

PUBLIKASI PENELITIAN TERAPAN DAN KEBIJAKAN

e-ISSN: 2621-8119

DOI: <https://doi.org/10.46774/pptk.v6i1.533>

Kontribusi Aktivitas E-Commerce terhadap Timbulan Sampah: Studi Empiris di Kota Semarang

The Contribution of E-Commerce Activities to Waste Generation: An Empirical Study in Semarang City

Royani Wulandari¹, Maryono², Jamillatul Umroh³

^{1,3}Badan Perencanaan Pembangunan Daerah, Kota Semarang/Jawa Tengah, Indonesia

²Universitas Diponegoro Kota Semarang, Kota Semarang/Jawa Tengah, Indonesia

Korespondensi Penulis: Phone : +6282226176446, email: royani.wulandari@gmail.com

Diterima : 25 September 2025

Direvisi : 19 Desember 2025

Diterbitkan : 30 Desember 2025



This is an open access article under the CC BY-SA license

(<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>)

PPTK is indexed Journal and accredited as Sinta 4 Journal

(<https://sinta.kemdikbud.go.id/journals/profile/7050>)

ABSTRACT

This study analyzes the impact of e-commerce consumption on waste generation in Semarang City, specifically in Patemon Sub-district. The increasing dominance of e-commerce in the Industry 4.0 era has transformed consumer behavior and influenced household waste generation.

This research used a quantitative approach through a survey of 100 e-commerce user respondents, and analyzes the relationship between variables using linear regression and the Sobel mediation test. This research evaluates waste generation as the dependent variable (Y), e-commerce consumption as the independent variable (X1), consumer behavior (I1) and environmental awareness (I2) as intervening variables. The analysis results indicate that e-commerce consumption has a positive effect on waste generation, with consumer behavior mediating this relationship. Conversely, environmental awareness does not exhibit a significant mediating effect. This study recommends promoting responsible consumption education, enhancing community-based waste management facilities, campaigning against waste burning, providing recycling incentives, and implementing regulations for eco-friendly packaging on e-commerce platforms to mitigate the negative environmental impacts of digital consumption.

Keywords: consumer behavior, e-commerce, environmental awareness, waste.

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis dampak konsumsi *e-commerce* terhadap timbulan sampah di Kota Semarang, khususnya di Kelurahan Patemon. *E-commerce* yang semakin dominan pada era industri 4.0 telah mengubah konsumsi masyarakat dan mempengaruhi timbulan sampah rumah tangga. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui survei kepada 100 responden pengguna *e-commerce*, dan menganalisis hubungan antar variabel menggunakan regresi linear dan uji mediasi Sobel. Penelitian ini mengevaluasi timbulan sampah sebagai variabel terikat (Y), konsumsi *e-commerce* sebagai variabel bebas (X1), perilaku konsumen (I1) dan kesadaran lingkungan (I2) sebagai variabel *intervening*. Hasil analisis menunjukkan bahwa konsumsi *e-commerce* berpengaruh positif terhadap timbulan sampah, sementara perilaku konsumen terbukti memediasi hubungan tersebut. Sebaliknya, kesadaran lingkungan tidak memiliki efek mediasi yang signifikan. Penelitian ini merekomendasikan edukasi konsumsi bertanggung jawab, penguatan fasilitas pengelolaan sampah

berbasis komunitas, kampanye anti-pembakaran sampah, insentif daur ulang, serta regulasi kemasan ramah lingkungan pada platform *e-commerce* untuk mengurangi dampak negatif konsumsi digital terhadap lingkungan.

Kata kunci: *e-commerce*, kesadaran lingkungan, perilaku konsumen, sampah.

PENDAHULUAN

Di era Industri 4.0 saat ini, *e-commerce* telah menjadi bagian dari kehidupan sehari-hari manusia di berbagai belahan dunia dan mengubah pola konsumsi masyarakat secara signifikan. Sasabone et al., (2023) menyatakan bahwa perubahan ini selaras dengan tren global digitalisasi dan perubahan perilaku konsumen. Pertumbuhan teknologi dan akses internet yang luas memungkinkan konsumen bertransaksi secara *online* dengan cepat dan mudah, sehingga banyak perusahaan memanfaatkan teknologi telekomunikasi, seperti internet (Kabugumila, Lushakuzi, and Mtui 2016). Fenomena tersebut mengubah perilaku dan ekspektasi konsumen, serta memungkinkan otomatisasi dan keputusan dalam transaksi daring (Kolomiyets et al. 2024)

E-commerce di Indonesia mulai berkembang sejak tahun 2000-an, tetapi minat masyarakat meningkat signifikan pada 2014, ditandai dengan kemunculan banyak start-up seperti Shopee, Tokopedia, dan Bukalapak (Maulana et al. 2021). Didukung oleh penetrasi internet yang meningkat dan ekonomi yang stabil, konsumen Indonesia semakin mengadopsi belanja *online*. Survei BPS (2023) menunjukkan bahwa 73,47% pembeli *e-commerce* adalah konsumen akhir dan 77,23% pengguna baik penjual maupun pembeli berada di Pulau Jawa.

Kota Semarang sebagai salah satu pusat ekonomi dan budaya di Pulau Jawa, memiliki peran strategis sebagai kota pelabuhan utama di pesisir utara. Dengan sejarah panjang sebagai pusat perdagangan dan transportasi, Semarang telah mengalami pertumbuhan ekonomi pesat dalam beberapa dekade terakhir, didukung oleh sektor perdagangan, manufaktur, dan jasa. Pertumbuhan ini menjadikan Semarang sebagai magnet

urbanisasi, menarik penduduk dari wilayah sekitarnya untuk mencari peluang kerja dan kehidupan yang lebih baik. Akibatnya, Semarang berkembang menjadi wilayah perkotaan modern dengan infrastruktur dan pemukiman yang terus meningkat. Selain itu, kemajuan teknologi informasi, khususnya *e-commerce*, turut memengaruhi pola konsumsi masyarakat, menjadikan *platform* daring sebagai pilihan utama untuk pembelian barang dan jasa berkat kemudahan dan kenyamanan yang ditawarkan.

