

HORASTEX: MODEL BANK SAMPAH TEKSTIL DIGITAL SEBAGAI SOLUSI INOVATIF PENGELOLAAN LIMBAH PAKAIAN DI KOTA MEDAN

Wiradhika Perdana Azhari¹, Ahmad Zikri²

¹Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, Institut Teknologi Bandung

²Faculty of Engineering, Universitas Sumatera Utara

Email : ¹wiradhika1996@gmail.com, ²ahmadzikri@usu.ac.id

Corresponden Author : ahmadzikri@usu.ac.id

Abstrak

Fenomena fast fashion telah meningkatkan timbulan limbah tekstil di kawasan perkotaan, termasuk Kota Medan. Rendahnya pemilahan limbah, minimnya kesadaran masyarakat, serta sistem pengelolaan yang masih berorientasi pada pembuangan ke Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) memperburuk dampak lingkungan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan menganalisis model Bank Sampah Tekstil Digital (BSTD) berbasis aplikasi HORASTEX (Household Oriented Recycling Application for Sustainable Textile Management) sebagai solusi pengelolaan limbah tekstil berkelanjutan. Penelitian menggunakan pendekatan Research and Development (R&D) dengan mengintegrasikan survei perilaku masyarakat ($n=205$), Material Flow Analysis (MFA), dan Life Cycle Assessment (LCA) berdasarkan ISO 14040 dan ISO 14044. Hasil menunjukkan bahwa sistem konvensional (business as usual/BAU) mengalirkan sekitar 72% limbah tekstil ke TPA (49,88 ton/hari), sedangkan HORASTEX menurunkannya menjadi 37% (25,63 ton/hari). Berdasarkan faktor emisi 1,2 ton CO_{2e} per ton limbah, HORASTEX berpotensi mengurangi emisi sebesar 10.621,5 ton CO_{2e} per tahun atau sekitar 48,6% dibandingkan sistem konvensional. Selain itu, tingkat kemanfaatan dan kemudahan penggunaan aplikasi melebihi 80%. Model HORASTEX berpotensi meningkatkan partisipasi masyarakat, mengurangi beban TPA, serta mendukung pencapaian SDGs target 12.5 melalui reuse dan recycle.

Kata Kunci: *Analisis Sosial Dan Lingkungan; Ekonomi Sirkular; Fesyen Cepat; Limbah Tekstil; Tempat Pembuangan Akhir (TPA)*

Abstract

The fast fashion phenomenon has significantly increased textile waste generation in urban areas, including Medan City. Low waste segregation, limited public awareness, and conventional waste management systems that rely on landfill disposal have intensified environmental problems. This study aims to develop and evaluate a Digital Textile Waste Bank (DTWB) model through HORASTEX (Household-Oriented Recycling Application for Sustainable Textile Management) as an innovative solution for sustainable textile waste management. A Research and Development (R&D) approach was employed by integrating a community behavior survey ($n = 205$), Material Flow Analysis (MFA), and Life Cycle Assessment (LCA) based on ISO 14040 and ISO 14044. The results show that the conventional business-as-usual (BAU) system sends approximately 72% of textile waste to landfills (49.88 tons/day), while HORASTEX reduces this proportion to 37% (25.63 tons/day). Using an emission factor of 1.2 tons CO_{2e} per ton of waste, HORASTEX has the potential to reduce greenhouse gas emissions by 10,621.5 tons CO_{2e} annually (48.6%). User acceptance testing also indicated perceived usefulness and ease of use above 80%. Overall, HORASTEX enhances community participation, reduces landfill burdens, and supports SDG 12.5 through textile waste reuse and recycling.

Keyword: *Social And Environmental Analysis; Circular Economy; Fast Fashion; Textile Waste; Landfill*

PENDAHULUAN

Industri fesyen cepat (fast fashion) telah menjadi simbol paradoks dalam ekonomi modern. Di satu sisi, model bisnis ini memungkinkan masyarakat luas untuk mengakses tren fesyen terbaru dengan harga terjangkau, namun di sisi lain sistem produksi yang cepat dan masif ini menjadi salah satu penyumbang terbesar terhadap degradasi lingkungan global. Model fast fashion yang mengandalkan produksi cepat, biaya rendah, dan konsumsi berulang; hal ini secara signifikan telah memperpendek siklus hidup pakaian serta mendorong budaya konsumsi yang berlebihan (Abdelmeguid et al., 2022; Anisah et al., 2024; Bishnoi & Guru, 2023; Niinimäki et al., 2020).

Dampak lingkungan dari fenomena ini tidak dapat diabaikan. Secara global, industri tekstil diperkirakan menyumbang sekitar 10% dari total emisi karbon dioksida (CO₂), 20% dari penggunaan air industri dunia, dan 35% dari pelepasan mikroplastik ke laut setiap tahun (Dhanalakshmi et al., 2024; Juanga-Labayen et al., 2022; Niinimäki et al., 2020; Tiwari et al., 2025). Siklus hidup pakaian yang dimulai dari produksi serat, pewarnaan, hingga pembuangan; hal ini menyebabkan emisi gas rumah kaca (greenhouse gas emissions) yang besar, terutama pada tahap produksi material (38%), proses pewarnaan dan penyelesaian akhir (29%), serta energi yang digunakan selama fase penggunaan seperti pencucian dan pengeringan (20%) (Berg et al., 2020; Dhanalakshmi et al., 2024; Mata et al., 2025). Namun, masalah utama tidak hanya berhenti pada tahap produksi, melainkan juga pada pengelolaan limbah tekstil pasca-konsumsi (post-consumer textile waste). Data menunjukkan bahwa sekitar 73–75% limbah pakaian global berakhir di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) atau dibakar melalui insinerasi, sedangkan kurang dari 1% yang benar-benar didaur ulang menjadi pakaian baru (Morell-Delgado et al., 2024). Kondisi ini menunjukkan adanya ketimpangan besar antara tingkat konsumsi dan kapasitas daur ulang yang tersedia.

