

## Kapabilitas Ekonomi Sirkular dalam Sektor UMKM Kota Surakarta Menuju *Smart-Sustainable City*

Muhammad Alfarizi

Program Studi Manajemen, BINUS Online, Universitas Bina Nusantara

Ngatindriatun Ngatindriatun

Program Studi Bisnis Digital Kampus Semarang, BINUS Business School-UP, Universitas Bina Nusantara

Korespondensi penulis: [muhammad.alfarizi@binus.ac.id](mailto:muhammad.alfarizi@binus.ac.id)

**Abstract:** *The increase in waste correlates with changes in consumption habits and population expansion. The Circular Economy, a primary focus in addressing climate change, promotes recycling and material integration in production. Industry 4.0 plays a crucial role with technologies like IoT, big data, and AI, enhancing raw material efficiency and waste reduction. SMEs in Surakarta have significant potential in transitioning towards a sustainable economy, leveraging their creativity to innovate in sustainable practices. This study aims to analyze the capabilities of SMEs in Surakarta in circular economy practices towards achieving a sustainable-smart city. Employing a quantitative approach, the study surveyed 215 research respondents using convenience sampling. Data analyzed through Partial Least Square-Structural Equation Modeling (PLS-SEM) highlights the pivotal role of Industry 4.0 readiness in adopting IIoT and big data analysis, driving circular economy practices. Managerial recommendations for SMEs include enhancing technological readiness and adopting the "reduce, reuse, recycle" approach. Government prioritization of training, digital infrastructure, and collaboration is crucial in supporting SMEs.*

**Keywords:** *Circular Economy, Industry 4.0 Readiness, Surakarta SMEs*

**Abstrak:** Peningkatan limbah berkorelasi dengan perubahan kebiasaan konsumsi dan perluasan populasi. Ekonomi Sirkular, fokus utama dalam mengatasi perubahan iklim, melalui daur ulang dan integrasi material dalam produksi. Industri 4.0 memainkan peran penting dengan teknologi seperti IoT, *big data*, dan AI, meningkatkan efisiensi penggunaan bahan baku dan mengurangi limbah. UMKM di Surakarta memiliki potensi besar dalam transisi menuju ekonomi berkelanjutan, memanfaatkan kreativitas mereka untuk berinovasi dalam praktik berkelanjutan. Studi ini bertujuan untuk menganalisis kapabilitas UMKM di Kota Surakarta dalam praktik ekonomi sirkular untuk upaya pencapaian *sustainable-smart city*. Studi ini memilih pendekatan kuantitatif dengan survei pada 215 responden penelitian yang ditarik dengan convenience sampling. Data yang terkumpul dianalisis dengan *Partial Least Square-Structural Equation Modelling* (PLS-SEM). Hasil analisis menunjukkan peran penting kesiapan Industri 4.0 dalam mengadopsi IIoT dan analisis *big data*, mendorong praktik ekonomi sirkular. Rekomendasi manajerial untuk UMKM termasuk meningkatkan kesiapan teknologi dan mengadopsi pendekatan "reduce, reuse, recycle". Pemerintah perlu memprioritaskan pelatihan, infrastruktur digital, dan kolaborasi untuk mendukung UMKM.

**Kata kunci:** Ekonomi Sirkular, Kesiapan Industri 4.0, UMKM Surakarta

### LATAR BELAKANG

Isu peningkatan limbah di tengah masyarakat berkorelasi dengan pergeseran kebiasaan konsumsi dan pembuangan, perluasan populasi, dan berbagai faktor yang saling berhubungan. Upaya mengatasi perubahan iklim merupakan salah satu tantangan global terpenting saat ini. Metode untuk memanfaatkan kembali limbah padat perkotaan melibatkan daur ulang dan pengintegrasian kembali material ke dalam proses produksi industri (Hardika, Susiani, Ilyas, Yusuf, & Novianto, 2021). Pendekatan-pendekatan ini hanya mewakili sedikit dari banyak praktik dalam Ekonomi Sirkular yang bertujuan mengubah material yang dibuang melalui

*Received April 30, 2024; Accepted Mei 24, 2024; Published Juni 30, 2024*

\* Muhammad Alfarizi, [muhammad.alfarizi@binus.ac.id](mailto:muhammad.alfarizi@binus.ac.id)

model linier menjadi sumber daya berharga melalui regenerasi, restorasi, dan renovasi (D'Amato et al., 2017). Transisi model bisnis berbasis sirkular tidak hanya memperpanjang siklus hidup produk tetapi juga membuka prospek bisnis baru (Latif, Cahyandito, & Utama, 2023). Konsep ekonomi sirkuler semakin menonjol dalam diskusi politik dan bisnis, menandakan pergeseran menuju praktik industri yang lebih berkelanjutan. Selama dua dekade terakhir, hal ini telah muncul sebagai inisiatif utama untuk meningkatkan kinerja rantai pasokan (Subekti, 2023).

Peran kemajuan Industri 4.0 sangat penting dalam pencapaian ekonomi sirkular. Industri 4.0, dengan teknologi seperti *Internet of Things* (IoT), *big data analytics*, dan kecerdasan buatan (AI), memungkinkan integrasi sistem yang lebih efisien dan terhubung secara digital (A. Zhang et al., 2023). Hal ini memungkinkan pemantauan dan pengelolaan yang lebih baik terhadap proses produksi, penggunaan sumber daya, dan limbah. Dengan adopsi teknologi ini, perusahaan dapat meningkatkan efisiensi penggunaan bahan baku, mengurangi limbah, dan mendukung praktik daur ulang dan pemulihan. Industri 4.0 juga mendorong model bisnis berbasis layanan, di mana produk lebih dimanfaatkan dan dipertahankan daripada dibeli dan dibuang. Dengan demikian, melalui integrasi Industri 4.0, ekonomi sirkular dapat dicapai dengan lebih baik, menciptakan kesempatan untuk pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan sambil mengurangi dampak lingkungan negatif.

Usaha mikro, kecil dan menengah (UMKM) dapat berpotensi sebagai pemain penting dalam transisi menuju Ekonomi Sirkular. UMKM berperan pada pertumbuhan 90% bisnis global, menyediakan 50% lapangan kerja, dan berkontribusi 40% terhadap PDB di seluruh dunia (Bryan Jean, Kim, Sinkovics, & Cavusgil, 2024). UMKM menghadapi tantangan yang lebih besar dibandingkan organisasi besar dalam hal mengadopsi inovasi ekonomi sirkular karena keterbatasan sumber daya, pengetahuan, dan waktu (Avelar, Borges-Tiago, Almeida, & Tiago, 2024). Meskipun demikian, UMKM sering kali menunjukkan tingkat kreativitas dan fleksibilitas yang lebih tinggi dalam pengambilan keputusan, sehingga hal ini dapat memberikan keuntungan (Suchek, Ferreira, & Fernandes, 2023a). Surakarta, sering disebut Solo, adalah pusat kreativitas yang berkembang pesat di Jawa Tengah, Indonesia. Dikenal dengan warisan budayanya yang kaya, termasuk kesenian tradisional Jawa seperti batik dan musik gamelan, Solo menganut upaya kreatif modern (Noriska & Tineka, 2023; Wibowo, Agra, & Husain, 2021). UMKM memainkan peran penting dalam lanskap yang dinamis ini, mendorong inovasi dan pertumbuhan ekonomi. Mulai dari kerajinan tangan hingga kuliner, UMKM memenuhi kota ini dengan beragam penawaran, sehingga berkontribusi pada identitas dan daya tarik kota yang unik. Perusahaan-perusahaan ini tidak hanya melestarikan ketrampilan tradisional tetapi juga mengembangkan ekspresi seni baru, yang menarik perhatian

lokal dan internasional. Ekosistem Solo yang mendukung dengan semangat kewirausahaan dan kolaborasi masyarakat memberikan lahan subur bagi UMKM untuk berkembang (Sata, Samrotun, & Siddi, 2022). Hasilnya, Surakarta terus berkembang menjadi kawasan kreatif yang dinamis dan inspiratif, tempat tradisi bertemu inovasi dalam harmoni yang sempurna. Saat ini Kota Surakarta memiliki total 13.203 UMKM dengan mayoritas bergerak pada sektor makanan minuman, perdagangan, jasa, kerajinan tangan dan industri.

UMKM Kota Surakarta memiliki peluang besar untuk terlibat dalam Ekonomi Sirkular. Dengan semangat kewirausahaan yang dinamis dan lanskap UMKM yang beragam, terdapat potensi bagi bisnis-bisnis ini untuk memainkan peran penting dalam transisi menuju praktik berkelanjutan. UMKM dapat memanfaatkan ketangkasan dan kreativitas mereka untuk berinovasi dan mengadopsi model bisnis sirkular, sehingga berkontribusi terhadap efisiensi sumber daya dan pengurangan limbah. Mengkaji kapabilitas ekonomi sirkular pada sektor UMKM di Kota Surakarta sangat penting untuk melakukan transformasi menuju *Smart-Sustainable City*. Karena Surakarta bertujuan untuk mencapai pembangunan perkotaan yang selaras dengan tujuan keberlanjutan, memahami potensi ekonomi sirkular dari UMKM sangatlah penting. Dengan menilai kemampuan ekonomi sirkular, Surakarta dapat mengidentifikasi peluang untuk meningkatkan efisiensi sumber daya, meminimalkan timbulan sampah, dan mendorong inovasi dalam sektor UMKM. Penerapan praktik ekonomi sirkular tidak hanya dapat meningkatkan kelestarian lingkungan bisnis namun juga berkontribusi terhadap ketahanan ekonomi dan kesejahteraan sosial. Selain itu, pengintegrasian prinsip-prinsip ekonomi sirkular sejalan dengan visi yang lebih luas untuk menjadikan Surakarta sebagai Kota Cerdas dan Berkelanjutan, mendorong inovasi teknologi, dan meningkatkan kualitas hidup penduduknya.

Studi ini bertujuan untuk menganalisis kapabilitas UMKM di Kota Surakarta dalam praktik ekonomi sirkular untuk upaya pencapaian *Sustainable-Smart City*. Secara teoritis, studi ini akan mengintegrasikan konsep ekonomi dalam kerangka analisis kapabilitas UMKM. Melalui pendekatan ini, akan diidentifikasi potensi UMKM dalam mengadopsi praktik ekonomi sirkular dan kontribusi mereka terhadap pembangunan kota yang berkelanjutan dan pintar. Secara praktis, penelitian ini akan memberikan wawasan berharga bagi pemerintah dan pemangku kepentingan lainnya dalam merancang kebijakan dan program yang mendukung transformasi ke arah kota yang berkelanjutan dan pintar.

## **KAJIAN TEORITIS**

Salah satu syarat utama dalam lingkungan bisnis saat ini adalah fokus pada konsep keberlanjutan bisnis. Keberlanjutan bisnis telah menjadi persyaratan strategis, tidak hanya

untuk mencapai tujuan dan nilai-nilai pemangku kepentingan bersama tetapi juga untuk mencapai keuntungan dan pertumbuhan ekonomi. Hal ini telah diakui dalam beberapa penelitian dan penelitian terkini mengenai pentingnya keberlanjutan dalam mencapai keunggulan kompetitif perusahaan dalam berbagai aktivitas mereka (Biggeri, Colucci, Doni, & Valori, 2022; Dicuonzo, Galeone, Ranaldo, & Turco, 2020; Martínez Hernández, Sánchez-Medina, & Díaz-Pichardo, 2021). Salah satu konsep modern terpenting terkait keberlanjutan operasi bisnis adalah ekonomi sirkular. Bisnis saat ini hanya fokus pada keuntungan dan pertumbuhan adalah ekonomi linier untuk mencapai pertumbuhan yang lebih tinggi dari waktu ke waktu. Menurut pandangan ekonomi sirkular, kemampuan perusahaan untuk mencapai keuntungan ekonomi dan minat dalam mengurangi limbah dengan menggunakan siklus tertutup akan meningkatkan efisiensi operasi dan mengurangi konsumsi, mengurangi polusi dan meningkatkan kualitas kerja (Barros, Salvador, do Prado, de Francisco, & Piekarski, 2021).

Meskipun para ahli tidak bersepakat terkait satu definisi tunggal ekonomi sirkular, namun terdapat kesamaan bahwa praktik ini memainkan peran penting dalam meningkatkan kinerja ekonomi, lingkungan, dan sosial serta mendorong kinerja berkelanjutan. Agrawal dkk (2022) menggambarkan praktik CE sebagai sekelompok praktik yang berfokus pada siklus regeneratif dan dengan demikian memfasilitasi tugas penggunaan kembali produk dan bahan yang digunakan dalam produksi secara efisien dan efektif, yang mengarah pada peningkatan kinerja ekonomi dan lingkungan (Agrawal, Wankhede, Kumar, Upadhyay, & Garza-Reyes, 2022). Akibatnya, perusahaan manufaktur dapat memperoleh manfaat dari prinsip dan praktik ekonomi sirkular dengan mengubah operasi dan aktivitas mereka dari metode tradisional berdasarkan ekonomi linier menjadi ekonomi sirkular berdasarkan pengurangan konsumsi sumber daya alam, keuangan, dan teknis.

Meskipun ekonomi sirkular penting dalam meningkatkan kinerja lingkungan dan keberlanjutan, penerapan praktik-praktik ini memerlukan serangkaian faktor dan persyaratan yang membantu penerapan prinsip-prinsip ini. Teknologi berperan besar dalam meningkatkan tingkat ekonomi sirkular (Khan, Piprani, & Yu, 2022). Penggunaan faktor pendukung berbasis teknologi di perusahaan manufaktur dapat meningkatkan tingkat inovasi lingkungan, mengarah pada peningkatan tingkat praktik ekonomi sirkular. Infrastruktur teknologi memberikan kemampuan untuk memfasilitasi kegiatan ekonomi sirkular. Salah satu pendorong utama penerapan ekonomi sirkular adalah kepemilikan kemampuan teknologi yang dinamis dan inovatif yang berkontribusi mempercepat laju praktik ekonomi sirkular dan budaya organisasi yang mendukung industri ini dengan faktor pendukung organisasi (Akberdina, Strielkowski, Linder, Kashirin, & Shmeleva, 2023). Revolusi Industri Keempat dan penerapannya dianggap

sebagai salah satu penerapan terpenting yang mendorong penggunaan manajemen berkelanjutan.

Keberhasilan Industri 4.0 bergantung pada berbagai faktor seperti faktor teknologi, faktor kelembagaan, dan pasar. Kesiapan UMKM untuk memiliki dan memanfaatkan Industri 4.0 akan meningkatkan akses terhadap keberlanjutan yang cerdas, meningkatkan tingkat kinerja ekonomi, dengan mempertimbangkan kinerja lingkungan dan sosial dan dengan demikian mencapai keberlanjutan bisnis (Masood & Sonntag, 2020). Kesiapan Industri 4.0 dapat digambarkan sebagai “sejauh mana organisasi dapat memanfaatkan teknologi Industri 4.0” (Charbonneau-Genest & Gamache, 2023). Penilaian kesiapan Industri 4.0 bagi perusahaan adalah alat yang sangat penting. Proses penilaian membantu mengidentifikasi kesenjangan sebelum proses implementasi, yang mengarah pada penggunaan dan eksploitasi kemampuan Industri 4.0 secara optimal dalam perusahaan-perusahaan tersebut (Hajoary, MA, & Garza-Reyes, 2023). Mengidentifikasi kemampuan perusahaan untuk menerapkan aplikasi Industri 4.0 akan meningkatkan kapasitas mereka untuk mencapai semua tujuan organisasi yang terkait dengan transformasi digital.

Penerapan Industri 4.0 telah memberikan peluang besar untuk mendorong pertumbuhan bisnis yang berkelanjutan dengan meningkatkan pertukaran informasi dan otomatisasi serta menyediakan aplikasi yang berkontribusi dalam memantau aliran material di seluruh rantai pasokan, yang meningkatkan kontrol terintegrasi dan cerdas atas semua aktivitas dan proses dalam rantai pasokan (Stanisławski & Szymonik, 2021). Dalam konteks ekonomi sirkular, penerapan Industri 4.0 dapat berkontribusi secara efektif untuk meningkatkan produktivitas dan mengembangkan strategi perusahaan yang bertujuan untuk menggunakan kembali dan mendaur ulang produk bekas dan mengarah pada peningkatan penggunaan sumber daya secara optimal (Tiwari & Goel, 2023).

Aplikasi utama Industri 4.0 mencakup Kecerdasan Buatan, Analisis *Big Data*, Komputasi Awan, *Internet of Things*, *Blockchain*, dan Manufaktur Aditif (Bag & Pretorius, 2022). Teknologi-teknologi baru ini mengubah pandangan bisnis dan kapasitas mereka untuk memperbaiki lingkungan produksi dan meningkatkan efisiensi rantai pasokan. Teknologi *Industrial Internet of Things* (IIoT) dan *Big Data Analytics* adalah salah satu teknologi yang paling banyak digunakan dalam konteks manajemen rantai pasokan (Attaran, 2017; Patil, Dwivedi, & Abdul Moktadir, 2023). Teknologi ini memberikan kapasitas untuk mengubah sebagian tingkat rantai pasokan, lingkungan produksi, dan tingkat organisasi perusahaan secara keseluruhan (Mateus, Oliveira, & Neves, 2023; Wang, Yao, Wu, & Chen, 2017). Dengan demikian, ketergantungan perusahaan manufaktur terhadap penerapan teknologi Industri 4.0 akan menyebabkan munculnya inovasi yang meningkatkan kinerja berkelanjutan dan

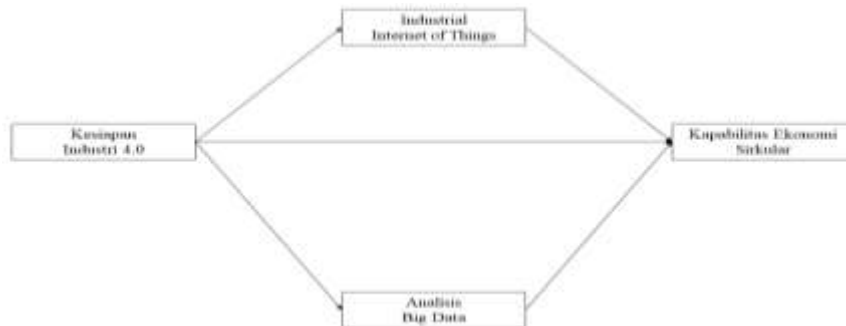
memperbaiki lingkungan kerja, yang mengarah pada maksimalisasi nilai ekonomi bisnis dan aspek keberlanjutan.

IoT kini telah mengubah wajah sektor UMKM dengan menyediakan solusi efisien dan terhubung untuk meningkatkan produktivitas dan efektivitas (Sestino, Prete, Piper, & Guido, 2020). Misalnya, di sektor pertanian, sensor IoT dipasang di ladang untuk memantau kelembaban tanah, suhu, dan tingkat kelembaban udara secara real-time (Macayana et al., 2023). Data ini membantu petani dalam pengambilan keputusan yang lebih cerdas terkait irigasi, pemupukan, dan pengendalian hama. Di sektor ritel, UMKM dapat menggunakan IoT untuk memantau inventaris secara otomatis, mengoptimalkan rantai pasokan, dan memberikan pengalaman belanja yang lebih personal kepada pelanggan melalui teknologi seperti beacon (Mohare, Shukla, Tolani, & Patil, 2023). Dalam sektor manufaktur kecil, IoT digunakan untuk memantau kinerja mesin, mendiagnosa masalah secara dini, dan mengurangi downtime produksi (Oghazi, Mostaghel, & Hultman, 2024).

Analisis *big data* adalah salah satu aplikasi Industri 4.0 yang paling umum digunakan dalam berbagai sektor (Cheng et al., 2021). Keberadaan teknologi *big data* memberikan kemampuan untuk menangkap, mengumpulkan, dan memproses berbagai macam data dengan kecepatan yang belum pernah terjadi sebelumnya (Zheng, 2021). *Big data* telah menjadi kunci penting untuk meningkatkan kinerja dan daya saing UMKM. *Big data* memungkinkan UMKM untuk mengumpulkan, menyimpan, dan menganalisis data dalam skala besar untuk mendapatkan wawasan yang bernilai (Liu, Soroka, Han, Jian, & Tang, 2020). Data-data ini meliputi informasi tentang pelanggan, tren pasar, persaingan, dan proses internal bisnis. Dengan memanfaatkan *big data*, UMKM dapat membuat keputusan yang lebih cerdas dan tepat waktu, seperti personalisasi produk atau layanan, strategi pemasaran yang lebih efektif, dan pengelolaan rantai pasok yang lebih efisien. Selain itu, *big data* juga membuka peluang bagi UMKM untuk mengembangkan model bisnis baru, berkolaborasi dengan pihak lain, dan meningkatkan inovasi. Montgomery dkk (2019) dalam studi perusahaan kecil makanan organik menemukan keterlibatan *big data* untuk meningkatkan strategi pemasaran (Montgomery, Chester, Nixon, Levy, & Dorfman, 2019). Mereka mengumpulkan data dari penjualan online, umpan balik pelanggan, dan tren pasar. Dengan menganalisis data ini, mereka dapat mengidentifikasi preferensi pelanggan, seperti jenis makanan organik yang paling diminati dan daerah mana yang memiliki permintaan tertinggi.

Merujuk pada studi literatur terkini, dapat dicatat bahwa perusahaan manufaktur yang beroperasi di negara berkembang sudah mulai mengadopsi teknologi Industri 4.0 seperti IIoT dan analisis *big data* (Basl & Benesova, 2020; Duarte, Cabrita, & Cruz-Machado, 2020; Haseeb, Hussain, Ślusarczyk, & Jermsttiparsert, 2019). Manajemen perusahaan-perusahaan

ini menjadi lebih siap dibandingkan sebelumnya untuk menggunakan teknologi Industri 4.0 dalam aktivitas manufaktur mereka. Akan tetapi, pemahaman tentang hubungan sebab akibat antara kesiapan Industri 4.0, teknologi Industri 4.0, dan ekonomi sirkular pada sektor UMKM masih dalam tahap awal. Maka dengan kesenjangan ini, dirumuskan lima hipotesis penelitian dengan model penelitian pada Gambar 1.



**Gambar 1. Model Penelitian**

H1. Kesiapan industri 4.0 berpengaruh signifikan positif pada *Industrial Internet of Things*

H2. Kesiapan industri 4.0 berpengaruh signifikan positif pada Analisis *Big Data*

H3. *Industrial Internet of Things* berpengaruh signifikan positif pada kapabilitas ekonomi sirkular UMKM Kota Surakarta

H4. Analisis *Big Data* berpengaruh signifikan positif pada kapabilitas ekonomi sirkular UMKM Kota Surakarta

H5. Kesiapan industri 4.0 berpengaruh signifikan positif pada kapabilitas ekonomi sirkular UMKM Kota Surakarta

## METODE PENELITIAN

Studi ini memilih pendekatan kuantitatif untuk menguji hipotesis dan menjawab pertanyaan penelitian sebelumnya. Data cross-sectional dikumpulkan menggunakan kuesioner online dan didistribusikan kepada pemilik UMKM Usia Millennial di Kota Surakarta. Kuesioner bertujuan untuk mengumpulkan data langsung mengenai pendapat sampel mengenai kesiapan UMKM dalam menerapkan Industri 4.0 dan dampak kesiapan tersebut terhadap penerapan Industri 4.0 dan ekonomi sirkular secara nyata. Kuesioner dirancang berdasarkan ukuran dan item yang ditemukan dalam literatur yang relevan dan penelitian sebelumnya, meningkatkan validitas dan reliabilitas item yang digunakan dalam mengukur konstruk. Item yang digunakan sebelumnya memberikan hasil yang lebih dapat diandalkan jika digunakan dalam konteks yang beragam. Sebelum mengandalkan penyebaran kuesioner, keakuratan kuesioner dan kemampuannya mengukur konstruk dinilai sesuai dengan konteks UMKM Kota Surakarta dengan menyajikan instrumen kepada 3 Pakar UMKM untuk mencapai validitas isi.

Teknik non-probability convenience sampling merupakan teknik yang digunakan dalam pengumpulan data. Kuisisioner dikumpulkan secara online melalui media Google Form dan disebarluaskan secara hybrid baik melalui media sosial maupun kunjungan lapangan. Proses pengambilan data dilakukan selama 2 Bulan mulai dari Februari 2024-Maret 2024. Dalam mengukur variabel, studi ini menggunakan skala likert lima poin dimana 1 menyatakan sangat tidak setuju hingga 5 menyatakan sangat setuju dengan pernyataan yang diajukan.

Studi ini memilih teknik analisis *partial least squares-structural equation modeling* (PLS-SEM) melalui perangkat lunak Smart PLS. Pendekatan ini adalah salah satu pendekatan yang paling banyak digunakan dalam studi bisnis. PLS-SEM umumnya digunakan untuk mengatasi masalah yang tidak dapat diatasi melalui pemodelan persamaan struktural berbasis kovarians (Sarstedt, Radomir, Moisesescu, & Ringle, 2022). Ukuran sampel yang kecil, distribusi data yang tidak normal, dan kompleksitas model penelitian merupakan salah satu alasan terpenting penggunaan PLS-SEM (Memon et al., 2021). Teknik analisis ini juga mampu memperkirakan model yang kompleks dibandingkan dengan model CB-SEM.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakteristik Responden

Studi ini berhasil mendapatkan 215 responden penelitian dengan didominasi oleh wanita (65%) dibandingkan dengan laki-laki (35%). Mayoritas responden berusia 20-30 tahun (86%), dengan mayoritas berasal dari Kecamatan Jebres (27%) dan Laweyan (28%). Mayoritas responden memiliki pendidikan terakhir Sekolah Menengah Atas (44%) dan sebagian besar memperoleh keuntungan bisnis bulanan antara Rp. 7.000.000 hingga Rp. 10.000.000 (39%). Sebagian besar usaha mereka telah berjalan selama 5-7 tahun (47%), dan mayoritas bisnis yang dijalankan adalah dalam kategori Fashion (36%), diikuti oleh Kuliner (40%).

**Tabel 1.** Karakteristik Responden

	<i>Total</i>	<i>Persentase</i>
<b>Jenis kelamin</b>		
Laki-laki	76	35%
Wanita	139	65%
<b>Umur</b>		
20-30 Tahun	184	86%
31-40 Tahun	31	14%
<b>Demografi Kecamatan</b>		
Banjarsari	28	13%
Jebres	57	27%
Laweyan	60	28%
Pasar Kliwon	33	15%
Serengan	37	17%
<b>Pendidikan Terbaru</b>		
Sekolah Menengah Pertama	40	18%
Sekolah Menengah Atas	94	44%
Sarjana/Diploma	62	29%
Gelar Master / PhD	19	9%
<b>Keuntungan Bisnis Bulanan</b>		
Rp. 3.000.000 – Rp. 6.000.000	75	35%
Rp. 7.000.000 – Rp. 10.000.000	83	39%
>Rp. 10.000.000	57	26%

<i>Usia Bisnis</i>		
1-5 Tahun	58	27%
5-7 Tahun	101	47%
8-10 Tahun	39	18%
≥ 10 Tahun	17	8%
<i>Kategori Bisnis</i>		
Kuliner	85	40%
Agribisnis	22	10%
Peralatan Rumah Tangga	31	14%
Fashion	77	36%

## Uji Validitas dan Reliabilitas

Literatur merekomendasikan sebelum mengkaji hubungan dan menguji hipotesis melalui tahap model struktural, perlu mulai dengan mengevaluasi validitas dan reliabilitas dalam PLS-SEM untuk memastikan keandalan dan kevalidan model yang dibangun (Becker, Cheah, Gholamzade, Ringle, & Sarstedt, 2023). Uji validitas dilakukan dengan mengukur *loading factor* dan *Average Variance Extracted (AVE)*. *Loading factor* mengindikasikan seberapa baik setiap indikator merepresentasikan konstraknya, sementara AVE mengukur seberapa baik konstruk memperoleh varian dari indikatornya sendiri dibandingkan dengan keseluruhan varian. Nilai *loading factor* yang tinggi (0.7) dan AVE yang signifikan (0.5) menunjukkan validitas konstruk yang baik (Sarstedt et al., 2022). Sementara itu, reliabilitas diukur dengan *Composite Reliability (CR)* atau *Cronbach Alpha (CA)*, yang mengukur sejauh mana indikator dalam satu konstruk konsisten dalam mengukurnya. Nilai CR dan CA yang tinggi (0.7) menunjukkan reliabilitas konstruk yang baik (Memon et al., 2021).

Hasil pengujian validitas dan reliabilitas pada tabel 2 menunjukkan semua nilai yang diperlukan telah terpenuhi sesuai dengan kriteria sebelumnya, yang menegaskan reliabilitas dan validitas konvergen data yang digunakan dalam pengujian model. Dengan demikian, proses dapat dilanjutkan pada uji hipotesis penelitian.

**Tabel 2.** Uji Validitas-Reliabilitas

Variabel	Outer Loading	AVE	CA	CR
<b><i>Kesiapan Industri 4.0</i></b>				
Adaptasi terhadap tekanan lingkungan telah mempengaruhi cara bisnis kami mengelola teknologi digital yang baru	0.842	0.609	0.841	0.883
Kami, sebagai UMKM, menunjukkan kesiapan dalam mengambil risiko dan memanfaatkan aplikasi Industri 4.0.	0.876			
Kami sebagai UMKM telah meningkatkan pemahaman tentang penerapan Industri 4.0 dan berbagi pengetahuan ini di seluruh organisasi kami	0.790			
Sebagai pemilik, fokus saya adalah mendukung integrasi teknologi digital modern yang berkaitan dengan Industri 4.0	0.878			
UMKM kami telah melengkapi karyawan dengan keterampilan baru yang diperlukan dalam menghadapi teknologi digital modern Industri 4.0	0.767			
<b><i>Industrial Internet of Things</i></b>				
UMKM Kami menggunakan IoT untuk memberikan solusi nyata	0.740	0.432	0.542	0.746
UMKM kami sangat bergantung pada IoT dalam pelacakan objek produk	0.744			
UMKM kami memanfaatkan IoT dalam memantau lingkungan produksi dan operasional	0.717			
UMKM kami menggunakan IoT sebagai bagian promosi praktik bisnis inovatif	0.779			
<b><i>Analisis Big Data</i></b>				
UMKM Kami mengandalkan analisis Big Data sebagai dukungan dalam pengambilan Keputusan	0.855	0.743	0.913	0.935
UMKM Kami mengintegrasikan data dari berbagai sumber internal dan eksternal dalam database untuk mempermudah akses	0.831			

UMKM kami mengandalkan metode analisis komputasi dalam menganalisis data bisnis	0.903			
UMKM kami memberdayakan karyawan dalam menggunakan alat analisis Big Data dalam sistem transaksi bisnis	0.888			
Saya memahami pentingnya Big Data dan analisisnya dalam meningkatkan nilai bisnis	0.830			
<b>Kapabilitas Ekonomi Sirkular</b>				
UMKM kami memiliki kapabilitas rancang produk yang dapat digunakan Kembali, didaur ulang, diefisiensikan dan dipulihkan	0.773	0.570	0.734	0.836
UMKM kami merancang produk yang menghemat energi dan mengurangi konsumsi	0.833			
UMKM kami tertarik mengembangkan proses dalam mengurangi limbah rantai pasokan	0.854			
UMKM kami menggunakan strategi lingkungan yang fokus pada penggunaan bahan mentah paling mudah didaur ulang dan terdegradasi	0.807			
UMKM kami berinvestasi dalam membangun bisnis cerdas dan berkelanjutan	0.776			

### Uji Hipotesis

Studi ini menyajikan serangkaian tujuan, yang fokus utamanya adalah memverifikasi dampak kesiapan Industri 4.0 pada IIoT, analisis big data, dan ekonomi sirkular pada UMKM Kota Surakarta. Untuk mencapai tujuannya, lima hipotesis dikembangkan sesuai kajian studi terdahulu. Proses pengujian hipotesis dinilai menggunakan prosedur bootstrapping sampel ulang 5.000 sampel (Streukens & Leroi-Werelds, 2016). Koefisien jalur atau Path Coefficient, t-test dan p-value dilaporkan. Hipotesis dinyatakan diterima jika path coefficient bermuatan positif, nilai t-test >1.96 dan p-value <0.05 (Kock, 2018).

Pengujian hipotesis telah dilakukan untuk menguji hubungan antara kesiapan Industri 4.0 dengan Industrial Internet of Things (IIoT), analisis Big Data, dan kapabilitas ekonomi sirkular (Tabel 3). Hasilnya menunjukkan bahwa kesiapan Industri 4.0 secara signifikan berkontribusi terhadap IIoT ( $p = 0.021$ ) dan analisis Big Data ( $p = 0.034$ ), serta terhadap kapabilitas ekonomi sirkular ( $p = 0.015$ ). Selain itu, IIoT juga berperan secara signifikan dalam meningkatkan kapabilitas ekonomi sirkular ( $p < 0.001$ ), demikian pula dengan analisis Big Data ( $p < 0.001$ ). Hasil ini menegaskan pentingnya kesiapan Industri 4.0 dalam menghadapi transformasi ke IIoT dan analisis Big Data, serta dampak positif IIoT dan analisis Big Data terhadap perkembangan kapabilitas ekonomi sirkular.

**Tabel 3.** Uji Hipotesis

Hipotesis	Path Coefficient	t-test	P-Value	Keputusan
Kesiapan Industri 4.0 → Industrial Internet of Things	0.267	2.317	0.021	Diterima
Kesiapan Industri 4.0 → Analisis Big Data	0.156	2.123	0.034	Diterima
Industrial Internet of Things → Kapabilitas Ekonomi Sirkular	0.363	5.011	0.000	Diterima
Analisis Big Data → Kapabilitas Ekonomi Sirkular	0.566	7.671	0.000	Diterima
Kesiapan Industri 4.0 → Kapabilitas Ekonomi Sirkular	0.120	2.435	0.015	Diterima

### Diskusi

Studi ini mengkaji hubungan antara kesiapan Industri 4.0, IIoT, analisis big data, dan ekonomi sirkular. Hasilnya menunjukkan bahwa kesiapan Industri 4.0 memiliki daya prediksi yang tinggi dalam menafsirkan Industrial Industrial IoT UMKM di Kota Surakarta. Hasil ini konsisten dengan kelompok literatur yang menekankan pentingnya kesiapan Industri 4.0 sebelum mulai menerapkan teknologi maju (Masood & Sonntag, 2020; Suchek, Ferreira, &

Fernandes, 2023b; C. Zhang & Chen, 2020). Dengan terbentuknya ekosistem Industri 4.0, UMKM memiliki akses lebih mudah terhadap teknologi dan inovasi yang diperlukan untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas. Implementasi teknologi IoT memungkinkan UMKM untuk mengoptimalkan proses produksi, pengelolaan inventaris, dan manajemen rantai pasok secara lebih efektif. Kesiapan Industri 4.0 juga membuka peluang baru bagi UMKM Surakarta dalam hal integrasi dengan jaringan nilai global. Dengan menggunakan teknologi canggih, UMKM dapat meningkatkan kualitas produk mereka dan memperluas jangkauan pasar, baik secara lokal maupun internasional.

Telah dicatat bahwa kesiapan Industri 4.0 memainkan peran positif dan signifikan secara statistik dalam praktik nyata Industri 4.0 dengan menggunakan analisis big data. Javaid dkk (2021) dan Patil dkk (2021) menekankan pentingnya kesiapan Industri 4.0 dalam kapabilitas big data untuk operasional perusahaan manufaktur (Javaid, Haleem, Singh, & Suman, 2021; Patil et al., 2023). Hasil ini sehubungan dengan adaptasi terhadap era Industri 4.0. Industri 4.0, dengan fokus pada digitalisasi, otomatisasi, dan konektivitas, memberikan peluang besar bagi UMKM Kota Surakarta untuk meningkatkan kapabilitas analisis big data mereka. Dengan kesiapan terhadap Industri 4.0, UMKM di Kota Surakarta dapat mengadopsi teknologi canggih seperti IoT (Internet of Things), kecerdasan buatan (AI), dan komputasi awan. Hal ini memungkinkan mereka untuk mengumpulkan, menyimpan, dan menganalisis jumlah data yang besar dengan lebih efisien dan akurat. Analisis big data yang lebih baik memungkinkan UMKM untuk memahami tren pasar, perilaku pelanggan, dan kebutuhan konsumen secara lebih mendalam. Dengan demikian, kesiapan terhadap Industri 4.0 memberikan dampak positif yang signifikan terhadap kapabilitas analisis big data UMKM di Kota Surakarta. Ini tidak hanya meningkatkan daya saing UMKM dalam pasar global yang semakin terhubung, tetapi juga membuka peluang baru untuk inovasi, pertumbuhan, dan keberlanjutan bisnis mereka.

Hasil pengujian hipotesis menunjukkan Industrial Internet of Things mendorong secara positif praktik ekonomi sirkular UMKM di Kota Surakarta. Temuan ini sesuai dengan beberapa penelitian terkini dalam literatur (Fraga-Lamas, Lopes, & Fernández-Caramés, 2021; Ingemarsdotter, Jamsin, & Balkenende, 2020), yang menekankan pentingnya teknologi baru IIoT dalam memberikan kemampuan untuk menggunakan dan menerapkan praktik ekonomi sirkular. Industrial Internet of Things (IIoT) menghadirkan transformasi mendasar dalam industri, termasuk pada skala UMKM di Kota Surakarta. IIoT memungkinkan UMKM untuk mengoptimalkan proses produksi, manajemen inventaris, dan rantai pasok secara efisien. Dengan memanfaatkan sensor, perangkat terhubung, dan analitik data, UMKM dapat memantau dan mengontrol produksi mereka secara real-time, mengurangi limbah dan

konsumsi energi, serta meningkatkan produktivitas. IoT berperan kunci dalam mempercepat transisi UMKM menuju praktik bisnis yang lebih berkelanjutan. Melalui pemantauan yang lebih baik terhadap sumber daya dan limbah, UMKM dapat mengidentifikasi peluang untuk mendaur ulang bahan, mengurangi limbah produksi, dan memperpanjang umur pakai produk. Ini tidak hanya mengurangi dampak lingkungan negatif, tetapi juga mengurangi biaya produksi dan meningkatkan efisiensi. Penerapan IIoT juga membuka peluang baru bagi UMKM untuk terlibat dalam model bisnis berbasis layanan dan berbagi ekonomi, di mana produk bisa disewakan atau didaur ulang. Dengan demikian, IIoT bukan hanya menciptakan lingkungan produksi yang lebih efisien, tetapi juga mendorong terciptanya ekonomi yang lebih inklusif dan berkelanjutan di Kota Surakarta. Keseluruhan, IIoT memberikan fondasi yang kuat untuk UMKM dalam menjalani transisi menuju ekonomi sirkular, di mana pertumbuhan ekonomi dapat terjadi secara berkelanjutan tanpa mengorbankan sumber daya alam.

Hasil pengujian hipotesis menunjukkan analisis big data mendorong secara positif praktik ekonomi sirkular UMKM di Kota Surakarta. Temuan ini sesuai dengan beberapa penelitian terkini dalam literatur (Bag, Pretorius, Gupta, & Dwivedi, 2021; Chau et al., 2023; Patil et al., 2023), yang menekankan pentingnya teknologi big data dalam memberikan kemampuan untuk menggunakan dan menerapkan praktik ekonomi sirkular. Pemanfaatan big data memberikan kontribusi positif yang signifikan terhadap ekonomi sirkular. Big data memungkinkan UMKM untuk mengidentifikasi tren pasar, memahami kebutuhan konsumen, dan mengoptimalkan rantai pasokan secara efisien. UMKM dapat mengurangi pemborosan dalam produksi dan distribusi, meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, dan memperluas jangkauan pasar mereka. Selain itu, big data juga memfasilitasi kolaborasi antara UMKM dan pemangku kepentingan lainnya dalam ekosistem ekonomi sirkular, seperti pemerintah, lembaga keuangan, dan masyarakat lokal. Hal ini memperkuat kerjasama dalam mempromosikan penggunaan bahan daur ulang, meminimalkan limbah, dan menciptakan lingkungan bisnis yang berkelanjutan.

Hasil pengujian hipotesis mengonfirmasi pengaruh kesiapan industri 4.0 terhadap praktik ekonomi sirkular UMKM di Kota Surakarta. UMKM yang siap mengadopsi teknologi industri 4.0 dapat dengan lebih baik menerapkan konsep "reduce, reuse, recycle". Mereka dapat memantau dan mengelola inventaris secara real-time, mengoptimalkan produksi untuk mengurangi limbah, dan mendaur ulang produk atau material yang sudah tidak terpakai menjadi barang baru atau bahan baku. Dengan demikian, mereka tidak hanya mengurangi dampak lingkungan, tetapi juga meningkatkan efisiensi operasional dan daya saing. Selain itu, melalui konektivitas yang diperluas oleh industri 4.0, UMKM dapat terhubung dengan pasar yang lebih luas dan lebih beragam, termasuk pelanggan yang peduli lingkungan. Ini membuka

peluang baru untuk pemasaran produk yang berkelanjutan dan ramah lingkungan, yang dapat meningkatkan daya tarik dan nilai tambah produk UMKM. Secara keseluruhan, kesiapan industri 4.0 memberikan dorongan besar bagi UMKM di Kota Surakarta untuk meningkatkan kapabilitas ekonomi sirkular mereka, dengan mengoptimalkan penggunaan sumber daya, mengurangi limbah, dan mengembangkan pasar untuk produk ramah lingkungan.

## **KESIMPULAN DAN SARAN**

Studi ini menyelidiki korelasi antara kesiapan Industri 4.0, IIoT (Industrial Internet of Things), analisis big data, dan ekonomi sirkular, khususnya pada UMKM di Kota Surakarta. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kesiapan Industri 4.0 memiliki peran yang signifikan dalam memfasilitasi adopsi IIoT dan analisis big data, yang pada gilirannya mendorong praktik ekonomi sirkular. Dengan adopsi teknologi canggih seperti IoT dan AI, UMKM dapat meningkatkan efisiensi produksi, manajemen inventaris, dan rantai pasok, serta memperluas jangkauan pasar mereka. Temuan ini juga menegaskan bahwa kesiapan Industri 4.0 membuka peluang bagi UMKM untuk terlibat dalam model bisnis berkelanjutan dan berbasis layanan.

Rekomendasi manajerial bagi UMKM di Kota Surakarta berdasarkan hasil penelitian adalah meningkatkan kesiapan dalam mengadopsi teknologi Industri 4.0, IIoT, dan analisis big data. Pertama, UMKM perlu mengidentifikasi kebutuhan teknologi yang tepat dan mengalokasikan sumber daya untuk investasi dalam infrastruktur digital dan pelatihan karyawan. Kedua, penting bagi UMKM untuk mengembangkan strategi implementasi yang terintegrasi untuk memanfaatkan teknologi IoT dalam proses produksi, manajemen inventaris, dan rantai pasok secara efektif. Ketiga, UMKM harus memperkuat kemampuan analisis big data mereka dengan menggunakan teknologi terkini dan meningkatkan kolaborasi dengan pemangku kepentingan lain dalam ekosistem bisnis. Keempat, UMKM perlu mengadopsi pendekatan "reduce, reuse, recycle" dengan memanfaatkan kesiapan Industri 4.0 untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya, mengurangi limbah produksi, dan mendaur ulang produk atau material. Kelima, UMKM harus fokus pada pemasaran produk ramah lingkungan untuk menarik pelanggan yang peduli lingkungan. Dengan demikian, dengan meningkatkan kesiapan dalam teknologi Industri 4.0, IIoT, dan analisis big data, UMKM di Kota Surakarta dapat meningkatkan kapabilitas ekonomi sirkular mereka, memperluas jangkauan pasar, dan memperkuat daya saing mereka dalam pasar global yang semakin terhubung.

Rekomendasi manajerial bagi Pemerintah Kota Surakarta adalah memprioritaskan upaya dalam meningkatkan kesiapan Industri 4.0 dan implementasi IIoT serta analisis big data di kalangan UMKM. Langkah pertama adalah menyediakan pelatihan dan pendampingan untuk membantu UMKM dalam mengadopsi teknologi Industri 4.0, seperti IoT, kecerdasan

buatan, dan komputasi awan. Hal ini akan memungkinkan UMKM untuk meningkatkan efisiensi operasional dan daya saing mereka. Selain itu, pemerintah perlu mengembangkan infrastruktur digital yang memadai, termasuk konektivitas internet yang cepat dan terjangkau, serta menyediakan aksesibilitas terhadap platform analisis data bagi UMKM. Ini akan membantu UMKM dalam mengumpulkan, menyimpan, dan menganalisis data dengan lebih efisien. Pemerintah juga harus mendorong kolaborasi antara UMKM, pemangku kepentingan, dan lembaga riset untuk mengembangkan solusi inovatif dalam praktik ekonomi sirkular. Dukungan kebijakan dan insentif bagi UMKM yang mengadopsi praktik ramah lingkungan juga dapat memberikan dorongan tambahan.

Studi ini berusaha mencapai serangkaian tujuan yang direpresentasikan dalam memeriksa jalur yang dihipotesiskan di antara konstruksi yang digunakan dalam model penelitian. Studi ini memiliki serangkaian keterbatasan metodologis atau empiris, yang menyebabkan ketidakmampuan untuk menggeneralisasi hasil secara luas. Dengan demikian, keterbatasan tersebut dapat membuka cakrawala baru bagi penelitian-penelitian selanjutnya yang dapat mengatasi kekurangan tersebut. Pertama, salah satu kelemahan penelitian ini adalah keterbatasannya dalam mempelajari UMKM Kota Surakarta, sehingga menimbulkan pertanyaan dan keraguan mengenai sejauh mana hasil penelitian ini dapat digeneralisasikan. Oleh karena itu, sangatlah berguna untuk melakukan penelitian lebih lanjut dalam konteks negara. Kedua, data cross-sectional digunakan dalam memeriksa jalur yang dihipotesiskan. Meskipun data ini penting dan sering digunakan dalam studi bisnis, hasilnya tidak dapat diandalkan seiring berjalannya waktu. Oleh karena itu, ada gunanya menggunakan metode lain dalam pengumpulan data seperti data longitudinal. Meskipun jelas bahwa makalah ini telah mencapai kesimpulan kuantitatif yang kaya, penggunaan penelitian di masa depan dan metode yang lebih kualitatif seperti wawancara mungkin berguna dalam mencapai pemahaman yang lebih baik tentang hubungan tersebut. Terakhir, penelitian ini memerlukan studi dan analisis lebih lanjut yang mempertimbangkan faktor manusia, teknologi, dan organisasi yang secara langsung memengaruhi penerapan Industri 4.0 dan dampak faktor-faktor ini dalam mendorong praktik ekonomi sirkular.

## **DAFTAR REFERENSI**

- Agrawal, R., Wankhede, V. A., Kumar, A., Upadhyay, A., & Garza-Reyes, J. A. (2022). Nexus of circular economy and sustainable business performance in the era of digitalization. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 71(3), 748–774. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-12-2020-0676/FULL/PDF>
- Akberdina, V., Strielkowski, W., Linder, N., Kashirin, S., & Shmeleva, L. (2023). Information technology and digital sufficiency for building the sustainable circular economy. *Energies*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/en16031399>

- Attaran, M. (2017). The internet of things: Limitless opportunities for business and society. *Journal of Strategic Innovation and Sustainability*, 12(1), 10–29.
- Avelar, S., Borges-Tiago, T., Almeida, A., & Tiago, F. (2024). Confluence of sustainable entrepreneurship, innovation, and digitalization in SMEs. *Journal of Business Research*, 170. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2023.114346>
- Bag, S., & Pretorius, J. H. C. (2022). Relationships between industry 4.0, sustainable manufacturing and circular economy: Proposal of a research framework. *International Journal of Organizational Analysis*, 30(4), 864–898. <https://doi.org/10.1108/IJOA-04-2020-2120>
- Bag, S., Pretorius, J. H. C., Gupta, S., & Dwivedi, Y. K. (2021). Role of institutional pressures and resources in the adoption of big data analytics powered artificial intelligence, sustainable manufacturing practices and circular economy capabilities. *Technological Forecasting and Social Change*, 163. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120420>
- Barros, M. V., Salvador, R., do Prado, G. F., de Francisco, A. C., & Piekarski, C. M. (2021). Circular economy as a driver to sustainable businesses. *Cleaner Environmental Systems*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2020.100006>
- Basl, J., & Benesova, A. (2020). Green industry 4.0 - Analysis of green aspects penetration in business readiness models for industry 4.0. *IDIMT 2020: Digitalized Economy, Society and Information Management - 28th Interdisciplinary Information Management Talks*, 125–132. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85092045798&partnerID=40&md5=4272274686d9249cd50c1c1c43bc1cfb>
- Becker, J.-M., Cheah, J.-H., Gholamzade, R., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2023). PLS-SEM's most wanted guidance. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, 35(1), 321–346. <https://doi.org/10.1108/IJCHM-04-2022-0474>
- Biggeri, M., Colucci, D., Doni, N., & Valori, V. (2022). Sustainable entrepreneurship: Good deeds, business, social and environmental responsibility in a market experiment. *Sustainability (Switzerland)*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/su14063577>
- Bryan Jean, R.-J., Kim, D., Sinkovics, R. R., & Cavusgil, E. (2024). The effect of business model innovation on SMEs' international performance: The contingent roles of foreign institutional voids and entrepreneurial orientation. *Journal of Business Research*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2023.114449>
- Charbonneau-Genest, M., & Gamache, S. (2023). The importance of digital readiness on manufacturing SMEs' performance aiming towards Industry 4.0: A case study. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 630–639. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-17629-6\\_66](https://doi.org/10.1007/978-3-031-17629-6_66)
- Chau, K. Y., Huang, T., Moslehpour, M., Khan, W., Nisar, Q. A., & Haris, M. (2023). Opening a new horizon in green HRM practices with big data analytics and its analogy to circular economy performance: An empirical evidence. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03725-9>
- Cheng, J., Xu, C., Dou, F., Wang, W., Wan, Z., & Xia, K. (2021). Big data analysis of the benefits calculation in the electric power smart economical operation. *2021 IEEE Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science, TOCS 2021*, 775–777. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/TOCS53301.2021.9689015>

- D'Amato, D., Droste, N., Allen, B., Kettunen, M., Lähtinen, K., Korhonen, J., ... Toppinen, A. (2017). Green, circular, bio economy: A comparative analysis of sustainability avenues. *Journal of Cleaner Production*, 168, 716–734. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.053>
- Dicuonzo, G., Galeone, G., Ranaldo, S., & Turco, M. (2020). The key drivers of born-sustainable businesses: Evidence from the Italian fashion industry. *Sustainability (Switzerland)*, 12(24), 1–16. <https://doi.org/10.3390/su122410237>
- Duarte, S., Cabrita, M. R., & Cruz-Machado, V. (2020). Business model, lean and green management and industry 4.0: A conceptual relationship. In J. Xu, S. E. Ahmed, F. L. Cooke, & G. Duca (Eds.), *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 1001, pp. 359–372). Springer Verlag. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-21248-3\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21248-3_27)
- Fraga-Lamas, P., Lopes, S. I., & Fernández-Caramés, T. M. (2021). Green IoT and edge AI as key technological enablers for a sustainable digital transition towards a smart circular economy: An industry 5.0 use case. *Sensors*, 21(17). <https://doi.org/10.3390/s21175745>
- Hajoary, P. K., MA, A., & Garza-Reyes, J. A. (2023). Industry 4.0 maturity assessment: A multi-dimensional indicator approach. *International Journal of Productivity and Performance Management*. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-07-2022-0325>
- Hardika, A. L., Susiani, R., Ilyas, S., Yusuf, P. S., & Novianto, R. A. (2021). Waste-intensive work as an embodiment of sustainability of business entities owned by Mitra Raharja Village, Ciwaruga Village. *Review of International Geographical Education Online*, 11(6), 190–195. <https://doi.org/10.48047/rigeo.11.06.23>
- Haseeb, M., Hussain, H. I., Ślusarczyk, B., & Jermisittiparsert, K. (2019). Industry 4.0: A solution towards technology challenges of sustainable business performance. *Social Sciences*, 8(5), 154. <https://doi.org/10.3390/socsci8050154>
- Ingemarsdotter, E., Jamsin, E., & Balkenende, R. (2020). Opportunities and challenges in IoT-enabled circular business model implementation – A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105047>
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. (2021). Significant applications of big data in Industry 4.0. *Journal of Industrial Integration and Management*, 06(04), 429–447. <https://doi.org/10.1142/S2424862221500135>
- Khan, S. A. R., Piprani, A. Z., & Yu, Z. (2022). Digital technology and circular economy practices: Future of supply chains. *Operations Management Research*, 15(3–4), 676–688. <https://doi.org/10.1007/s12063-021-00247-3>
- Kock, N. (2018). Should bootstrapping be used in PLS-SEM? Toward stable p-value calculation methods. *Journal of Applied Structural Equation Modeling*, 2(1),