Kota Semarang masih memiliki beberapa kawasan wilayah yang merupakan perpaduan karakter antara pedesaan dengan aktivitas perkotaan. Di wilayah ini, kegiatan seperti pertanian tradisional berjalan beriringan dengan perdagangan dan jasa modern. Tak hanya sebagai tempat tinggal, wilayah-wilayah tersebut juga memiliki peran dalam penyediaan bahan pangan lokal dan menjaga keberlanjutan lingkungan. Kemajuan teknologi, khususnya internet dan infrastruktur telekomunikasi, membuka akses masyarakat di wilayah tersebut terhadap *e-commerce*, yang kemudian memengaruhi pola konsumsi dan membawa dampak lingkungan, terutama di wilayah pinggiran yang sebelumnya memiliki keterbatasan akses dibandingkan pusat kota.

E-commerce menawarkan kemudahan berbelanja bagi masyarakat, memungkinkan mereka membeli berbagai produk secara *online* tanpa perlu bepergian ke pusat kota. Kemudahan ini meningkatkan frekuensi pembelian dan konsumsi, yang berpotensi menambah timbulan sampah. Kim, Kang, and Chun (2022), mencatat bahwa *e-commerce* di Korea menghasilkan 4,8 kali lebih banyak sampah kemasan dibandingkan pembelian langsung di toko. You et al. (2021), memperkirakan kemasan menyumbang sekitar 46% sampah plastik global. Lebreton and Andrady (2019), mengungkapkan bahwa Asia,

khususnya Tiongkok dan India, merupakan pasar terbesar konsumsi kemasan dan penyumbang utama sampah plastik global, diikuti Amerika Utara dan Eropa Barat. Di Indonesia, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (2020) menemukan 96% paket belanja *online* dibungkus plastik, *styrofoam*, atau *bubble wrap*, yang memperburuk sampah plastik. *E-commerce* cenderung menggunakan kemasan berlebihan untuk melindungi produk selama pengiriman, menghasilkan limbah signifikan dengan sistem pengelolaan sampah yang belum memadai.

Kesenjangan antara kepraktisan *e-commerce* dan kesadaran terhadap dampak lingkungannya sering terjadi. Cheba et al. (2021), menemukan bahwa perkembangan *e-commerce* di perkotaan memengaruhi lingkungan, termasuk melalui sampah yang dihasilkan. Konsumen *e-commerce* cenderung kurang peduli terhadap dampak limbah belanja *online*, terutama karena akses terbatas pada layanan pengelolaan sampah yang memadai. Akibatnya, sampah dari *e-commerce* berpotensi mencemari lingkungan.

Pedagang *e-commerce* menggunakan berbagai bahan kemasan untuk melindungi produk selama pengiriman, termasuk kardus, busa, dan plastik *bubble* (Pinos, Hahladakis, and Chen 2022). Aktivitas ini menghasilkan limbah kemasan tambahan yang lebih banyak dibandingkan pembelian langsung di toko (Zijm et al. 2021). Penggunaan kemasan sekali pakai yang berlebihan dan pengiriman dengan kendaraan bermotor meningkatkan limbah padat dan emisi karbon. Limbah ini sering kali sulit terurai, seperti polivinil klorida (PVC), polietilen (PE), polipropilen (PP), dan polistirena (PS), yang mencemari lingkungan dalam jangka panjang (Villarrubia-Gómez, E. Cornell, and Joan 2018); Pinos, Hahladakis, and Chen 2022). Escursell, Llorach-Massana, and Roncero (2021), mencatat bahwa kemasan *e-commerce* dan ritel konvensional berkontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca, memunculkan kekhawatiran terhadap dampak lingkungan jangka panjang dari *e-commerce*.

Kesadaran lingkungan mempengaruhi preferensi konsumen dalam memilih kemasan ramah lingkungan di *e-commerce*. Konsumen dengan kesadaran akan lingkungan yang baik

cenderung mendukung desain kemasan yang dapat didaur ulang dan merek yang *eco-friendly* (Nadi and Wasesa 2024). Namun, kurangnya transparansi terkait praktik produksi, kemasan, dan pengiriman sering menjadi hambatan bagi konsumen untuk membuat keputusan berkelanjutan. Menurut Sahabuddin et al. (2024), transparansi informasi merupakan elemen penting dalam membangun kepercayaan, karena konsumen merasa lebih aman saat informasi produk disampaikan secara jelas dan akurat. Oleh karena itu, meningkatkan kesadaran lingkungan dan memberikan akses informasi tentang praktik berkelanjutan menjadi langkah penting dalam mitigasi dampak konsumsi *e-commerce*.

Kelurahan Patemon di Kota Semarang dipilih sebagai lokasi studi kasus karena mencerminkan karakteristik wilayah/kawasan yang mengalami dampak pertumbuhan industri *e-commerce*. Sebagai kawasan yang berada di perbatasan antara area perkotaan dan pedesaan, Patemon memiliki dinamika sosial dan ekonomi yang beragam. Akses masyarakat terhadap teknologi dan *platform e-commerce* tergolong mudah, namun kelurahan ini menghadapi keterbatasan sarana dan prasarana pengelolaan sampah. Meski kepadatan penduduknya tergolong sedang yaitu sejumlah 6.103 jiwa pada tahun 2023 (dispendukcapil, 2023), namun tingkat konsumsi *e-commerce* yang relatif tinggi berkontribusi terhadap peningkatan volume sampah, terutama dari kemasan produk *e-commerce*. Variasi tingkat pendidikan dan kesadaran lingkungan masyarakat menambah tantangan dalam pengelolaan sampah, sementara kebiasaan daur ulang di kawasan ini masih perlu ditingkatkan.

Kondisi terbatasnya infrastruktur pengelolaan sampah di Kelurahan Patemon memperparah permasalahan timbunan sampah, terutama dengan meningkatnya konsumsi *e-commerce*. Namun, kawasan ini memberikan peluang unik untuk memanfaatkan sumber daya lokal dan memperkuat praktik keberlanjutan. Studi ini bertujuan memberikan wawasan tentang bagaimana berbagai faktor saling berinteraksi dalam konteks konsumsi *e-commerce* dan pengelolaan sampah di suatu wilayah, serta memberikan rekomendasi

strategi yang dapat diadaptasi untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Melalui penelitian di Kelurahan Patemon, diharapkan dapat dihasilkan wawasan yang relevan bagi pemangku kepentingan, termasuk pemerintah daerah, perusahaan *e-commerce*, dan masyarakat lokal. Wawasan ini diharapkan mampu mendukung pengembangan strategi pengelolaan sampah yang berkelanjutan, sekaligus memperkuat kesadaran lingkungan dan ekonomi lokal dalam menghadapi tantangan konsumsi *e-commerce*.

METODE PENELITIAN

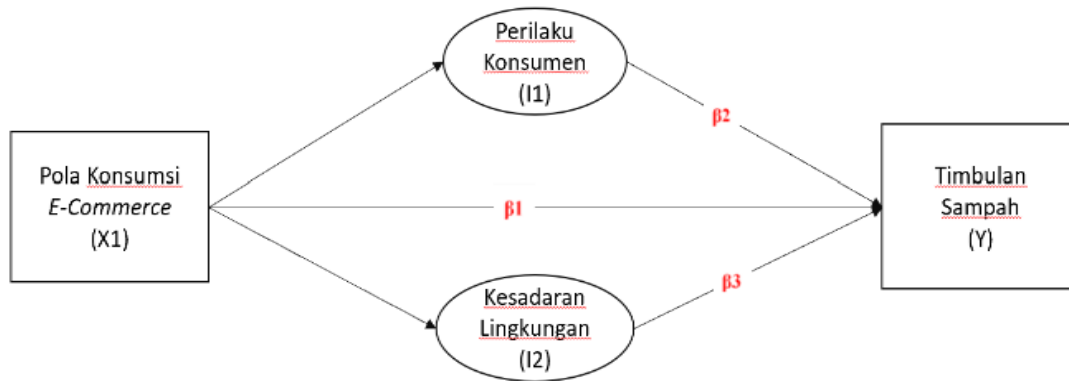
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif untuk menyelidiki secara komprehensif hubungan antara konsumsi *e-commerce* dan timbulan sampah yang dihasilkan dengan mempertimbangkan perilaku konsumen dan kesadaran lingkungan pada konsumen di Kelurahan Patemon.

Teknik Pengumpulan Data. Sumber data yang digunakan dalam penelitian meliputi data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi langsung terhadap pengelolaan sampah Kelurahan Patemon serta penyebaran kuesioner kepada masyarakat di kelurahan Patemon yang menggunakan layanan *e-commerce*. Menurut Pujiastuti (2010), kuesioner merupakan alat pengumpulan data dengan metode survei untuk memperoleh opini responden yang dapat didistribusikan secara langsung oleh peneliti, dikirim melalui pos, maupun dikirim melalui komputer seperti surat elektronik (*email*). Sedangkan data sekunder diperoleh dari dokumen perencanaan wilayah Kota Semarang serta beberapa literatur terkait. Data disajikan dalam bentuk tabulasi deskriptif atas variabel-variabel yang terlibat dalam penelitian.

Pengambilan Sampel. Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh penduduk

Kelurahan Patemon Kota Semarang yaitu 5.917 jiwa. Pengambilan sampel dilakukan secara acak (*random sampling*) dengan kriteria: berusia ≥ 18 tahun, berdomisili di Kelurahan patemon dan pernah melakukan transaksi *e-commerce* dalam kurun waktu 6 bulan terakhir. Jumlah sampel dalam penelitian ini diperhitungkan dengan menggunakan rumus Slovin dan ditetapkan sebanyak 100 peserta.

Teknik Analisis Data. Analisis data dalam penelitian ini menggunakan dua pendekatan, yaitu (1) analisis deskriptif untuk menggambarkan karakteristik masing-masing variabel, serta (2) analisis regresi linier dan uji sobel untuk menguji hubungan langsung dan peran mediasi perilaku konsumen serta kesadaran lingkungan dalam hubungan antara konsumsi *e-commerce* dan timbulan sampah. Analisis data deskriptif merupakan tahap awal dalam pengolahan data penelitian yang bertujuan untuk menggambarkan serta menjelaskan karakteristik atau fenomena tertentu. Analisis ini berfungsi untuk menyajikan dan merangkum data secara statistik (Purwanza et al. 2023). Sedangkan analisis regresi linier merupakan alat ukur dalam statistik yang digunakan untuk mengevaluasi hubungan antar variabel (Nurhaswinda et al. 2025). Analisis regresi tidak hanya memberikan informasi tentang hubungan antara variabel, tetapi juga memberikan estimasi yang lebih akurat untuk peramalan. Dengan menggunakan analisis regresi, peneliti dapat menentukan slope atau kemiringan dari garis regresi yang menunjukkan tingkat perubahan variabel dependen terhadap perubahan variabel independen (Almumtazah et al. 2021).



Gambar 1. Kerangka Model Penelitian
 Sumber: dikembangkan dalam penelitian (2024)

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis Deskriptif

Tabel 1. Descriptive Statistics

Item	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
Konsumsi <i>E-commerce</i>	100	6.00	25.00	15.78	4.29136
Timbulan Sampah	100	6.00	24.00	15.82	3.69105
Perilaku Konsumen	100	5.00	25.00	14.38	3.88413
Kesadaran Lingkungan	100	5.00	25.00	14.19	3.80243

Sumber: Data primer yang diolah, 2024

Analisis deskriptif yang dilakukan memberikan pemahaman mendalam tentang variabel-variabel yang terlibat dalam penelitian ini. Berdasarkan data dari 100 responden, berikut penjelasan deskriptif untuk masing-masing variabel.

Konsumsi *e-commerce* memiliki rata-rata 15,78 dan deviasi standar 4,29 menunjukkan variasi dalam intensitas belanja *online* responden yang dipengaruhi oleh faktor aksesibilitas internet, preferensi individu, dan pengalaman berbelanja. Rentang nilai antara 6 dan 25 menunjukkan perbedaan signifikan dalam tingkat konsumsi.

Timbulan sampah mencatat rata-rata 15,82 dan deviasi standar 3,69. Meskipun responden aktif berbelanja *online*, jumlah sampah yang dihasilkan menunjukkan konsistensi, dengan nilai minimum 6 dan maksimum 24. Hal ini menunjukkan kesadaran dalam pengelolaan sampah, meskipun

tantangan tetap ada terkait dengan peningkatan sampah akibat konsumsi yang meningkat.

Perilaku konsumen memiliki rata-rata 14,38 dan deviasi standar 3,88 mencerminkan variasi yang cukup besar dipengaruhi oleh pendapatan, pendidikan, dan akses informasi. Masyarakat yang lebih sadar lingkungan cenderung memiliki perilaku konsumsi yang lebih bertanggung jawab.

Kesadaran lingkungan mencatat rata-rata 14,19 dan deviasi standar 3,80 menunjukkan tingkat kesadaran yang baik, namun masih ada ruang untuk meningkatkan partisipasi dalam program lingkungan seperti daur ulang. Kesadaran ini penting untuk memengaruhi kebiasaan konsumsi dan pengelolaan sampah.

2. Analisis Regresi Linier

2.1. Variabel bebas (Konsumsi e-commerce) terhadap variabel terikat (Timbulan Sampah)

Tabel 2 di bawah ini menunjukkan kekuatan hubungan antara Konsumsi *e-commerce* dan timbulan sampah. Nilai *R* sebesar 0.414 menunjukkan adanya hubungan moderat antara kedua variabel,

sementara *R Square* sebesar 0.171 mengindikasikan bahwa sekitar 17.1% dari variasi timbulan sampah dapat dijelaskan oleh konsumsi *e-commerce*. Nilai *Adjusted R Square* sebesar 0.163 menunjukkan bahwa prediksi model ini tetap stabil meskipun disesuaikan dengan jumlah variabel dalam model.

Tabel 2. Ringkasan Model Regresi (Adj R)

<i>Model Summary</i>				
Model	R	<i>R Square</i>	<i>Adjusted R Square</i>	<i>Std. Error of the Estimate</i>
1	.414 ^a	.171	.163	3.37715
a. Predictors: (Constant), Konsumsi <i>E-commerce</i>				

Sumber: Data primer yang diolah, 2024

Tabel 3. Uji Signifikansi Model Regresi (Uji F)

<i>ANOVA^a</i>						
Model		<i>Sum of Squares</i>	df	<i>Mean Square</i>	F	Sig.
1	<i>Regression</i>	231.056	1	231.056	20.259	.000 ^b
	<i>Residual</i>	1117.704	98	11.405		
	<i>Total</i>	1348.760	99			
a. <i>Dependent Variable</i> : Timbulan Sampah						
b. <i>Predictors</i> : (Constant), Konsumsi <i>E-commerce</i>						

Sumber: Data primer yang diolah, 2024

Tabel 4. Hasil Uji Regresi Model Dasar

<i>Coefficients^a</i>					
Model		<i>UnStandardized Coefficients</i>		<i>Standardized Coefficients</i>	Sig.
		B	<i>Std. Error</i>	Beta	
1	(Constant)	10.202	1.293		.000
	Konsumsi <i>E-commerce</i>	.356	.079	.414	.000
a. <i>Dependent Variable</i> : Timbulan Sampah					

Sumber: Data primer yang diolah, 2024

Analisis varians (ANOVA) pada **tabel 3** di atas menunjukkan bahwa nilai *F* hitung untuk model regresi ini adalah 20.259, dengan *p-value* sebesar 0.000, yang lebih kecil dari 0.05. Ini mengindikasikan bahwa model regresi secara keseluruhan signifikan dalam memprediksi variabel dependen Timbulan Sampah berdasarkan variabel independen Konsumsi *E-commerce*.

Tabel 4 menunjukkan nilai-nilai koefisien yang digunakan untuk menyusun persamaan regresi model dasar. Nilai konstanta atau *intercept* sebesar 10.202 mengindikasikan nilai dasar timbulan sampah ketika konsumsi *e-commerce* bernilai nol. Sementara itu, koefisien untuk Konsumsi *E-commerce* adalah 0.356, yang berarti bahwa setiap peningkatan satu unit dalam konsumsi *e-commerce* akan

meningkatkan timbulan sampah sebesar 0.356 unit.

Selanjutnya, hasil uji *t* menunjukkan bahwa nilai *t* hitung untuk variabel Konsumsi *E-commerce* adalah sebesar 4.501 dengan *p-value* yang lebih kecil dari 0.05 yaitu sebesar 0.000. Ini mengindikasikan bahwa pengaruh Konsumsi *E-commerce* terhadap Timbulan Sampah signifikan pada tingkat kepercayaan 95%.

2.2. Variabel Intervening 1 (Perilaku Konsumen) - Hubungan antara Konsumsi E-commerce, Perilaku Konsumen, dan Timbulan Sampah

Pengujian ini dilakukan dengan tujuan untuk melihat sejauh mana perubahan dalam konsumsi *e-commerce* dapat memengaruhi perilaku konsumen, yang pada akhirnya dapat berdampak pada jumlah timbulan sampah yang dihasilkan. Dalam pengujian ini, Konsumsi *E-commerce* diprediksi memiliki pengaruh langsung terhadap Perilaku Konsumen, dan kemudian Perilaku Konsumen tersebut memiliki dampak pada Timbulan Sampah sebagaimana dijelaskan pada tabel 5, 6, dan 7 berikut:

Tabel 5. Ringkasan Model Regresi (Adj R)

<i>Model Summary</i>				
Model	R	<i>R Square</i>	<i>Adjusted R Square</i>	<i>Std. Error of the Estimate</i>
1	.505 ^a	.255	.240	3.21757

a. *Predictors: (Constant), Perilaku Konsumen, Konsumsi E-commerce*

Sumber: Data primer yang diolah, 2024

Tabel 5 di atas menunjukkan bahwa model yang digunakan dalam penelitian ini cukup baik dengan nilai *R* = 0.505 dan nilai koefisien determinasi (*R Square*) untuk model ini adalah sebesar 0,255 yang menunjukkan bahwa 25,5% variasi dalam

timbulan Sampah dapat dijelaskan oleh Konsumsi *E-commerce* dan Perilaku Konsumen secara bersama-sama. Adapun sisanya, yaitu 74,5%, dijelaskan oleh variabel lain di luar model penelitian ini.

Tabel 6. Uji Signifikansi Model Regresi (Uji F)

<i>ANOVA^a</i>						
Model		<i>Sum of Squares</i>	<i>df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F</i>	<i>Sig.</i>
1	<i>Regression</i>	344.542	2	172.271	16.640	.000 ^b
	<i>Residual</i>	1004.218	97	10.353		
	<i>Total</i>	1348.760	99			

a. *Dependent Variable: Timbulan Sampah*

b. *Predictors: (Constant), Perilaku Konsumen, Konsumsi E-commerce*

Sumber: Data primer yang diolah, 2024

Analisis varians (ANOVA) pada **tabel 6** menunjukkan bahwa nilai *F* hitung adalah 16.640 dengan *p* < 0.001, yang menunjukkan bahwa model regresi secara keseluruhan signifikan. Selanjutnya, untuk *F* hitung, kita bandingkan dengan *F* tabel

untuk *df*₁=2 dan *df*₂=97 pada tingkat signifikansi 0.05, di mana *F* tabel adalah sekitar 3.09. Karena *F* hitung (16.640) jauh lebih besar dari *F* tabel (3.09), kita juga menolak hipotesis nol untuk ANOVA, mengkonfirmasi bahwa setidaknya satu dari

variabel independen berkontribusi secara signifikan terhadap variasi dalam Timbulan Sampah. Dengan demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa Perilaku Konsumen

adalah faktor yang signifikan dalam mempengaruhi Timbulan Sampah, sedangkan Konsumsi *E-Commerce* tidak berpengaruh signifikan.

Tabel 7. Hasil Uji Regresi

<i>Coefficients^a</i>						
Model		<i>UnStandardized Coefficients</i>		<i>Standardized Coefficients</i>	t	Sig.
		B	<i>Std. Error</i>	Beta		
1	(Constant)	8.425	1.344		6.270	.000
	Konsumsi <i>E-commerce</i>	.129	.102	.150	1.267	.208
	Perilaku Konsumen	.373	.113	.392	3.311	.001

a. *Dependent Variable*: Timbulan Sampah

Sumber: Data primer yang diolah, 2024

Pada analisis koefisien dalam **tabel 7** di atas, Konsumsi *E-commerce* memiliki nilai koefisien regresi sebesar 0,129 dengan nilai signifikansi (Sig.) sebesar 0,208 (lebih besar dari 0,05). Sementara Perilaku Konsumen menunjukkan nilai koefisien regresi sebesar 0,373 dengan nilai signifikansi sebesar 0,001 (lebih kecil dari 0,05). Hal tersebut menunjukkan bahwa Perilaku Konsumen mempengaruhi Timbulan Sampah secara signifikan, sedangkan Konsumsi *E-commerce* tidak menunjukkan pengaruh langsung yang signifikan terhadap Timbulan Sampah.

2.1. Variabel *Intervening* 2 (Kesadaran Lingkungan) - Hubungan antara Konsumsi *E-commerce*, Kesadaran Lingkungan, dan Timbulan Sampah

Kesadaran Lingkungan berperan sebagai variabel *intervening* yang dapat memediasi hubungan antara Konsumsi *E-commerce* dan Timbulan Sampah. Dengan memasukkan kedua variabel ini dalam analisis, diharapkan dapat terlihat apakah Kesadaran Lingkungan yang terbentuk akibat konsumsi *e-commerce*, berperan dalam menekan jumlah timbulan sampah.

Tabel 8. Ringkasan Model Regresi (Adj R)

<i>Model Summary</i>				
Model	R	<i>R Square</i>	<i>Adjusted R Square</i>	<i>Std. Error of the Estimate</i>
1	.458 ^a	.210	.194	3.31445

a. *Predictors*: (Constant), Kesadaran Lingkungan, Konsumsi *E-commerce*

Sumber: Data primer yang diolah, 2024

Pada **tabel 8** di atas, terlihat nilai R sebesar 0.458 yang menunjukkan adanya hubungan positif antara variabel independen (Konsumsi *E-commerce* dan Kesadaran Lingkungan) dengan variabel dependen (Timbulan Sampah). Nilai *R Square* sebesar 0.210 mengindikasikan bahwa 21.0% variasi dalam Timbulan Sampah dapat dijelaskan oleh Konsumsi *E-commerce* dan Kesadaran Lingkungan.

Artinya, kombinasi antara konsumsi melalui *e-commerce* dan kesadaran lingkungan memiliki peran yang cukup berarti dalam memengaruhi jumlah timbulan sampah, walaupun masih terdapat faktor-faktor lain di luar model ini yang juga berkontribusi.

Selain itu, *Adjusted R Square* bernilai 0.194, yang menunjukkan bahwa model ini tetap cukup stabil meskipun terdapat

variabel-variabel lain yang mungkin belum dimasukkan ke dalam analisis. Hasil ini memberikan pemahaman bahwa Konsumsi *E-commerce* dan Kesadaran Lingkungan

secara bersama-sama memiliki pengaruh terhadap timbunan sampah, walaupun efeknya tidak terlalu besar.

Tabel 9. Uji Signifikansi Model Regresi (Uji F)

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	283.162	2	141.581	12.888	.000 ^b
	Residual	1065.598	97	10.986		
	Total	1348.760	99			
a. Dependent Variable: Timbunan Sampah						
b. Predictors: (Constant), Kesadaran Lingkungan, Konsumsi <i>E-commerce</i>						

Sumber: Data primer yang diolah, 2024

Pada **tabel 9** di atas, diketahui nilai F sebesar 12.888 dengan p sebesar 0.000 menunjukkan bahwa model regresi secara keseluruhan signifikan pada tingkat kepercayaan 99%. Ini berarti bahwa gabungan variabel Konsumsi *E-commerce* dan Kesadaran Lingkungan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap

Timbunan Sampah. Hasil ini memperkuat kesimpulan bahwa konsumsi melalui *e-commerce*, beserta tingkat kesadaran lingkungan masyarakat, berperan dalam memengaruhi jumlah timbunan sampah yang dihasilkan.

Tabel 10. Hasil Uji Regresi

Coefficients ^a						
Model		UnStandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	8.328	1.533		5.432	.000
	Konsumsi <i>E-commerce</i>	.291	.083	.338	3.498	.001
	Kesadaran Lingkungan	.204	.094	.211	2.178	.032
a. Dependent Variable: Timbunan Sampah						

Sumber: Data primer yang diolah, 2024

Tabel 10 tentang hasil uji regresi, menunjukkan nilai konstanta (*intersep*) adalah 8.328, yang berarti bahwa ketika Konsumsi *E-commerce* dan Kesadaran Lingkungan bernilai nol, maka jumlah Timbunan Sampah diperkirakan sebesar 8.328. Koefisien regresi untuk Konsumsi *E-commerce* adalah 0.291, yang menunjukkan bahwa setiap peningkatan satu unit dalam Konsumsi *E-commerce* akan meningkatkan timbunan sampah sebesar 0.291 unit, dengan nilai p sebesar 0.001, yang menunjukkan signifikansi pada tingkat 99%. Artinya, Konsumsi *E-commerce* memiliki pengaruh yang signifikan dan positif terhadap Timbunan Sampah, yang berarti bahwa peningkatan konsumsi

melalui *e-commerce* cenderung meningkatkan jumlah timbunan sampah.

Koefisien regresi untuk Kesadaran Lingkungan adalah 0.204, yang berarti setiap peningkatan satu unit dalam Kesadaran Lingkungan akan meningkatkan Timbunan Sampah sebesar 0.204 unit. Dengan nilai p sebesar 0.032, efek ini juga signifikan pada tingkat kepercayaan 95%. Hal ini sedikit mengejutkan, karena menunjukkan bahwa peningkatan kesadaran lingkungan tidak secara langsung mengurangi timbunan sampah, tetapi justru memiliki korelasi positif dengan timbunan sampah dalam konteks model ini. Interpretasi ini dapat mengindikasikan bahwa meskipun kesadaran lingkungan meningkat, tindakan konkret dalam

mengurangi timbulan sampah mungkin belum dilakukan sepenuhnya oleh masyarakat.

3. Hasil Uji Sobel Untuk Kedua Variabel *Intervening*

Setelah menganalisis hasil regresi pada hubungan antara variabel bebas (konsumsi *e-commerce*) dan variabel *intervening* (Perilaku Konsumen dan kesadaran Lingkungan) serta antara variabel *intervening* dengan variabel terikat (Timbulan Sampah), langkah selanjutnya adalah menguji apakah kedua variabel *intervening* tersebut memediasi hubungan antara Konsumsi *E-commerce* dan Timbulan

Sampah. Untuk menguji efek mediasi tersebut, digunakan metode uji Sobel yang memberikan informasi mengenai kekuatan dan signifikansi peran mediasi. Uji Sobel berfungsi untuk memastikan apakah kedua variabel *intervening* secara signifikan memediasi pengaruh Konsumsi *E-commerce* terhadap Timbulan Sampah.

3.1. Variabel *Intervening* 1 (Perilaku Konsumen)

Langkah pertama dalam analisis sobel ini adalah memasukkan data dari hasil analisis *coefficients* regresi yang telah dilakukan sebelumnya pada Tabel berikut:

Tabel 11. Ringkasan Coefficients Regresi

Variabel	Unstandarized	Std.Error
Konsumsi <i>E-commerce</i> terhadap Perilaku Konsumen	0,609 (a)	0,068 (sa)
Perilaku Konsumen terhadap Timbulan Sampah	0,373 (b)	0,113 (sb)

Sumber: Data primer yang diolah, 2024

Dari **tabel 11** diatas, dilakukan kalkulasi menggunakan alat bantu kalkulator *online* dari situs <https://quantpsy.org/sobel/sobel>.

[htm](https://quantpsy.org/sobel/sobel) dan didapat hasil seperti pada tabel berikut:

Tabel 12. Hasil Hitung Sobel

Kualitas Produk		Test Statistics	P Value	Kesimpulan
a	0,609	3,097	0,00195	Memediasi secara signifikan
b	0,373			
sa	0,068			
sb	0,113			

Sumber: hasil olah statistik menggunakan alat hitung online:

<https://quantpsy.org/sobel/sobel.htm>

Pada gambar hasil uji Sobel di atas, input yang digunakan mencakup koefisien regresi dan standar eror dari hubungan antara Konsumsi *E-commerce* dan Perilaku Konsumen ($a = 0,609$, $s_a = 0,068$) serta hubungan antara Perilaku Konsumen dan Timbulan Sampah ($b = 0,373$, $s_b = 0,113$).

Berdasarkan hasil uji Sobel, diperoleh nilai tes statistik sebesar 3,097 dengan nilai *p-value* sebesar 0,00195. Nilai ini lebih kecil dari 0,05, sehingga dapat disimpulkan bahwa Perilaku Konsumen mampu memediasi secara signifikan hubungan

antara Konsumsi *E-commerce* dan Timbulan Sampah.

Dengan demikian, hasil analisis ini mengindikasikan bahwa meskipun Konsumsi *E-commerce* tidak memiliki pengaruh langsung yang signifikan terhadap Timbulan Sampah, pengaruh tersebut dapat diteruskan melalui Perilaku Konsumen sebagai variabel mediasi. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan konsumsi melalui *e-commerce* akan mempengaruhi perilaku konsumen dalam membuang sampah, yang pada akhirnya akan berdampak pada peningkatan timbulan

sampah di lingkungan. Dengan kata lain, peningkatan konsumsi *e-commerce* cenderung lebih efektif dalam meningkatkan timbulan sampah melalui perubahan perilaku konsumen terkait pengelolaan sampah atau konsumsi barang, dibandingkan dengan dampaknya secara langsung.

Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa Perilaku konsumen (I1) memediasi hubungan antara konsumsi *e-commerce* (X1) dan timbulan sampah (Y) di Kelurahan Patemon, Kota Semarang dapat di terima.

3.2. Variabel Intervening 2 (Kesadaran Lingkungan)

Uji Sobel juga dilakukan untuk menentukan apakah Kesadaran Lingkungan memiliki peran sebagai variabel mediasi antara Konsumsi E-commerce dan Timbulan Sampah. Dengan uji ini, kita dapat memahami apakah pengaruh Konsumsi E-commerce terhadap Timbulan Sampah dapat dijelaskan melalui peningkatan Kesadaran Lingkungan sebagai perantara.

Tabel 13. Ringkasan Coefficients Regresi

Variabel	Unstandarized	Std.Error
Konsumsi <i>E-commerce</i> terhadap Kesadaran Lingkungan	0,318 (a)	0,084 (sa)
Kesadaran lingkungan terhadap Timbulan Sampah	0,204 (b)	0,094 (sb)

Sumber: Data primer yang diolah, 2024

Dari tabel 13 diatas, dilakukan kalkulasi menggunakan alat bantu kalkulator *online* dari

situs <https://quantpsy.org/sobel/sobel.htm> dan didapat hasil seperti pada tabel berikut:

Kualitas Produk		Test Statistics	P Value	Kesimpulan
a	0,318	1,882	0,060	Tidak mampu memediasi hubungan
b	0,204			
sa	0,084			
sb	0,094			

Sumber: hasil olah statistik menggunakan alat hitung *online*:

<https://quantpsy.org/sobel/sobel.htm>

Pada gambar hasil uji Sobel di atas, input yang digunakan mencakup koefisien regresi dan standar *error* dari hubungan antara Konsumsi *E-commerce* dan Kesadaran Lingkungan ($a = 0.318$, $s_a = 0.084$) serta hubungan antara Kesadaran Lingkungan dan Timbulan Sampah ($b = 0.204$, $s_b = 0.094$).

Berdasarkan hasil uji sobel, diperoleh nilai statistik sebesar 1,882 dengan nilai p sebesar 0,60 yang menunjukkan bahwa nilai $p > 0.05$, sehingga efek mediasi dari Kesadaran Lingkungan antara Konsumsi *E-commerce* dan Timbulan Sampah tidak signifikan pada tingkat kepercayaan 95%. Ini berarti Kesadaran Lingkungan tidak

mampu memediasi secara signifikan pengaruh Konsumsi *E-commerce* terhadap Timbulan Sampah. Dengan kata lain, meskipun Konsumsi *E-commerce* berpengaruh terhadap Kesadaran Lingkungan, peningkatan kesadaran ini tidak secara signifikan menurunkan jumlah timbulan sampah yang dihasilkan.

Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa hipotesis Kesadaran lingkungan (I2) memediasi hubungan antara konsumsi *e-commerce* (X1) dan timbulan sampah (Y) di Kelurahan Patemon, Kota Semarang ditolak atau tidak dapat di terima.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsumsi *e-commerce* secara signifikan memengaruhi timbunan sampah di Kelurahan Patemon. Akses yang meningkat terhadap platform *e-commerce* tidak hanya mendorong belanja *online* yang lebih mudah, tetapi juga meningkatkan konsumsi barang dengan kemasan sekali pakai seperti plastik dan kardus yang menambah beban lingkungan. Tanpa pengelolaan yang tepat, pertumbuhan konsumsi *e-commerce* berpotensi memperburuk masalah sampah.

Perilaku Konsumen berfungsi sebagai variabel *intervening*, dimana konsumen impulsif cenderung berbelanja tanpa mempertimbangkan kebutuhan sehingga meningkatkan jumlah sampah dari kemasan produk yang tidak esensial. Pentingnya Edukasi tentang dampak konsumsi impulsif diperlukan untuk mendorong perilaku belanja yang lebih berkelanjutan.

Kesadaran lingkungan masyarakat, meskipun positif, belum diterapkan secara efektif dalam praktik pengurangan sampah. Hal ini diakibatkan oleh kurangnya fasilitas daur ulang dan kemasan ramah lingkungan dalam *e-commerce*. Oleh karena itu, diperlukan edukasi intensif dan infrastruktur pendukung untuk mewujudkan tindakan yang efektif dalam pengurangan timbunan sampah.

REKOMENDASI

Berikut beberapa rekomendasi yang dapat dilakukan oleh Pemerintah Kota Semarang maupun *stakeholder-stakeholder* terkait sebagai langkah strategis dalam upaya Pengelolaan Sampah di Kelurahan Patemon:

1. Memberi Edukasi kepada Konsumen tentang Konsumsi yang Bertanggung Jawab.
Pemberian edukasi ke konsumen agar memiliki pola konsumsi bertanggung jawab terutama yang menyoroti dampak lingkungan dari kemasan belanja daring dan pentingnya memilih produk dengan kemasan ramah lingkungan penting untuk dilakukan agar masyarakat lebih selektif dalam berbelanja.
2. Peningkatan Fasilitas Pengelolaan Sampah Berbasis Komunitas.

Penguatan sistem berbasis komunitas menjadi solusi yang relevan mengingat keterbatasan fasilitas pengelolaan sampah di Patemon. Peningkatan peran bank sampah, pembangunan pusat daur ulang, dan penyediaan sarana pengangkutan sampah yang memadai dapat dilakukan melalui kolaborasi pemerintah, swasta, dan masyarakat dengan harapan mampu menciptakan pengelolaan yang lebih terstruktur dan berkelanjutan.

3. Penguatan Kebiasaan Daur Ulang Melalui Insentif dan Kampanye Sosial.
Partisipasi masyarakat dalam daur ulang dapat ditingkatkan melalui pemberian insentif seperti program poin atau hadiah bagi warga yang rutin menyetorkan sampah ke bank sampah. Kampanye sosial yang melibatkan tokoh lokal juga efektif untuk menginternalisasi kebiasaan daur ulang, mengurangi praktik membakar sampah, serta mendukung pengelolaan limbah yang lebih baik.
4. Pengaturan dan Kebijakan Kemasan Ramah Lingkungan pada Platform *E-commerce*.
Regulasi nasional yang mewajibkan penggunaan kemasan ramah lingkungan pada platform *e-commerce* menjadi kebutuhan mendesak. Pemerintah Pusat dapat mengatur kebijakan agar perusahaan *e-commerce* dapat mengurangi kemasan sekali pakai, sementara pemerintah lokal berperan dalam edukasi masyarakat. Upaya ini diharapkan dapat mengurangi dampak negatif konsumsi digital terhadap lingkungan, khususnya di wilayah seperti Kelurahan Patemon.
5. Optimalisasi Bank Sampah sebagai Pusat Edukasi dan Pengelolaan Sampah Terpadu.
Bank sampah dapat berfungsi sebagai pusat edukasi dan data pengelolaan sampah, tidak hanya sebagai tempat penampungan. Dengan operasional yang terjadwal, bank sampah dapat memberikan pelatihan pengolahan limbah mandiri, meningkatkan keterampilan warga, dan mendukung formulasi kebijakan berbasis data.
6. Pemanfaatan Teknologi Digital dalam Mengelola dan Mengawasi Sampah.
Peningkatan akses teknologi di Patemon dapat membuka peluang untuk menciptakan aplikasi pengelolaan sampah.

Aplikasi ini dapat mempermudah warga melaporkan volume sampah, menemukan lokasi bank sampah, atau jadwal pengangkutan, sekaligus mempromosikan daur ulang. Sistem ini dapat meningkatkan transparansi dan efisiensi pengelolaan sampah di wilayah.

7. Penerapan Kampanye Anti Pembakaran Sampah di Wilayah untuk Kesehatan dan Lingkungan.

Pembakaran sampah masih menjadi praktik yang lazim di berbagai wilayah termasuk di Kelurahan Patemon. Kampanye anti-pembakaran sampah perlu diterapkan secara masif melalui kolaborasi dengan perangkat kelurahan, komunitas lokal, dan lembaga kesehatan. Kampanye ini dapat mencakup penyuluhan dampak negatif pembakaran sampah terhadap kesehatan, pembuatan regulasi lokal yang melarang praktik ini, dan pengadaan alternatif pengelolaan limbah seperti komposting dan daur ulang. Langkah ini diharapkan dapat mengubah perilaku masyarakat sekaligus meningkatkan kualitas lingkungan hidup.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih ditujukan kepada Pemerintah Kota Semarang dan Universitas Diponegoro yang telah memberikan kesempatan dan dukungan sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada masyarakat Kelurahan Patemon serta pihak-pihak lain yang terlibat dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Almumtazah, N, N Azizah, Y L Putri, and D C R Novitasari. 2021. "Prediksi Jumlah Mahasiswa Baru Menggunakan Metode Regresi Linier Sederhana." *Jurnal Ilmiah Matematika Dan Terapan* 18 (1): 31–40. <https://doi.org/10.22487/2540766x.2021.v18.i1.15465>.
- Cheba, Katarzyna, Maja Kiba-Janiak, Anna Baraniecka, and Tomasz Kołakowski. 2021. "Impact of External Factors on E-Commerce Market in Cities and Its Implications on Environment." *Sustainable Cities and Society* 72 (November 2020).

<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103032>.

- Dispendukcapil Kota Semarang. 2023. Statistik Agregat penduduk [Online]. Dari: <https://dispendukcapil.semarangkota.go.id/statistik-agregat-penduduk/?semester=S2&tahun=2023&submit-statistik=true>[Diakses: 14 Juli 2024]

- Escursell, Sílvia, Pere Llorach-Massana, and M. Blanca Roncero. 2021. "Sustainability in E-Commerce Packaging: A Review." *Journal of Cleaner Production* 280:124314. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124314>.

- Kabugumila, Maureen Semu, Simon Lushakuzi, and Jacqueline E. Mtui. 2016. "E-Commerce: An Overview of Adoption and Its Effective Implementation." *International Journal of Business and Social Science* 7 (4): 243–52. <https://www.academia.edu/download/78459042/27.pdf>.

- Kim, Yeonsoo, Jisoo Kang, and Hyunbae Chun. 2022. "Is Online Shopping Packaging Waste a Threat to the Environment?" *Economics Letters* 214:110398. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2022.110398>.

- Kolomiyets, Ganna, Volodymyr Rodchenko, Olga Melentsova, Vladyslav Korol, and Maryna Moskalenko. 2024. "The Impact of Digitalization on the Formation of New Business Models in Electronic Commerce: Analysis and Trends." *Salud, Ciencia y Tecnologia - Serie de Conferencias* 3. <https://doi.org/10.56294/sctconf2024.652>.

- Lebreton, Laurent, and Anthony Andrady. 2019. "Future Scenarios of Global Plastic Waste Generation and Disposal." *Palgrave Communications* 5 (1): 1–12. <https://doi.org/10.1057/s41599-018-0212-7>.

- Maulana, Arman, Novira Rizki Arjun, Faisal Akbar, Novi Suryanti Ayu, and Hafizh Firmansyah. 2021. "Peran E-Commerce Di Tengah Pandemi Terhadap Gaya Hidup Masyarakat Indonesia Masa Kini." *Journal of Education and Technology* 1 (1): 55–61. <http://jurnalilmiah.org/journal/index.php/jet>.
- Nadi, Muhammad Hang, and Meditya Wasesa. 2024. "Towards Sustainable E-Commerce: Consumer Preferences for Reducing Packaging Waste in Indonesia—A PLS-SEM Analysis." *Journal of Social and Political Sciences* 7 (4): 123–36. <https://doi.org/10.31014/aior.1991.07.04.531>.
- Nurhaswinda, Poni D. Egistin, Yahdi M. Rauza, Rahma, Rohanda H. Ramadhan, Sagita Ramadani, and Wahyuni. 2025. "Analisis Regresi Linier Sederhana Dan Penerapannya." *Jurnal Cahaya Nusantara* 01 (02): 67–78.
- Pinos, Juan, John N. Hahladakis, and Hong Chen. 2022. "Why Is the Generation of Packaging Waste from Express Deliveries a Major Problem?" *Science of the Total Environment* 830:154759. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154759>.
- Pujihastuti, Isti. 2010. "Isti Pujihastuti Abstract." *Prinsip Penulisan Kuesioner Penelitian* 2 (1): 43–56.
- Purwanza, Sena Wahyu, Aditya Wardhana, Ainul Mufidah, Yuniarti Reny Renggo, Adrianus Kabubu Hudang, Jan Setiawan, and Darwin. 2023. *Metodologi Penelitian Kuantitatif, Kualitatif Dan Kombinasi. Media Sains Indonesia*.
- Sahabuddin, Romansyah, Hery Maulana Arif, Winda Lestari, Elin Alviolin, and Nur Muhammad Dzaky. 2024. "Transparansi Informasi Sebagai Mediator Dalam Hubungan Etika Pemasaran Digital Dan Kepercayaan Konsumen Di E-Commerce." *Maximal Journal : Jurnal Ilmiah Bidang Sosial, Ekonomi, Budaya Dan Pendidikan* 2 (1): 27–37.
- Sasabone, Luana, Eko Sudarmanto, Yovita Yovita, and Saputra Adiwijaya. 2023. "Pengaruh E-Commerce Dan Kemudahan Transaksi Terhadap Perubahan Pola Konsumsi Dalam Era Digital Di Indonesia." *Sanskara Ilmu Sosial Dan Humaniora* 1 (01): 32–42. <https://doi.org/10.58812/sish.v1i01.304>.
- Villarrubia-Gómez, Patricia, Sarah E. Cornell, and Joan. 2018. "Marine Plastic Pollution as a Planetary Boundary Threat – The Drifting Piece in the Sustainability Puzzle." *Marine Policy* 96 (August 2017): 213–20. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.11.035>.
- You, Siming, Wangliang Li, Wei Cheng Yan, and Christian Sonne. 2021. "Green Strategies for Sustainable Packaging." *Science* 372 (6544): 802. <https://doi.org/10.1126/science.abj1042>.
- Zijm, Henk, Matthias Klumpp, Alberto Regattieri, and Sunderesh Heragu. 2021. *Packaging Logistics. International Encyclopedia of Transportation: Volume 1-7*. Vol. 3. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102671-7.10230-1>.