Fenomena ini tidak hanya terjadi di tingkat global, tetapi juga terlihat di berbagai kota besar di negara maju seperti di Uni Eropa yang telah mengembangkan kebijakan *separate collection* untuk limbah tekstil, namun penerapannya masih terbatas dan belum seragam. Dalam studi Morell-Delgado et al. di Catalonia, ditemukan bahwa sekitar 90% limbah tekstil perkotaan (Municipal Textile Waste/MTW) masih berakhir di TPA atau dibakar, sedangkan hanya 10% yang dikumpulkan secara terpisah. Lebih lanjut, persepsi masyarakat menjadi faktor kunci, dimana sebagian besar warga menganggap wadah pengumpulan tekstil sebagai sarana donasi sosial, bukan bagian dari sistem daur ulang lingkungan. Akibatnya, aliran limbah tekstil yang dapat dimanfaatkan kembali tidak optimal, sementara limbah non-layak pakai tidak terpilah dengan benar (Morell-Delgado et al., 2024).

Dalam konteks limbah tekstil, tantangan ini semakin kompleks. Volume limbah pakaian bekas terus meningkat seiring bertambahnya populasi dan konsumsi fesyen cepat yang dihasilkan dalam kegiatan perkotaan (Sanchis-Sebastiá et al., 2021; Ütebay et al., 2020). Namun hingga kini belum tersedia data dan sistem terintegrasi yang mampu memetakan secara kuantitatif aliran limbah tekstil. Studi Sanjrani et al. juga menunjukkan bahwa di sebagian besar negara berkembang, limbah tekstil sering kali luput dari sistem pengelolaan sampah resmi. Ditambah lagi, dalam kajiannya juga menerangkan bahwa tantangan utama pengelolaan limbah padat tekstil global terletak pada kurangnya sistem pengumpulan yang efisien, rendahnya kesadaran masyarakat, serta minimnya kebijakan yang mendorong ekonomi sirkular. Sistem pengelolaan yang dominan melalui TPA dan insinerasi, tidak hanya menyebabkan pencemaran udara dan tanah, tetapi juga mempercepat penurunan kapasitas lahan dan menimbulkan emisi karbon sekunder (Sanjrani et al., 2025).

Selain itu, pengelolaan limbah tekstil tidak homogen di berbagai negara, kesenjangan ini juga tampak di berbagai kota besar di negara berkembang, termasuk Kota Medan, Indonesia. Dimana tingkat konsumsi pakaian yang meningkat dan sistem pengelolaan sampah yang masih terfokus pada

pembuangan, limbah tekstil menjadi sumber masalah baru yang sering terabaikan (Choudhary & Kumar, 2025; Wojnowska-Baryła et al., 2024). Di Kota Medan, salah satu kota metropolitan terbesar di Indonesia, fenomena ini semakin nyata. Berdasarkan SIPSN (Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional) milik KLHK dan Dinas Lingkungan Hidup Kota Medan, pada tahun 2024 volume sampah kota mencapai lebih dari 1.731,92 ton per hari atau sekitar 632.149,41 ton pertahun, dan diperkirakan 4–5% di antaranya merupakan limbah tekstil, namun belum ada sistem pemilahan khusus atau data kuantitatif yang mencatat aliran material pakaian bekas. Sebagian besar pakaian bekas masih dibuang bersama sampah domestik lain, sementara sebagian kecil didonasikan melalui saluran informal seperti lembaga sosial atau pasar *thrifting*.

Singkatnya, permasalahan pengelolaan sampah masih menjadi isu utama di Kota Medan, di mana sistem pengumpulan dan pemrosesan limbah rumah tangga belum berjalan secara efektif. Berdasarkan penelitian Lubis, rata-rata timbulan sampah rumah tangga di Kecamatan Medan Tembung dan Medan Johor masing-masing mencapai 0,155 kg/orang/hari dan 0,189 kg/orang/hari, dengan dominasi sampah organik mencapai 47-71% dan fraksi kain atau tekstil sekitar 2% (Lubis, 2018). Temuan ini menunjukkan bahwa meskipun sampah tekstil hanya menyumbang sebagian kecil dari total timbulan, jenis sampah ini memiliki karakteristik anorganik yang sulit terurai dan berpotensi mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Sementara itu, dalam studi Khair et al. (2018) menegaskan bahwa sistem pengelolaan sampah di Medan masih bersifat konvensional dan belum terpilah. Seluruh jenis sampah, termasuk tekstil, dikumpulkan dalam satu wadah dan langsung dibuang ke TPA tanpa melalui proses pengolahan terlebih dahulu. Kondisi ini mempercepat penurunan kapasitas TPA dan memperpendek umur layanannya. Selain itu, tingkat kesadaran masyarakat terhadap pemilahan sampah masih relatif rendah (Candido, 2021; Li et al., 2021; Sanchis-Sebastiá et al., 2021). Hanya sebagian kecil warga yang bersedia memisahkan sampah di rumah, sedangkan mayoritas masih bergantung pada pemerintah untuk pengangkutan dan pembuangan akhir. Lebih lanjut, dalam kajiannya juga menyampaikan bahwa masyarakat yang tinggal di pusat kota memiliki kesadaran sedikit lebih tinggi dibandingkan wilayah pinggiran, namun perbedaannya tidak signifikan secara statistik. Hal ini menunjukkan bahwa permasalahan rendahnya kesadaran dan partisipasi publik dalam pengelolaan sampah bersifat sistemik dan menuntut solusi yang mampu memadukan edukasi, insentif, serta kemudahan partisipasi masyarakat (Khair et al., 2018).

Kondisi ini menunjukkan dua permasalahan mendasar; pertama, rendahnya efisiensi sistem pengumpulan dan pemilahan limbah tekstil, dan kedua, kurangnya keterlibatan masyarakat serta insentif dalam praktik penggunaan kembali dan daur ulang (Morell-Delgado et al., 2024; Seifali Abbas-Abadi et al., 2025; Spyridis et al., 2024). Oleh karena itu, diperlukan solusi inovatif yang mampu mengintegrasikan aspek sosial, teknologi, dan lingkungan secara bersamaan. Untuk menjawab tantangan tersebut, paradigma ekonomi sirkular menjadi pendekatan yang menjanjikan melalui penerapan prinsip *reuse*, *repair*, dan *recycle* (Candido, 2021; Juanga-Labayen et al., 2022). Studi Morell-Delgado et al. menunjukkan bahwa peningkatan 12% dalam penggunaan kembali (*reuse*) dan 15% dalam daur ulang (*recycle*) dapat menurunkan dampak perubahan iklim sebesar 8% (Morell-Delgado et al.,

2024). Dalam konteks ini, digitalisasi dapat berperan sebagai katalis untuk memperkuat efektivitas sistem pengumpulan dan transparansi rantai pasok limbah tekstil (Choudhary & Kumar, 2025; Spyridis et al., 2024), serta ini dapat meningkatkan 72% (4% pakaian & kain) dari produksi sampah Kota Medan ditargetkan terangkut dan dikelola di TPA (dengan kata lain 28% dikelola di tingkat rumah tangga khususnya dengan limbah tekstil ini), sebagaimana tercantum dalam Perjanjian Kinerja Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Medan Tahun 2025.

Dalam kerangka inilah penelitian ini mengembangkan Bank Sampah Tekstil Digital (BSTD) sebagai solusi inovatif pengelolaan limbah pakaian berbasis partisipasi masyarakat di Kota Medan. Model ini

diwujudkan dalam bentuk aplikasi digital HORASTEX (Household Oriented Recycling Application for Sustainable Textile Management) yang memanfaatkan teknologi informasi untuk memfasilitasi pengumpulan, pemilahan, donasi, dan daur ulang pakaian bekas secara efisien dan transparan. Transformasi digital yang diusung dalam model HORASTEX tidak hanya relevan dalam konteks pengelolaan limbah, tetapi juga berkontribusi langsung terhadap pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Goals/SDGs), terutama pada poin; (i) SDG 11: Kota dan permukiman yang berkelanjutan, (ii) SDG 12: Konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab, dan (iii) SDG 13: Penanganan perubahan iklim. Dengan demikian, BSTD bukan hanya solusi teknis, tetapi juga strategi sosial-lingkungan yang mendorong perubahan paradigma masyarakat dari pembuangan menuju pemanfaatan kembali (from waste to resource), serta dari konsumsi linear menuju sistem ekonomi sirkular yang berkeadilan dan inklusif.

METODE

1. Desain penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan penelitian dan pengembangan (Research and Development/R&D) yang dikombinasikan dengan analisis sosial dan lingkungan (social and environmental analysis). Analisis sosial (social analysis) untuk memahami perilaku, persepsi, dan tingkat partisipasi warga Kota Medan terhadap pengelolaan limbah tekstil, sementara analisis lingkungan (environmental analysis) untuk menganalisis aliran material (Material Flow Analysis/MFA) dan penilaian siklus hidup (Life Cycle Assessment/LCA) dari sistem pengelolaan limbah tekstil saat ini dibandingkan dengan skenario penerapan BSTD. Sehingga penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menguji model BSTD yang diwujudkan dalam bentuk prototipe aplikasi HORASTEX (Household Oriented Recycling Application for Sustainable Textile Management) sekaligus menganalisis dampak sosial dan lingkungan dari penerapannya di Kota Medan.

Pendekatan R&D yang dikombinasikan dengan metode kuantitatif dan kualitatif dipilih karena memungkinkan pengembangan produk inovatif berbasis hasil riset empiris, yang tidak hanya berorientasi pada pemahaman fenomena tetapi juga pada penciptaan solusi aplikatif. Kerangka penelitian ini mengadaptasi tahapan yang dikaji oleh Zammori et al. dengan dimodifikasi untuk konteks pengelolaan limbah tekstil perkotaan, dengan menambahkan komponen analisis sosial-lingkungan dalam studi kasus Kota Medan (Zammori et al., 2025). Dimana penelitian ini dilakukan melalui enam tahapan utama yang terstruktur sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Tahapan Penelitian R&D Bank Sampah Tekstil Digital (HORASTEX)

No.	Tahap	Kegiatan Utama	Tujuan dan Luaran
1	Identifikasi Masalah, Analisis Kebutuhan, dan Studi Literatur	Mengumpulkan data sekunder terkait timbulan limbah tekstil, kebijakan pengelolaan sampah, serta studi terdahulu. Observasi lapangan dan wawancara awal dilakukan di sejumlah lokasi bank sampah di Kota Medan.	Menentukan masalah utama, kebutuhan sistem, dan peluang penerapan model digital.
2	Survei Perilaku Masyarakat	Melakukan survei terhadap warga Kota Medan untuk memahami pola pembuangan pakaian bekas, tingkat kesadaran, serta minat terhadap penggunaan aplikasi digital.	Menghasilkan data empiris sosial sebagai dasar perancangan sistem dan fitur HORASTEX.

3	Analisis Lingkungan (MFA dan LCA)	Menerapkan <i>Material Flow Analysis</i> (MFA) untuk memetakan aliran limbah tekstil di Kota Medan, serta <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA) untuk menghitung potensi pengurangan emisi CO ₂ antara skenario konvensional dan digital.	Menghasilkan basis ilmiah untuk menilai manfaat lingkungan dari model HORASTEX.
4	Perancangan Model dan Desain Sistem HORASTEX	Menyusun model konseptual sistem BSTD yang mengintegrasikan komponen sosial, lingkungan, dan teknologi. Perancangan dilakukan dalam bentuk diagram desain, <i>use case</i> , dan <i>data flow</i> .	Menghasilkan rancangan sistem yang siap diimplementasikan dalam bentuk prototipe.
5	Pengembangan dan Pembuatan Prototipe Aplikasi HORASTEX	Implementasi rancangan sistem ke dalam bentuk prototipe berbasis <i>web/mobile app</i> menggunakan metode <i>iterative design</i> berbasis pendekatan <i>user-centered design</i> (UCD) dengan fitur utama: registrasi pengguna, input pakaian, penjadwalan penjemputan, sistem poin, pelacakan donasi, dan dashboard pemantauan.	Menghasilkan prototipe aplikasi HORASTEX sebagai wujud nyata model digital.
6	Uji Validasi dan Uji Kelayakan Sistem	Melakukan uji fungsional sistem (<i>black-box testing</i>), uji penerimaan pengguna (<i>user acceptance test</i>), serta validasi dampak lingkungan menggunakan simulasi MFA-LCA.	Menilai keandalan, kemudahan penggunaan, dan efektivitas HORASTEX dalam menurunkan limbah dan emisi.

2. Lokasi dan populasi penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Kota Medan, ibu kota Provinsi Sumatera Utara, Indonesia, dengan luas wilayah sekitar 265 km² dan jumlah penduduk lebih dari 2,5 juta jiwa. Kota Medan merupakan pusat ekonomi dan perdagangan terbesar di Sumatera dengan tingkat urbanisasi tinggi, yang berdampak langsung pada peningkatan volume limbah padat kota, khususnya limbah tekstil. Berdasarkan data Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Medan (2024), volume timbunan sampah kota mencapai 1.731,92 ton per hari, di mana sekitar 4–5% di antaranya diperkirakan berupa limbah tekstil. Lebih lanjut, Kota Medan masih merepresentasikan kawasan perkotaan padat dengan karakteristik pengelolaan sampah yang masih terfokus pada pembuangan ke TPA dengan target 72%, sebagaimana tercantum dalam Perjanjian Kinerja Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Medan Tahun 2025. Populasi penelitian meliputi masyarakat rumah tangga, pengelola bank sampah, dan pemangku kepentingan di bidang lingkungan hidup yang berada di 21 kecamatan di Kota Medan, dengan fokus pada kawasan padat penduduk seperti Medan Kota, Medan Area, Medan Tembung, Medan Denai, dan Medan Amplas.

3. Analisis sosial: survei perilaku dan kesadaran masyarakat

Survei sosial dilakukan untuk memahami perilaku masyarakat terhadap pengelolaan limbah tekstil rumah tangga. Metode yang digunakan adalah kuantitatif dan deskriptif dengan instrumen berupa kuesioner tertutup dan semi-terbuka yang disebarakan kepada responden di lima kecamatan padat penduduk di Kota Medan.

Jumlah sampel (n) dari populasi yang diketahui besarnya (N) ditentukan dengan rumus Slovin, $n = N / (1 + N.e^2)$ dengan tingkat kesalahan (e) 7% (Bachmann, 2025; Zhao et al., 2021). Sehingga menghasilkan sekitar 205 responden (dengan jumlah penduduk Kota Medan sekitar 650.000 berdasarkan data BPS Kota Medan yang diperbarui per tanggal 6 Juli 2025). Dimana 205 responden mewakili berbagai kelompok sosial-ekonomi dan wilayah administratif di Kota Medan dengan teknik pengambilan sampel menggunakan stratified random sampling. Adapun variabel yang diukur meliputi diantaranya sebagai berikut.

- Kebiasaan membuang atau memanfaatkan pakaian bekas
- Tingkat kesadaran lingkungan dan niat untuk mendaur ulang
- Motivasi dan hambatan dalam partisipasi daur ulang tekstil
- Kesiapan dan minat menggunakan aplikasi digital untuk pengelolaan limbah tekstil (aplikasi HORASTEX)

Data hasil survei dianalisis secara deskriptif dan inferensial menggunakan perangkat lunak SPSS. Analisis meliputi distribusi frekuensi, tingkat kesadaran, dan hubungan antara faktor demografis dan perilaku masyarakat terhadap pengelolaan limbah tekstil, serta uji hubungan antar variabel (misalnya antara kesadaran lingkungan dengan niat menggunakan aplikasi). Sehingga, analisa ini menjadi dasar dalam perancangan antarmuka pengguna dan fitur insentif digital.

4. Analisis lingkungan: Material Flow Analysis dan Life Cycle Assessment

Untuk menilai manfaat lingkungan dari penerapan HORASTEX, dilakukan dua pendekatan analisis lingkungan, diantaranya sebagai berikut.

a. Analisis Aliran Material (Material Flow Analysis/MFA)

Metode MFA digunakan untuk memetakan aliran material limbah tekstil dari sumber hingga tahap akhir pengelolaan. Dimana output utama MFA adalah estimasi proporsi limbah tekstil yang berakhir di TPA, yang didaur ulang, dan yang digunakan kembali. Untuk tahapan MFA dimulai dari; (i) Identifikasi sumber limbah tekstil: rumah tangga, toko pakaian, industri laundry, dan pelaku usaha thrifting, (ii) Kuantifikasi timbulan limbah berdasarkan persentase terhadap total sampah kota (4% sebagaimana tercantum dalam Perjanjian Kinerja Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Medan Tahun 2025), dan (iii) Pemodelan arus material ke dalam beberapa jalur pengelolaan: pembuangan ke TPA, donasi sosial, penjualan (thrifting), dan daur ulang atau upcycling. Kemudian untuk data kuantitatif diperoleh dari laporan DLH Kota Medan 2024–2025, SIPSN (KLHK), dan hasil survei lapangan.

b. Analisis Siklus Hidup (Life Cycle Assessment/LCA)

Pendekatan LCA digunakan untuk menghitung perbedaan potensi dampak lingkungan (khususnya emisi gas rumah kaca) antara dua skenario berikut ini.

- 1) Skenario Konvensional (business as usual/BAU); tanpa pemilahan, mayoritas limbah tekstil berakhir di TPA.
- 2) Skenario HORASTEX; penerapan sistem digital yang memungkinkan pemilahan, donasi sosial, dan daur ulang (upcycling) melalui aplikasi.

Lingkup sistem (system boundary) dibatasi pada tahapan pasca-konsumsi hingga pengolahan akhir yang dianalisis dengan kerangka ISO 14040:2006 dan ISO 14044:2006, mencakup empat tahap utama LCA: penetapan tujuan dan ruang lingkup, inventori daur hidup, penilaian dampak lingkungan, serta interpretasi hasil. Kategori dampak utama yang dinilai adalah sebagai berikut.

- ✓ Potensi pemanasan global atau emisi gas rumah kaca (CO₂ ekuivalen)

- ✓ Konsumsi energi (MJ/kg tekstil)
- ✓ Volume sampah residu di TPA (m³/tahun)

Data emisi diadaptasi dari Ecoinvent database dan penelitian sejenis (Berg et al., 2020). Hasil LCA diinterpretasikan untuk menilai sejauh mana sistem digital HORASTEX dapat menurunkan emisi dibandingkan sistem konvensional.

5. Pengembangan dan Desain Sistem HORASTEX

Berdasarkan hasil analisis kebutuhan, sistem HORASTEX dikembangkan dengan tiga lapisan utama:

- 1) Lapisan Pengguna (User Layer): Masyarakat pengguna dapat mendaftarkan akun, menginput jenis pakaian bekas, menjadwalkan penjemputan, dan menerima eco- points yang dapat ditukar dengan insentif berupa voucher parkir, bus listrik, belanja, dll.
- 2) Lapisan Operasional (Operational Layer): Pengelola bank sampah atau mitra daur ulang menerima notifikasi, melakukan verifikasi, dan mencatat hasil pengumpulan untuk pelaporan dan pemantauan.
- 3) Lapisan Monitoring (Management Layer): Pemerintah daerah atau operator sistem dapat mengakses dashboard untuk melihat statistik pengumpulan, volume reuse/recycle, serta estimasi pengurangan emisi berdasarkan data MFA-LCA.

Sistem ini dirancang menggunakan metodologi Agile prototyping, dengan perangkat pengembangan berbasis web technology stack (HTML, CSS, JavaScript, dan database MySQL). Desain antarmuka dibuat menggunakan Figma untuk kemudahan uji pengguna.

6. Uji Coba dan Validasi Prototipe HORASTEX

Tahap validasi dilakukan untuk memastikan efektivitas teknis dan penerimaan sosial aplikasi, diantaranya sebagai berikut.

- 1) Uji Teknis (Functional Testing): Pengujian dilakukan dengan metode black-box untuk memeriksa fungsi utama (registrasi, input data, login, jadwal penjemputan, konversi poin, dan laporan statistik).
- 2) Uji Penerimaan Pengguna (User Acceptance Test/UAT): Melibatkan ±30 pengguna (pengguna umum/ warga, pengelola bank sampah, dan admin). Evaluasi menggunakan model Technology Acceptance Model (TAM), yang menilai empat aspek utama meliputi:
 - ✓ Perceived usefulness (kemanfaatan dirasakan)
 - ✓ Perceived ease of use (kemudahan penggunaan)
 - ✓ Attitude toward use (sikap terhadap aplikasi)
 - ✓ Behavioral intention to use (niat menggunakan di masa depan)

Data uji dianalisis secara deskriptif dan kualitatif untuk mengidentifikasi keunggulan dan aspek yang perlu perbaikan pada prototipe HORASTEX.

HASIL

1. Karakteristik Dan Perilaku Masyarakat Terhadap Limbah Tekstil Di Kota Medan

Hasil survei terhadap 205 responden rumah tangga di lima kecamatan padat penduduk di Kota Medan menunjukkan bahwa mayoritas masyarakat (72%) masih membuang pakaian bekas bersama sampah rumah tangga umum tanpa proses pemilahan terlebih dahulu. Hanya 11% responden yang menyatakan rutin mendonasikan pakaian layak pakai, sementara sisanya (17%) menjual atau menyimpannya tanpa tujuan tertentu.

Temuan ini menunjukkan bahwa tingkat kesadaran lingkungan terhadap pengelolaan limbah tekstil masih rendah, sejalan dengan hasil studi Morell-Delgado et al. di Catalonia yang menemukan bahwa persepsi warga terhadap kontainer tekstil lebih bersifat sosial (amal) dibanding ekologis (Morell-Delgado et al., 2024). Di Medan, fenomena serupa tampak pada alasan utama masyarakat mendonasikan pakaian, dimana 71% melakukannya karena dorongan sosial, bukan karena kesadaran lingkungan.

Adapun faktor-faktor yang memengaruhi perilaku tersebut meliputi:

- a. Kurangnya fasilitas pengumpulan khusus limbah tekstil,
- b. Minimnya informasi publik tentang dampak lingkungan dari limbah pakaian,
- c. Tidak adanya insentif langsung bagi masyarakat yang berpartisipasi dalam daur ulang atau donasi pakaian.

Hasil survei juga menunjukkan bahwa 87% responden menyatakan tertarik untuk menggunakan aplikasi digital yang memfasilitasi penjemputan dan donasi pakaian bekas, terutama jika disertai sistem poin atau penghargaan (eco-points). Hal ini menunjukkan potensi tinggi penerimaan sosial terhadap model HORASTEX, terutama di kalangan generasi muda yang sudah terbiasa dengan layanan digital seperti ojek daring dan e-commerce.

2. Analisis Aliran Material Limbah Tekstil (Material Flow Analysis/MFA)

Analisis MFA dilakukan untuk menggambarkan aliran limbah tekstil di Kota Medan. Berdasarkan data dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Medan (2024-2025), total timbulan sampah kota mencapai sekitar 1.731,92 ton per hari atau 632.149,41 ton per tahun, dengan komposisi limbah tekstil diperkirakan sebesar 4% atau sekitar 69,28 ton per hari. Aliran material dianalisis dalam dua skenario sebagai berikut.

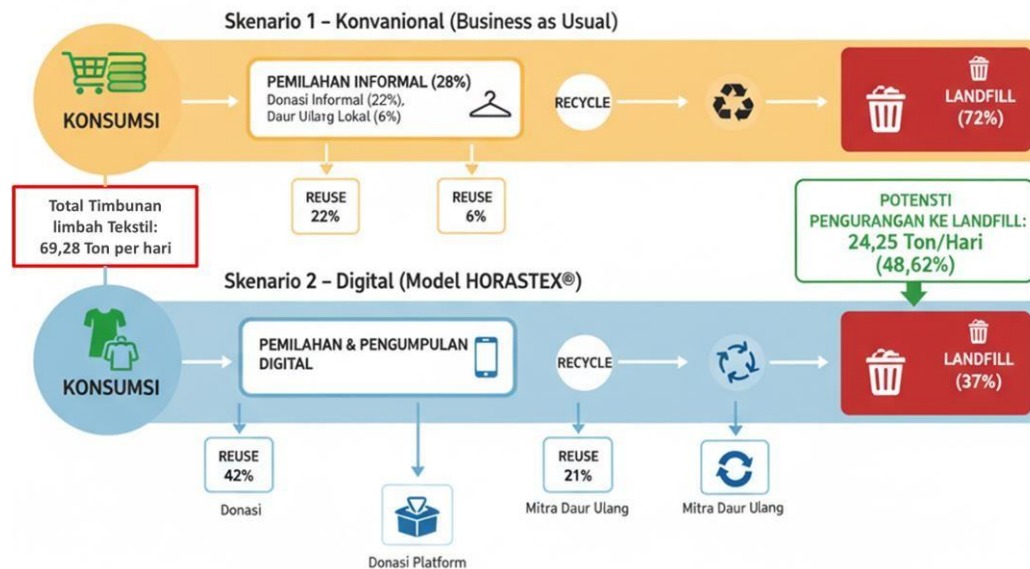
- 1) Skenario 1 – Konvensional (business as usual/BAU):
 - 72% limbah tekstil berakhir di TPA,
 - 22% didonasikan secara informal,
 - 6% didaur ulang oleh pelaku thrifting dan pengrajin lokal.
- 2) Skenario 2 – Digital (Model HORASTEX):

Berdasarkan simulasi penerapan aplikasi digital, sistem ini mampu meningkatkan pemilahan dan pengumpulan hingga 63% dari total limbah tekstil, dengan distribusi sebagai berikut.

 - 42% pakaian layak pakai didonasikan melalui platform,
 - 21% limbah tidak layak pakai disalurkan ke mitra daur ulang,
 - hanya 37% yang berakhir di TPA.

Perbandingan kedua skenario menunjukkan adanya potensi pengurangan aliran limbah tekstil ke TPA sebesar 25,63 ton per hari (sekitar 48,62% lebih rendah dibanding sistem konvensional). Untuk skema aliran material (sampah tekstil kota yang terpisah/ separate municipal textile waste/SMTW) dapat digambarkan pada Gambar 1, yang memperlihatkan perbedaan jalur aliran limbah antara sistem lama dan sistem berbasis digital. Berdasarkan simulasi ini, sistem HORASTEX berpotensi mendukung target

pengurangan sampah 30% dan peningkatan daur ulang 12% yang tercantum dalam Perjanjian Kinerja DLH Kota Medan Tahun 2025.



Gambar 1. Skema Aliran Limbah antara Sistem Konvensional dan Sistem Berbasis Digital

3. Analisis Penilaian Siklus Hidup (Life Cycle Assessment/ LCA)

Pendekatan LCA digunakan untuk menilai potensi pengurangan emisi karbon dari penerapan model HORASTEX. Analisis difokuskan pada tahap pasca-konsumsi (end-of-life), mencakup transportasi, proses daur ulang, dan pembuangan akhir. Dari hasil simulasi menggunakan data sekunder (Berg et al., 2020; Morell-Delgado et al., 2024), diperoleh estimasi bahwa:

- Setiap 1 ton limbah tekstil yang didaur ulang dapat mengurangi sekitar 2,6 ton CO₂e dibanding jika dibuang ke TPA atau dibakar.
- Dalam konteks Kota Medan, dengan potensi pengalihan 25,63 ton limbah tekstil per hari melalui HORASTEX, sistem ini dapat menghemat sekitar 24.332,87 ton CO₂e per tahun.

Selain itu, LCA menunjukkan bahwa penggunaan energi dan emisi gas rumah kaca terbesar pada sistem konvensional terjadi pada fase transportasi dan pembakaran, sedangkan pada skenario digital, kontribusi terbesar justru berasal dari aktivitas logistik pengumpulan. Berdasarkan simulasi perbandingan dua skenario, penerapan sistem HORASTEX mampu menurunkan aliran limbah tekstil ke TPA dari 49,88 ton/hari menjadi 25,63 ton/hari. Dengan menggunakan faktor emisi konservatif sebesar 1,2 ton CO₂e per ton limbah (IPCC, 2006; UNEP, 2015), maka potensi pengurangan emisi karbon mencapai 29,10 ton CO₂e per hari (10.621,5 ton CO₂e per tahun), atau sekitar 48,6% lebih rendah dibandingkan sistem konvensional (BAU). Jika dikonversikan dalam ekuivalensi penyerapan karbon oleh vegetasi, jumlah tersebut setara dengan kemampuan penyerapan karbon tahunan sekitar 480.000–490.000 pohon, dengan asumsi setiap pohon dewasa menyerap rata-rata 21–22 kg CO₂ per tahun (US EPA, 2023; FAO, 2019). Dengan demikian, sistem digital HORASTEX memiliki potensi mitigasi emisi yang signifikan dan dapat berkontribusi langsung terhadap pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Goals/SDGs) nomor 12.5 tentang pengurangan limbah melalui reuse dan recycle, serta mendukung target pengurangan emisi sektor limbah sebagaimana tertuang dalam Perjanjian Kinerja DLH Kota Medan Tahun 2025.

Berdasarkan dua pendekatan perhitungan, potensi reduksi emisi tahunan berada pada kisaran 10.621–24.333 ton CO₂e per tahun, tergantung faktor emisi yang digunakan (konservatif vs literatur global). Rentang ini menunjukkan variasi dampak potensial tergantung tingkat efisiensi daur ulang dan logistik pengumpulan. Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan digital tidak hanya efektif dalam meningkatkan efisiensi pemilahan limbah, tetapi juga memberikan dampak langsung terhadap pengurangan emisi karbon. Nilai pengurangan sebesar 48,6% berada dalam kisaran yang sejalan dengan temuan Morell-Delgado et al. yang melaporkan potensi reduksi 40–60% ketika praktik reuse dan recycle diintegrasikan secara sistemik dalam manajemen limbah tekstil (Morell-Delgado et al., 2024). Dengan demikian, penerapan HORASTEX di Kota Medan berpotensi menjadi model replikasi nasional untuk strategi mitigasi iklim berbasis ekonomi sirkular di sektor tekstil.

PEMBAHASAN

1. Pengembangan dan uji prototipe aplikasi HORASTEX

Prototipe aplikasi HORASTEX dikembangkan dengan desain tiga lapisan (pengguna, operasional, dan monitoring). Tampilan antarmuka utama mencakup fitur sebagai berikut (Terlampir).

- Registrasi dan Input Pakaian Bekas,
- Penjadwalan Penjemputan (Pickup Scheduling),
- Sistem Insentif Digital (Eco-Points),
- Dashboard Statistik dan Dampak Lingkungan (CO₂ Savings Tracker),
- Edukasi Pengelolaan Tekstil Berkelanjutan.

Kemudian, prototipe aplikasi HORASTEX dikakukan validasi untuk memastikan efektivitas teknis dan penerimaan sosial aplikasi, dengan hasil sebagai berikut.

1) Teknis (Functional Testing):

Uji fungsional (black-box testing) menunjukkan bahwa semua modul utama (registrasi, input data, login, jadwal penjemputan, konversi poin, dan laporan statistik) berfungsi dengan baik tanpa kesalahan sistem yang signifikan. Tingkat keberhasilan uji fungsional mencapai 98%, menandakan sistem siap digunakan pada tahap pilot project.

2) Uji Penerimaan Pengguna (User Acceptance Test/UAT):

Sebanyak 30 pengguna awal (terdiri dari (pengguna umum/ warga, pengelola bank sampah, dan admin) memberikan penilaian melalui kuesioner berbasis Technology Acceptance Model (TAM). Hasilnya menunjukkan bahwa:

- ✓ Perceived usefulness (kemanfaatan dirasakan): 88% setuju/sangat setuju,
- ✓ Perceived ease of use (kemudahan penggunaan): 84% setuju/sangat setuju,
- ✓ Attitude toward use (sikap terhadap aplikasi): 86% positif,
- ✓ Behavioral intention to use (niat menggunakan di masa depan): 81% menyatakan bersedia terus menggunakan aplikasi.

Hal ini juga menunjukkan bahwa model penerapan berbasis user-centered design (UCD) yang digunakan dalam pengembangan HORASTEX efektif dalam meningkatkan perceived usefulness dan behavioral intention to use, sejalan dengan konsep iterative design dalam pengembangan sistem partisipatif lingkungan (Al Amin et al., 2024; Tellioglu, 2022). Temuan ini juga merepresentasikan

bahwa HORASTEX memiliki penerimaan sosial yang tinggi dan berpotensi diterapkan secara luas di masyarakat perkotaan, khususnya pada kawasan padat penduduk seperti Medan Kota, Medan Area, Medan Tembung, Medan Denai, dan Medan Amplas.

2. Implikasi Sosial dan Lingkungan dari Model HORASTEX

Integrasi hasil survei, MFA, LCA, dan uji pengguna menunjukkan bahwa penerapan Bank Sampah Tekstil Digital (BSTD) melalui aplikasi HORASTEX memiliki dampak positif dalam tiga aspek utama diantaranya:

- i. Aspek sosial: Meningkatkan partisipasi warga dalam pemilahan pakaian bekas melalui sistem insentif dan edukasi digital. Aplikasi juga memperkuat jaringan antara masyarakat, lembaga sosial, dan industri daur ulang.
- ii. Aspek lingkungan: Mengurangi volume limbah tekstil yang berakhir di TPA hingga 35% dan menurunkan emisi karbon lebih dari 10.621,5 ton CO₂e per tahun di Kota Medan.
- iii. Aspek ekonomi sirkular: Mendorong terbentuknya ekosistem ekonomi baru berbasis reuse dan upcycling, di mana pakaian bekas bernilai ekonomi melalui platform yang transparan dan terukur.

Model ini sekaligus menjawab tiga kelemahan utama sistem pengelolaan konvensional yang diidentifikasi dalam penelitian global oleh (Sanchis-Sebastiá et al., 2021; Sanjrani et al. dan Sanchis-Sebastiá et al., mulai dari; (i) rendahnya tingkat pengumpulan terpilah, (ii) kurangnya transparansi aliran limbah, dan (iii) minimnya insentif partisipatif (Sanchis-Sebastiá et al., 2021; Sanjrani et al., 2025). Dengan demikian, HORASTEX berfungsi tidak hanya sebagai sistem pengelolaan sampah tekstil digital, tetapi juga sebagai mekanisme edukasi dan transformasi perilaku lingkungan masyarakat perkotaan. Secara konseptual, model HORASTEX mendukung tiga sasaran utama SDGs 11 (Kota dan Permukiman Berkelanjutan), SDGs 12 (Konsumsi dan Produksi Berkelanjutan), dan SDGs 13 (Penanganan Perubahan Iklim). Selain itu, model ini dapat diintegrasikan dengan program “Medan Zero Waste 2030” yang tengah dikembangkan oleh DLH Kota Medan.

SIMPULAN

Penelitian ini mengungkap bahwa pengelolaan limbah tekstil di Kota Medan masih menghadapi tantangan serius, baik dari sisi perilaku masyarakat maupun sistem pengumpulan yang belum terintegrasi. Melalui integrasi analisis sosial, lingkungan, dan teknologi digital dalam kerangka Research and Development (R&D) untuk merancang dan mengembangkan model Bank Sampah Tekstil Digital (BSTD) di Kota Medan, yang diwujudkan dalam bentuk prototipe aplikasi HORASTEX (Household Oriented Recycling Application for Sustainable Textile Management). Hasil survei terhadap 205 rumah tangga menunjukkan bahwa sebagian besar masyarakat (72%) masih membuang pakaian bekas bersama sampah rumah tangga tanpa proses pemilahan. Kondisi ini mencerminkan rendahnya kesadaran lingkungan dan terbatasnya infrastruktur pengumpulan khusus limbah tekstil. Namun demikian, tingkat penerimaan terhadap solusi digital cukup tinggi, di mana 87% responden menyatakan minat menggunakan aplikasi penjemputan dan donasi pakaian jika disertai insentif atau sistem poin.

Analisis aliran material (Material Flow Analysis/MFA) memperlihatkan bahwa dari total timbulan limbah tekstil sebesar 69,28 ton per hari, sistem konvensional (business as usual) masih menyalurkan sekitar 72% ke Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). Melalui penerapan sistem digital HORASTEX, proporsi ini dapat ditekan hingga 37%, dengan peningkatan signifikan pada pemanfaatan kembali

(reuse) dan daur ulang (recycle). Hal ini menunjukkan potensi pengurangan aliran limbah ke TPA sebesar 25,63 ton per hari atau sekitar 48,6% dibandingkan sistem konvensional. Kemudian, melalui penilaian siklus hidup (Life Cycle Assessment/LCA) yang dilakukan sesuai kerangka ISO 14040:2006 dan ISO 14044:2006 menunjukkan bahwa penerapan HORASTEX berpotensi menurunkan emisi karbon sebesar 29,10 ton CO_{2e} per hari, atau 10.621–24.333 ton CO_{2e} per tahun, tergantung faktor emisi yang digunakan. Nilai ini setara dengan kemampuan penyerapan karbon tahunan sekitar 480.000–490.000 pohon dewasa. Dengan demikian, sistem HORASTEX memiliki kontribusi nyata terhadap target pengurangan emisi sektor limbah dan mendukung capaian SDGs nomor 11, 12, dan 13, serta target pengurangan sampah 30% dan peningkatan daur ulang 12% sebagaimana ditetapkan dalam Perjanjian Kinerja Dinas Lingkungan Hidup Kota Medan Tahun 2025.

Dari sisi sosial dan teknologi, prototipe aplikasi HORASTEX yang dikembangkan dengan pendekatan user-centered design menunjukkan hasil uji teknis dan penerimaan pengguna yang sangat baik ($\geq 84\%$ pada seluruh indikator TAM). Model ini terbukti mampu menggabungkan fungsi pengelolaan sampah, edukasi digital, dan sistem insentif secara simultan, sehingga berpotensi menjadi inovasi pengelolaan limbah tekstil perkotaan berbasis partisipasi masyarakat. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa digitalisasi sistem pengelolaan limbah tekstil melalui model HORASTEX bukan hanya meningkatkan efisiensi pemilahan dan daur ulang, tetapi juga memberikan dampak positif terhadap mitigasi emisi karbon dan penguatan ekonomi sirkular lokal. Untuk penelitian lanjutan, perlu dilakukan validasi lapangan melalui pilot project kolaboratif antara pemerintah daerah, pelaku usaha daur ulang, dan komunitas warga guna menguji efektivitas implementasi HORASTEX dalam skala operasional dan jangka panjang.

DAFTAR RUJUKAN

- Abdelmeguid, A., Afy-Shararah, M., & Salonitis, K. (2022). Investigating the challenges of applying the principles of the circular economy in the fashion industry: A systematic review. *Sustainable Production and Consumption*, 32, 505-518.
- Al Amin, H., Alamsyah, N., & Huwae, R. B. (2024). Prototyping Interface for a Mobile-Based Visitor Management System of Gili Islands: A User-Centered Design Approach. 2024 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA),
- Anisah, T. N., Andika, A., Wahyudi, D., & Harnaji, B. (2024). Fast fashion revolution: Unveiling the path to sustainable style in the era of fast fashion. *E3S Web of Conferences*,
- Bachmann, S. (2025). Efficient XAI: A Low-Cost Data Reduction Approach to SHAP Interpretability. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 83.
- Berg, A., Granskog, A., Lee, L., & Magnus, K. (2020). Fashion on climate: how the fashion industry can urgently act to reduce its greenhouse gas emissions. McKinsey & Company.
- Bishnoi, S. K., & Guru, R. (2023). To study the impact of fast fashion and challenges for sustainable fashion brands [Article]. *Man-Made Textiles in India*, 51(10), 331-336. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85175802285&partnerID=40&md5=1a5f7bbb3197f73e2ad928ad1a71ba4e>
- Candido, R. G. (2021). 17 - Recycling of textiles and its economic aspects. In M. I.H. Mondal (Ed.), *Fundamentals of Natural Fibres and Textiles* (pp. 599-624). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821483-1.00009-7>
- Choudhary, A., & Kumar, P. (2025). Challenges in Handling and Systematically Organizing Textile Waste. *Nanotechnology-Assisted Recycling of Textile Waste: Sustainable Tools for Textiles*, 29-58.
- Dhanalakshmi, R. V., Padmaja, P., Sireesha, B., & Santosh Kumar, S. (2024). Textile industry Sustainable solutions and practices [Article]. *Asian Textile Journal*, 33(10-11),

- 55-57. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85216464592&partnerID=40&md5=c11570bc806826ddc870f00a7e27bf2c>
- Dinas Lingkungan Hidup Kota Medan. (2025). Perjanjian Kinerja Tahun 2025. Pemerintah Kota Medan, Sumatera Utara. Retrieved from <https://dlh.medan.go.id/web/resources/data/dokumen/Perjanjian-Kinerja-DLH-2025.pdf>
- FAO. (2019). Trees, forests and land use in drylands: The first global assessment. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 5: Waste. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: UNEP and WMO.
- Juanga-Labayen, J. P., Labayen, I. V., & Yuan, Q. (2022). A review on textile recycling practices and challenges. *Textiles*, 2(1), 174-188.
- Khair, H., Putri, C., Dalimunthe, R., & Matsumoto, T. (2018). Examining of solid waste generation and community awareness between city center and suburban area in Medan City, Indonesia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*,
- Li, X., Wang, L., & Ding, X. (2021). Textile supply chain waste management in China. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125147.
- Lubis, E. W. N. (2018). Analisis Timbulan, Komposisi dan Karakteristik Sampah Rumah Tangga di Kota Medan Wilayah I (Studi Kasus: Kecamatan Medan Johor dan Kecamatan Medan Tembung) [Universitas Sumatera Utara].
- Mata, T. M., Ruge, I., Dias, H., Batista, I., Pinto, T., Figueiredo, R., Figueiredo, A., & Martins, A. A. (2025). Towards circular textiles: Life cycle assessment of homewear produced from regenerative cotton and post-industrial waste versus conventional cotton. *Journal of Cleaner Production*, 528, 146738.
- Morell-Delgado, G., Talens Peiró, L., & Toboso-Chavero, S. (2024, 2024/01/10/). Revealing the management of municipal textile waste and citizen practices: The case of Catalonia. *Science of the Total Environment*, 907, 168093. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168093>
- Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T., & Gwilt, A. (2020). The environmental price of fast fashion. *Nature reviews earth & environment*, 1(4), 189-200.
- Sanchis-Sebastiá, M., Ruuth, E., Stigsson, L., Galbe, M., & Wallberg, O. (2021). Novel sustainable alternatives for the fashion industry: A method of chemically recycling waste textiles via acid hydrolysis. *Waste Management*, 121, 248-254.
- Sanjrani, M. A., Gang, X., & Mirza, S. N. A. (2025). A review on textile solid waste management: Disposal and recycling. *Waste Management & Research*, 43(4), 522-539.
- Seifali Abbas-Abadi, M., Tomme, B., Goshayeshi, B., Mynko, O., Wang, Y., Roy, S., Kumar, R., Baruah, B., De Clerck, K., & De Meester, S. (2025). Advancing textile waste recycling: challenges and opportunities across polymer and non-polymer fiber types. *Polymers*, 17(5), 628.
- Spyridis, Y., