upaya memperkuat kapasitas pelaku UMKM dalam memahami dan menerapkan prinsip ekonomi hijau. Kegiatan diarahkan pada edukasi dan pendampingan mengenai strategi hemat energi dan bahan baku yang dapat disesuaikan dengan karakteristik usaha peserta. Pendekatan *participatory capacity building* digunakan agar peserta tidak hanya menerima materi, tetapi juga terlibat dalam proses identifikasi permasalahan, diskusi, dan pemahaman terhadap alternatif tindakan efisiensi. Pendekatan penguatan kapasitas semacam ini relevan karena pembelajaran, kolaborasi, dan pengembangan kompetensi merupakan unsur penting dalam membangun transformasi keberlanjutan pada tingkat usaha kecil (Lobo et al., 2022; Scipioni et al., 2021).

Berdasarkan uraian tersebut, rumusan masalah kegiatan ini adalah bagaimana meningkatkan kapasitas pemahaman komunitas UMKM mengenai ekonomi hijau melalui edukasi dan pendampingan strategi hemat energi dan bahan baku. Tujuan kegiatan adalah meningkatkan pemahaman peserta mengenai prinsip ekonomi hijau serta kemampuan mengenali strategi sederhana untuk meningkatkan efisiensi energi dan penggunaan bahan baku dalam kegiatan usaha. Pengukuran dilakukan melalui *pre-test* dan *post-test* untuk mengidentifikasi perubahan tingkat pemahaman peserta setelah kegiatan.

Kebaruan kegiatan terletak pada integrasi antara edukasi ekonomi hijau dan strategi efisiensi energi serta bahan baku dalam satu intervensi *capacity building* yang bersifat praktis dan partisipatif pada komunitas UMKM. Berbeda dari pendekatan yang hanya menekankan kesadaran lingkungan atau faktor adopsi inovasi, kegiatan ini mengarahkan pengetahuan ekonomi hijau pada tindakan operasional yang relatif sederhana dan relevan dengan kebutuhan

UMKM. Kontribusi kegiatan tidak hanya terletak pada peningkatan literasi ekonomi hijau, tetapi juga pada penyediaan dasar bagi pendampingan lanjutan yang dapat mengukur perubahan praktik melalui indikator konsumsi energi, penggunaan bahan baku, limbah, dan efisiensi biaya. Dengan demikian, kegiatan ini diharapkan menjadi tahap awal dalam membangun kapasitas UMKM menuju praktik usaha yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

2. METODE

Kegiatan pengabdian kepada masyarakat (PkM) ini menggunakan pendekatan *participatory capacity building*, yaitu pendekatan penguatan kapasitas yang menempatkan peserta sebagai pihak yang aktif dalam proses identifikasi masalah, pembelajaran, diskusi, dan perumusan tindakan perbaikan. Pendekatan ini dipilih karena keterbatasan pengetahuan, sumber daya, dan kapasitas internal merupakan salah satu kendala UMKM dalam mengadopsi praktik keberlanjutan. Proses pembelajaran dan transfer pengetahuan juga berperan penting dalam membantu UMKM membangun kemampuan untuk beradaptasi dengan praktik ekonomi sirkular dan berkelanjutan (Scipioni et al., 2021). Selain itu, pelatihan yang berorientasi pada tindakan dapat meningkatkan kompetensi peserta untuk menerapkan prinsip keberlanjutan dalam aktivitas usaha (Schröder et al., 2023).

Kegiatan dilaksanakan secara daring pada 26 September 2026 bekerja sama dengan Komunitas UMKM SSQ Holistik Internasional di Malang. Peserta kegiatan berjumlah 42 orang yang merupakan anggota komunitas UMKM. Pemilihan mitra dilakukan berdasarkan relevansi karakteristik peserta dengan tujuan kegiatan, yaitu penguatan pemahaman dan kapasitas pelaku UMKM dalam menerapkan prinsip ekonomi hijau melalui efisiensi penggunaan energi dan bahan baku. Pelaksanaan secara daring dipilih untuk memperluas akses partisipasi dan memberikan fleksibilitas kepada peserta tanpa mengurangi kesempatan untuk melakukan interaksi melalui pemaparan materi, diskusi, tanya jawab, dan evaluasi (Sudarmanto et al, 2024).

Pelaksanaan kegiatan terdiri atas lima tahapan utama, yaitu identifikasi kebutuhan, edukasi, pendampingan aplikatif, diskusi partisipatif, dan evaluasi. Tahap pertama berupa identifikasi kebutuhan dilakukan melalui komunikasi awal dengan mitra dan penggalian permasalahan yang berkaitan dengan pemahaman ekonomi hijau, penggunaan energi, pemakaian bahan baku, serta potensi pemborosan dalam kegiatan usaha. Identifikasi kebutuhan digunakan sebagai dasar untuk menyesuaikan materi dengan karakteristik dan kebutuhan peserta. Pendekatan berbasis kebutuhan penting karena intervensi keberlanjutan pada UMKM

perlu mempertimbangkan keterbatasan waktu, keahlian, dan sumber daya yang tersedia (Schröder et al., 2023).

Tahap kedua adalah edukasi ekonomi hijau yang dilakukan melalui penyampaian materi secara interaktif. Materi mencakup konsep dasar ekonomi hijau, pentingnya efisiensi sumber daya bagi UMKM, hubungan antara efisiensi sumber daya dan pengendalian biaya, strategi hemat energi, serta strategi efisiensi penggunaan bahan baku. Materi energi diarahkan pada tindakan sederhana yang dapat dilakukan UMKM, seperti mengidentifikasi sumber konsumsi energi, mengurangi penggunaan peralatan yang tidak diperlukan, mengoptimalkan waktu penggunaan peralatan, dan membangun kebiasaan penggunaan energi secara efisien. Pendekatan edukasi dan pelatihan mengenai energi dinilai relevan untuk meningkatkan kesadaran dan mendorong keterlibatan UMKM dalam upaya peningkatan kinerja energi (Millán et al., 2022).

Tahap ketiga berupa pendampingan aplikatif yang mengarahkan peserta untuk menghubungkan materi dengan kondisi usaha masing-masing. Peserta didorong untuk mengidentifikasi penggunaan energi dan bahan baku yang berpotensi menimbulkan pemborosan serta mendiskusikan alternatif penghematannya. Pada aspek bahan baku, peserta diarahkan untuk memperhatikan ketepatan penggunaan material, mengurangi bahan yang terbuang, memanfaatkan kembali material yang masih layak, serta mempertimbangkan pengelolaan limbah sebagai bagian dari efisiensi sumber daya. Pendekatan ini sejalan dengan gagasan bahwa pembelajaran organisasi dapat membantu UMKM mengubah hambatan keberlanjutan menjadi kemampuan untuk menerapkan praktik ekonomi sirkular (Cantú et al., 2021; Asad et al., 2023).

Tahap keempat adalah diskusi dan refleksi partisipatif. Peserta diberikan kesempatan untuk menyampaikan pengalaman, kendala, dan kebutuhan terkait penerapan strategi hemat energi dan bahan baku pada kegiatan usahanya. Diskusi digunakan untuk memperjelas materi sekaligus mengidentifikasi tindakan yang realistis sesuai karakteristik masing-masing UMKM. Pola pembelajaran yang menggabungkan penyampaian konsep, diskusi, pengalaman, dan kesempatan untuk mencoba tindakan keberlanjutan dipandang lebih mendukung pembentukan kompetensi keberlanjutan dibandingkan pembelajaran yang hanya berorientasi pada transfer informasi (Schröder et al., 2023).

Tahap kelima adalah evaluasi kegiatan yang dilakukan menggunakan *pre-test* dan *post-test*. *Pre-test* diberikan sebelum penyampaian materi untuk mengetahui tingkat pemahaman awal peserta, sedangkan *post-test* diberikan setelah seluruh rangkaian edukasi dan pendampingan selesai untuk mengetahui perubahan pemahaman. Instrumen evaluasi berisi

pertanyaan yang berkaitan dengan konsep ekonomi hijau, efisiensi energi, efisiensi bahan baku, dan penerapan strategi hemat sumber daya pada aktivitas UMKM. Perubahan pemahaman dianalisis dengan membandingkan nilai rata-rata *pre-test* dan *post-test*. Selain perubahan skor absolut, efektivitas peningkatan pembelajaran dihitung menggunakan normalized gain (N-Gain) dengan rumus:

$$[N\text{-Gain} = (\text{Posttest} - \text{Pretest}) / (100 - \text{Pretest})] \dots\dots\dots(i)$$

Interpretasi N-Gain digunakan untuk menggambarkan tingkat peningkatan pemahaman peserta setelah intervensi. Evaluasi tersebut hanya digunakan untuk menilai perubahan pengetahuan/pemahaman, bukan untuk menyimpulkan penurunan konsumsi energi, pengurangan penggunaan bahan baku, perubahan perilaku, atau peningkatan kinerja bisnis. Pengukuran dampak pada praktik usaha memerlukan pemantauan lanjutan terhadap indikator aktual, seperti konsumsi energi, volume bahan baku, jumlah limbah, dan biaya operasional.

Secara keseluruhan, metode pelaksanaan dirancang sebagai siklus peningkatan kapasitas yang sederhana dan aplikatif, mulai dari identifikasi kebutuhan, pemberian pengetahuan, penguatan kemampuan praktis, diskusi, hingga evaluasi. Desain tersebut menempatkan edukasi sebagai tahap awal menuju perubahan praktik usaha yang lebih berkelanjutan. Dengan demikian, hasil kegiatan tidak hanya memberikan gambaran mengenai perubahan pemahaman peserta, tetapi juga menjadi dasar untuk merancang pendampingan lanjutan yang lebih terukur dalam penerapan efisiensi energi dan bahan baku pada UMKM.

Tabel 1. Indikator Keberhasilan Kegiatan.

Level	Indikator	Target	Hasil
Input	Keterlibatan mitra	1 komunitas	Tercapai
Output	Jumlah peserta	≥40	42
Output	Pelaksanaan edukasi	1 kegiatan	Tercapai
Output	Pendampingan/diskusi	1 rangkaian	Tercapai
Outcome	Nilai pemahaman	≥80	85
Outcome	Peningkatan nilai	Positif	+22 poin
Outcome	Peningkatan relatif	Positif	34,92%
Outcome	N-Gain	>0,30	0,59

Sumber: Data indikator keberhasilan kegiatan PkM, 2026.

3. HASIL

Pelaksanaan Kegiatan

Kegiatan pengabdian kepada masyarakat (PkM) dengan tema “Peningkatan Kapasitas UMKM Berbasis Ekonomi Hijau Melalui Strategi Hemat Energi dan Bahan Baku” dilaksanakan secara daring pada 26 September 2026 bekerja sama dengan Komunitas UMKM SSQ Holistik Internasional di Malang. Kegiatan diikuti oleh 42 peserta yang berasal dari

komunitas UMKM. Pelaksanaan kegiatan menggunakan pendekatan *participatory capacity building* dengan menempatkan peserta sebagai pihak yang aktif dalam proses pembelajaran, diskusi, identifikasi permasalahan, dan pemahaman terhadap alternatif strategi efisiensi sumber daya.

Rangkaian kegiatan terdiri atas identifikasi kebutuhan, penyampaian materi ekonomi hijau, pendampingan aplikatif, diskusi, dan evaluasi. Materi diarahkan pada pemahaman mengenai konsep ekonomi hijau serta penerapannya dalam kegiatan operasional UMKM, terutama melalui penghematan energi dan bahan baku. Peserta diperkenalkan pada berbagai bentuk efisiensi yang relatif sederhana, seperti mengidentifikasi penggunaan energi dalam proses usaha, menghindari penggunaan peralatan yang tidak diperlukan, mengoptimalkan pemakaian peralatan, mengurangi pemborosan bahan baku, menggunakan bahan secara lebih tepat, dan memanfaatkan kembali material yang masih memiliki nilai guna.

Pelaksanaan kegiatan menunjukkan bahwa strategi edukasi yang menggabungkan penyampaian konsep dengan contoh aplikatif memberikan ruang bagi peserta untuk menghubungkan konsep ekonomi hijau dengan aktivitas usaha sehari-hari. Diskusi juga memberikan kesempatan kepada peserta untuk mengidentifikasi bahwa efisiensi sumber daya tidak selalu membutuhkan investasi teknologi yang besar. Beberapa strategi dapat dimulai melalui perubahan pengelolaan dan kebiasaan operasional, meskipun penerapan aktualnya tetap memerlukan pendampingan dan pemantauan lebih lanjut.

Hasil Evaluasi Pemahaman Peserta

Evaluasi dilakukan melalui *pre-test* dan *post-test*. *Pre-test* diberikan sebelum kegiatan inti untuk mengetahui tingkat pemahaman awal peserta, sedangkan *post-test* diberikan setelah penyampaian materi, pendampingan, dan diskusi. Instrumen evaluasi diarahkan pada pemahaman mengenai ekonomi hijau, efisiensi energi, efisiensi bahan baku, dan strategi penghematan sumber daya dalam aktivitas UMKM.

Hasil evaluasi menunjukkan adanya peningkatan rata-rata pemahaman peserta. Nilai rata-rata *pre-test* sebesar 63, sedangkan rata-rata *post-test* meningkat menjadi 85. Dengan demikian, terjadi peningkatan sebesar 22 poin. Jika dibandingkan dengan nilai awal, peningkatan tersebut setara dengan 34,92%. Hasil tersebut memberikan indikasi bahwa setelah mengikuti rangkaian edukasi dan pendampingan, peserta memiliki tingkat pemahaman yang lebih tinggi mengenai konsep ekonomi hijau dan strategi efisiensi energi serta bahan baku.

Tabel 2. Perbandingan Pre-test dan Post-test.

Indikator	Pre-test	Post-test	Perubahan
Jumlah peserta	42	42	–
Rata-rata nilai	63	85	+22
Peningkatan relatif	–	–	34,92%
Normalized gain	–	–	0,59
Kategori N-Gain	–	–	Sedang

Sumber: Data evaluasi kegiatan PkM, 2026.

Untuk memperoleh gambaran yang lebih proporsional mengenai tingkat peningkatan pemahaman, dilakukan perhitungan *normalized gain* (N-Gain). Berdasarkan skor *pre-test* dan *post-test*, diperoleh nilai N-Gain sebesar 0,59, yang berada pada kategori sedang. Nilai tersebut menunjukkan bahwa peningkatan pemahaman peserta berada pada tingkat moderat, sehingga kegiatan belum dapat dipandang menghasilkan peningkatan penguasaan materi secara maksimal.

Temuan tersebut penting karena peningkatan skor tidak hanya menunjukkan adanya perbedaan antara kondisi sebelum dan sesudah kegiatan, tetapi juga memberikan gambaran mengenai ruang pengembangan program. Nilai N-Gain sebesar 0,59 menunjukkan bahwa masih terdapat ruang untuk memperkuat proses pembelajaran melalui pendampingan yang lebih intensif, studi kasus berdasarkan jenis usaha peserta, simulasi pengukuran konsumsi energi dan bahan baku, serta tindak lanjut setelah kegiatan.

Secara keseluruhan, hasil evaluasi memperlihatkan bahwa intervensi PkM berhasil meningkatkan kapasitas pengetahuan/pemahaman peserta. Namun, hasil ini perlu dibatasi pada indikator yang memang diukur. Data *pre-test* dan *post-test* belum memberikan bukti mengenai perubahan perilaku usaha, penurunan konsumsi listrik atau bahan bakar, pengurangan penggunaan bahan baku, penurunan volume limbah, maupun penghematan biaya. Oleh karena itu, hasil kegiatan lebih tepat diposisikan sebagai tahap awal penguatan kapasitas UMKM menuju praktik ekonomi hijau, bukan sebagai bukti bahwa praktik hijau telah diterapkan secara aktual.

Temuan tersebut juga memberikan dasar bagi pengembangan program lanjutan. Evaluasi berikutnya dapat dilakukan dengan mengukur indikator yang lebih konkret, seperti konsumsi energi per periode produksi, jumlah bahan baku yang digunakan, persentase bahan baku terbuang, volume limbah, dan biaya operasional. Dengan pendekatan tersebut, peningkatan pengetahuan dapat ditelusuri lebih lanjut hingga pada perubahan praktik dan efisiensi usaha.



Gambar 1. Tangkapan layar presentasi oleh Narasumber.

4. DISKUSI

Peningkatan Pemahaman sebagai Tahap Awal Transformasi UMKM Hijau

Hasil kegiatan menunjukkan peningkatan rata-rata pemahaman peserta dari 63 menjadi 85, dengan kenaikan 22 poin atau 34,92%. N-Gain sebesar 0,59 yang berada pada kategori sedang menunjukkan bahwa edukasi dan pendampingan memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan pemahaman peserta mengenai ekonomi hijau, efisiensi energi, dan efisiensi bahan baku. Dalam konteks PkM, temuan ini penting karena transformasi UMKM menuju praktik yang lebih berkelanjutan pada dasarnya memerlukan proses pembelajaran sebelum pelaku usaha mampu mengintegrasikan prinsip keberlanjutan ke dalam pengambilan keputusan operasional.

Temuan tersebut konsisten dengan pandangan bahwa keterbatasan pengetahuan merupakan salah satu hambatan penting dalam penerapan praktik lingkungan pada UMKM. Purwandani dan Michaud (2021) menunjukkan bahwa UMKM menghadapi berbagai hambatan dalam mengadopsi praktik bisnis hijau, termasuk keterbatasan sumber daya dan modal. Durrani et al. (2024) juga menemukan bahwa keterbatasan pendidikan dan sumber daya finansial dapat menjadi hambatan dalam mengenali dan menangani persoalan keberlanjutan lingkungan pada UMKM. Dengan demikian, peningkatan pengetahuan melalui PkM merupakan intervensi awal yang relevan untuk memperkecil kesenjangan antara tuntutan keberlanjutan dan kapasitas pelaku usaha.

Namun demikian, nilai N-Gain 0,59 yang berada pada kategori sedang juga menunjukkan bahwa peningkatan pemahaman belum sepenuhnya optimal. Kondisi tersebut dapat dijelaskan oleh karakteristik pembelajaran yang dilakukan dalam satu rangkaian kegiatan daring. Pemahaman mengenai ekonomi hijau tidak hanya berkaitan dengan penguasaan

definisi, tetapi juga kemampuan mengidentifikasi sumber pemborosan, menghitung penggunaan sumber daya, menentukan prioritas tindakan, serta menghubungkan efisiensi sumber daya dengan biaya usaha. Oleh karena itu, peningkatan pengetahuan membutuhkan proses pembelajaran berulang dan kontekstual agar dapat berkembang menjadi kompetensi tindakan.

Schröder et al. (2023) menegaskan bahwa pelatihan keberlanjutan pada UMKM perlu diarahkan pada pengembangan *action competence*, bukan sekadar penyampaian informasi. Studi tersebut menunjukkan bahwa pelatihan yang berorientasi pada tindakan dapat membantu mengembangkan kompetensi keberlanjutan, terutama ketika faktor organisasi yang mendukung juga tersedia. Dengan perspektif tersebut, hasil PkM ini dapat dipandang sebagai *entry point* untuk membangun kompetensi peserta sebelum dilakukan pendampingan yang lebih aplikatif dan berkelanjutan.

Efisiensi Energi sebagai Strategi Ekonomi Hijau yang Aplikatif

Salah satu fokus kegiatan adalah strategi hemat energi. Pendekatan ini memiliki relevansi langsung dengan aktivitas UMKM karena energi merupakan salah satu input yang digunakan dalam proses produksi dan operasional. Penggunaan energi yang tidak efisien dapat meningkatkan biaya usaha sekaligus memperbesar dampak lingkungan. Oleh karena itu, pengenalan strategi efisiensi energi dapat menjadi salah satu langkah awal yang relatif mudah dipahami pelaku UMKM.

Hasil kegiatan yang menunjukkan peningkatan pemahaman mengenai efisiensi energi sejalan dengan Millán et al. (2022), yang mengembangkan pelatihan keterlibatan efisiensi energi pada UMKM. Studi tersebut menunjukkan pentingnya pelibatan dan pelatihan dalam meningkatkan perhatian terhadap efisiensi energi pada lingkungan usaha. Temuan tersebut memperkuat argumentasi bahwa edukasi bukan sekadar aktivitas transfer pengetahuan, tetapi dapat digunakan untuk membangun kesadaran dan kapasitas awal dalam mengelola energi secara lebih efisien.

Dalam konteks UMKM, strategi hemat energi sebaiknya tidak selalu diasosiasikan dengan investasi teknologi yang mahal. Tahap awal dapat berupa identifikasi peralatan yang paling banyak mengonsumsi energi, pengaturan waktu penggunaan peralatan, pemeliharaan peralatan, menghindari kondisi *standby* yang tidak diperlukan, dan membangun kebiasaan penggunaan energi secara lebih disiplin. Strategi tersebut relatif sesuai dengan keterbatasan sumber daya yang sering dihadapi UMKM.

Akan tetapi, hasil PkM ini belum memungkinkan untuk menyatakan bahwa konsumsi energi peserta telah menurun. Peningkatan skor pengetahuan hanya menunjukkan perubahan

pada aspek kognitif. Untuk membuktikan manfaat ekonomi dan lingkungan secara lebih kuat, kegiatan lanjutan perlu melakukan *baseline measurement* dan *follow-up measurement*. Misalnya, konsumsi listrik sebelum dan sesudah penerapan strategi dapat dicatat dalam kWh per bulan atau kWh per unit produksi. Dengan demikian, perubahan pengetahuan dapat dikaitkan dengan indikator efisiensi energi yang objektif.

Efisiensi Bahan Baku dan Pengurangan Pemborosan

Selain energi, bahan baku merupakan komponen penting dalam efisiensi usaha. Pemborosan bahan baku dapat meningkatkan biaya produksi dan menghasilkan limbah yang sebenarnya masih dapat diminimalkan. Karena itu, strategi hemat bahan baku dalam PkM ini ditempatkan sebagai bagian dari ekonomi hijau yang menghubungkan kepentingan ekonomi dengan kepentingan lingkungan.

Scipioni et al. (2021) menjelaskan bahwa proses pembelajaran organisasi memiliki peran penting dalam membantu UMKM berpindah dari kondisi yang penuh hambatan menuju praktik ekonomi sirkular. Pembelajaran mencakup proses penciptaan, transfer, dan pemeliharaan pengetahuan yang memungkinkan organisasi mengembangkan kemampuan baru. Perspektif tersebut relevan dengan kegiatan PkM karena peserta tidak hanya diberikan pengetahuan mengenai pentingnya menghemat bahan baku, tetapi juga diarahkan untuk mengidentifikasi potensi pemborosan dalam kegiatan usahanya.

Strategi efisiensi bahan baku dapat dimulai melalui pengendalian penggunaan material, perencanaan kebutuhan bahan, standardisasi takaran, pemanfaatan bahan secara optimal, penggunaan kembali material yang masih layak, serta pemisahan material yang dapat dimanfaatkan kembali. Bagi UMKM, langkah tersebut berpotensi memiliki dua manfaat sekaligus, yaitu mengurangi pemborosan biaya dan mengurangi timbulan limbah. Dengan demikian, efisiensi bahan baku dapat menjadi titik temu antara tujuan ekonomi dan tujuan lingkungan dalam implementasi ekonomi hijau.

Namun, sebagaimana pada aspek energi, peningkatan pemahaman belum dapat digunakan untuk menyatakan bahwa peserta telah berhasil mengurangi penggunaan bahan baku. Pengukuran aktual memerlukan data kuantitatif sebelum dan sesudah intervensi. Indikator seperti kilogram bahan baku per unit produk, persentase bahan baku terbuang, dan biaya bahan baku per unit produksi dapat digunakan untuk mengukur perubahan secara lebih objektif.

Kapasitas Internal sebagai Faktor Penting Adopsi Praktik Hijau

Hasil PkM juga dapat dipahami dalam kerangka pengembangan kapasitas internal UMKM. Lestari dan Sunyoto (2023), dalam studi terhadap 160 UMKM sektor pangan di

Malang Raya, menunjukkan bahwa sumber daya dan kapabilitas serta komitmen manajemen berhubungan positif dengan inovasi hijau, yang selanjutnya berkontribusi terhadap kinerja berkelanjutan. Temuan ini memberikan konteks penting bagi kegiatan PkM karena pengetahuan merupakan salah satu bagian dari kapasitas internal yang perlu diperkuat sebelum UMKM mampu menjalankan inovasi atau praktik hijau secara lebih konsisten.

Temuan dari penelitian mengenai adopsi inovasi hijau pada UMKM Indonesia juga menunjukkan bahwa adopsi praktik hijau dipengaruhi oleh sejumlah faktor internal dan eksternal. Studi pada UMKM sektor pangan berbasis nanas di Indonesia menunjukkan bahwa konteks adopsi inovasi hijau perlu dipahami dengan mempertimbangkan karakteristik usaha dan faktor yang memengaruhi kesediaan UMKM untuk mengadopsinya (Indrawati et al., 2025). Hal ini menunjukkan bahwa kegiatan edukasi perlu ditempatkan dalam konteks yang lebih luas. Pengetahuan penting, tetapi bukan satu-satunya faktor yang menentukan keberhasilan transformasi UMKM.

Dalam perspektif tersebut, N-Gain 0,59 dapat dibaca sebagai indikator bahwa intervensi berhasil menciptakan peningkatan kapasitas awal, tetapi belum menyelesaikan seluruh persoalan implementasi. Tahap berikutnya perlu diarahkan pada pendampingan yang lebih individual berdasarkan jenis usaha, tingkat konsumsi energi, karakteristik bahan baku, dan kemampuan finansial peserta. Dengan demikian, pendekatan PkM dapat berkembang dari *knowledge transfer* menjadi *capacity development* yang berorientasi pada tindakan.

Kesenjangan antara Pengetahuan dan Praktik

Salah satu temuan penting dari kegiatan ini adalah perlunya membedakan antara *knowledge improvement*, *behavioral change*, dan *business performance improvement*. Peningkatan nilai *post-test* membuktikan perubahan pada tingkat pemahaman, tetapi tidak secara otomatis membuktikan bahwa peserta telah mengubah perilakunya. Bahkan apabila perilaku telah berubah, perubahan tersebut belum tentu langsung menghasilkan peningkatan kinerja usaha.

Pembedaan tersebut penting karena penelitian keberlanjutan UMKM sering menghubungkan kapabilitas, inovasi hijau, dan praktik lingkungan dengan kinerja usaha. Misalnya, penelitian mengenai *green innovation* menunjukkan adanya keterkaitan antara inovasi hijau dan keberlanjutan usaha (Baeshen et al., 2021), termasuk dalam konteks UMKM Indonesia (Lestari & Sunyoto, 2023). Akan tetapi, hubungan semacam itu tidak dapat langsung diterapkan pada hasil PkM ini karena desain kegiatan hanya mengukur perubahan pemahaman melalui *pre-test* dan *post-test*.

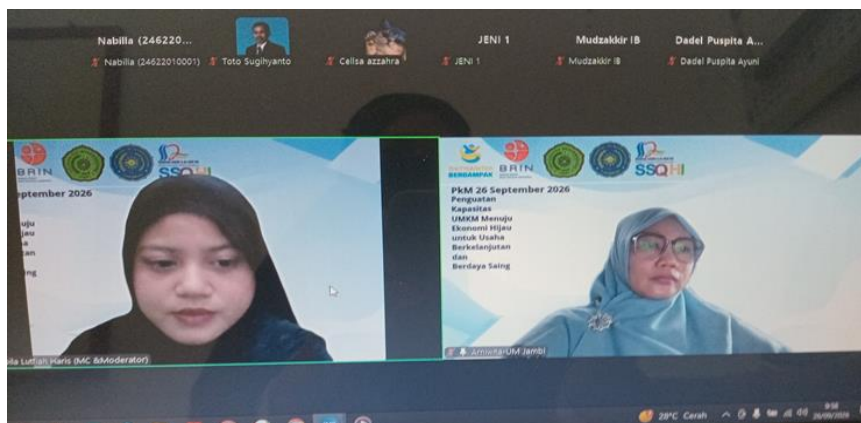
Dengan demikian, kekuatan hasil PkM justru terletak pada kehati-hatian dalam menginterpretasikan bukti. Program telah menghasilkan perubahan yang terukur pada pengetahuan, sedangkan perubahan praktik dan dampak ekonomi-lingkungan masih menjadi agenda pengukuran berikutnya. Pendekatan ini konsisten dengan kebutuhan evaluasi keberlanjutan yang membedakan indikator input, proses, output, outcome, dan dampak.

Implikasi bagi Pengembangan Program PkM

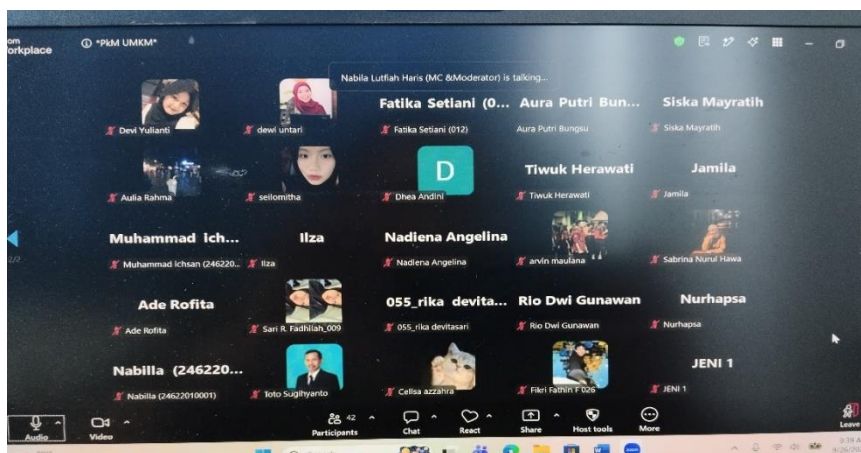
Berdasarkan hasil dan pembahasan tersebut, program PkM dapat dikembangkan melalui model pendampingan bertahap. Tahap pertama adalah penguatan literasi ekonomi hijau seperti yang dilakukan dalam kegiatan ini. Tahap kedua dapat berupa penyusunan *resource-efficiency checklist* yang membantu UMKM mengidentifikasi sumber pemborosan energi dan bahan baku. Tahap ketiga berupa pencatatan sederhana konsumsi energi, penggunaan bahan baku, limbah, dan biaya. Tahap keempat adalah pendampingan penerapan strategi efisiensi. Tahap terakhir adalah evaluasi perubahan berdasarkan indikator aktual.

Model tersebut relevan dengan gagasan bahwa transisi UMKM menuju keberlanjutan memerlukan proses pembelajaran organisasi secara bertahap (Scipioni et al., 2021). Selain itu, hambatan berupa keterbatasan pengetahuan, pendidikan, sumber daya, dan dukungan juga menunjukkan bahwa intervensi harus disesuaikan dengan kapasitas nyata UMKM (Durrani et al., 2024). Oleh karena itu, program PkM selanjutnya tidak cukup berhenti pada webinar atau pelatihan satu kali, tetapi perlu mengembangkan mekanisme *follow-up* untuk memastikan pengetahuan diterjemahkan menjadi tindakan.

Secara keseluruhan, hasil kegiatan menunjukkan bahwa edukasi dan pendampingan dapat menjadi tahap awal yang relevan dalam memperkuat kapasitas UMKM menuju ekonomi hijau. Peningkatan skor dari 63 menjadi 85 dan N-Gain sebesar 0,59 menunjukkan adanya peningkatan pemahaman yang terukur. Namun, efektivitas program dalam menghasilkan perubahan praktik usaha masih perlu diuji melalui pengukuran longitudinal. Dengan demikian, kontribusi kegiatan ini tidak semata-mata terletak pada peningkatan skor pengetahuan, tetapi juga pada pembentukan fondasi kapasitas yang dapat dikembangkan menuju penerapan efisiensi energi dan bahan baku yang terukur.



Gambar 2. Tangkapan layar Moderator dan Narasumber.



Gambar 3. Tangkapan layar peserta kegiatan.

5. KESIMPULAN

Kegiatan pengabdian kepada masyarakat bertema “Peningkatan Kapasitas UMKM Berbasis Ekonomi Hijau melalui Strategi Hemat Energi dan Bahan Baku” yang dilaksanakan pada 26 September 2026 bekerja sama dengan Komunitas UMKM SSQ Holistik Internasional di Malang telah memberikan hasil positif terhadap peningkatan pemahaman peserta. Kegiatan yang diikuti oleh 42 peserta tersebut menunjukkan peningkatan nilai rata-rata pemahaman dari 63 menjadi 85, atau meningkat sebesar 22 poin dan 34,92% dibandingkan nilai awal. Nilai *normalized gain* sebesar 0,59 menunjukkan peningkatan pemahaman pada kategori sedang.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa edukasi yang dipadukan dengan pendampingan dan diskusi aplikatif dapat menjadi instrumen efektif untuk meningkatkan kapasitas awal UMKM dalam memahami ekonomi hijau, khususnya strategi efisiensi energi dan bahan baku. Peningkatan pemahaman tersebut memberikan fondasi bagi peserta untuk mulai mengidentifikasi sumber pemborosan, peluang efisiensi, dan kemungkinan pengembangan green process maupun green product innovation.

Namun, peningkatan pemahaman belum dapat diinterpretasikan sebagai bukti bahwa konsumsi energi dan bahan baku telah menurun. Kegiatan belum melakukan pengukuran aktual terhadap kWh energi, volume bahan baku, limbah, maupun biaya produksi sebelum dan sesudah intervensi. Keterbatasan tersebut menjadi agenda penting bagi program lanjutan.

Keberlanjutan kegiatan direkomendasikan melalui penerapan *Green Resource Efficiency Cycle* yang meliputi *awareness, measurement, diagnosis, action, innovation, evaluation*, dan *continuous improvement*. Dengan demikian, program PkM dapat berkembang dari kegiatan edukasi menjadi proses transformasi UMKM yang menghasilkan bukti terukur mengenai efisiensi energi, penghematan bahan baku, pengurangan limbah, inovasi hijau, dan peningkatan keberlanjutan usaha.

PENGAKUAN/ACKNOWLEDGEMENTS

Tim pelaksana menyampaikan terima kasih kepada Komunitas UMKM SSQ Holistik Internasional di Malang atas kerja sama, dukungan, dan partisipasi aktif dalam pelaksanaan kegiatan pengabdian kepada masyarakat. Apresiasi juga disampaikan kepada narasumber, para pelaku UMKM, dan seluruh peserta yang telah mengikuti kegiatan dengan antusias serta kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan secara langsung maupun tidak langsung sehingga kegiatan edukasi dan pendampingan ekonomi hijau ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR REFERENSI

- Asad, M., Majali, T., Aledeinat, M., Almajali, D. A., & Akhorshaideh, A. H. O. (2023). Green entrepreneurial orientation for enhancing SMEs financial and environmental performance: Synergetic moderation of green technology dynamism and knowledge transfer and integration. *Cogent Business & Management*, 10(3), 2278842. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/23311975.2023.2278842>
- Baeshen, Y., Soomro, Y. A., & Bhutto, M. Y. (2021). Determinants of green innovation to achieve sustainable business performance: Evidence from SMEs. *Frontiers in Psychology*, 12, 767968. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.767968>
- Cantú, A., Aguiñaga, E., & Scheel, C. (2021). Learning from failure and success: The challenges for circular economy implementation in SMEs in an emerging economy. *Sustainability*, 13(3), 1529. <https://doi.org/10.3390/su13031529>
- Durrani, N., Raziq, A., Mahmood, T., & Khan, M. R. (2024). Barriers to adaptation of environmental sustainability in SMEs: A qualitative study. *PLOS ONE*, 19(5), e0298580. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0298580>
- Eko Sudarmanto, Lena Erdawati, Muh Abdul Rosid, IKa Purwanti, Humairoh, Annisaa Fitrah Umara, Daniel Rahandri, Dede Sunaryo, Teti Rahmawati, Yanthi Meitry Gunawan, Wahidin, Sumardi Sadi, Hendera, Seleman Hardi Yahawi, B. M. A. (2024). *Konsep Pengabdian Kepada Masyarakat di Era Digital* (Y. N. Warsito (ed.)). Minhaj Pustaka.

- Fuad, E. N., Edward, M. Y., Aminnudin, M., & Rhomadhon, M. S. (2025). Enhancing sustainability in Indonesian SMEs through green HRM and supply chains. *Problems and Perspectives in Management*, 23(2), 384–397. [https://doi.org/10.21511/ppm.23\(2\).2025.27](https://doi.org/10.21511/ppm.23(2).2025.27)
- Gunawan, A. A., Bloemer, J., van Riel, A. C. R., & Essers, C. (2022). Institutional Barriers and Facilitators of Sustainability for Indonesian Batik SMEs: A Policy Agenda. *Sustainability*, 14(14), 8772. <https://doi.org/10.3390/su14148772>
- Indrawati H, Caska C, Hermita N, Sumarno S, Syahza A (2025), "Green innovation adoption of SMEs in Indonesia: what factors determine it?". *International Journal of Innovation Science*, Vol. 17 No. 1 pp. 19–37, doi: <https://doi.org/10.1108/IJIS-02-2023-0047>
- Lestari, E. R., & Sunyoto, N. M. S. (2023). Fostering green innovation in achieving sustainable performance. *Natural Resources Forum*, 47(3), 413–434. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12293>
- Lobo, D., Rodriguez, A. C., Casa Nova, S. P. de C., & Ardichvili, A. A. (2022). Five practices for building local capacity in sustainability-driven entrepreneurship for place-based transformations. *Sustainability*, 14(5), 3027. <https://doi.org/10.3390/su14053027>
- Millán, G., Rqiq, Y., Llano, E., Ballestín, V., Neusel, L., Durand, A., Tröger, J., Lamberti, F., De Lorenzis, F., & Repetto, M. (2022). Energy efficiency engagement training in SMEs: A case study in the automotive sector. *Sustainability*, 14(17), 10504. <https://doi.org/10.3390/su141710504>
- Moursellas, A., De, D., Wurzer, T., Skouloudis, A., Reiner, G., Chaudhuri, A., Manousidis, T., Malesios, C., Evangelinos, K., & Dey, P. K. (2023). Sustainability practices and performance in European small-and-medium enterprises: Insights from multiple case studies. *Circular Economy and Sustainability*, 3, 835–860. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00224-3>
- Pangarso, A., Sisilia, K., Setyorini, R., Peranginangin, Y., & Awirya, A. A. (2022). The long path to achieving green economy performance for micro small medium enterprise. *Journal of Innovation and Entrepreneurship*, 11, 16. <https://doi.org/10.1186/s13731-022-00209-4>
- Patel, J. D., Shah, R., & Trivedi, R. H. (2022). Effects of energy management practices on environmental performance of Indian small- and medium-sized enterprises. *Journal of Cleaner Production*, 333, 130170. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130170>
- Purwandani, J. A., & Michaud, G. (2021). What are the drivers and barriers for green business practice adoption for SMEs? *Environment Systems and Decisions*, 41(4), 577–593. <https://doi.org/10.1007/s10669-021-09821-3>
- Rodrigues, M., & Franco, M. (2023). Green innovation in small and medium-sized enterprises (SMEs): A qualitative approach. *Sustainability*, 15(5), 4510. <https://doi.org/10.3390/su15054510>
- Schröder, S., Wiek, A., Farny, S., & Luthardt, P. (2023). Toward holistic corporate sustainability—Developing employees' action competence for sustainability in small and medium-sized enterprises through training. *Business Strategy and the Environment*, 32(4), 1650–1669. <https://doi.org/10.1002/bse.3210>
- Scipioni, S., Russ, M., & Niccolini, F. (2021). From barriers to enablers: The role of organizational learning in transitioning SMEs into the circular economy. *Sustainability*, 13(3), 1021. <https://doi.org/10.3390/su13031021>

- Singh, S. K., Del Giudice, M., Chiappetta Jabbour, C. J., Latan, H., & Sohal, A. S. (2022). Stakeholder pressure, green innovation, and performance in small and medium-sized enterprises: The role of green dynamic capabilities. *Business Strategy and the Environment*, 31(1), 500–514. <https://doi.org/10.1002/bse.2906>
- Wasiq, M., Kamal, M., & Ali, N. (2023). Factors influencing green innovation adoption and its impact on the sustainability performance of small- and medium-sized enterprises. *Sustainability*, 15(3), 2447. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su15032447>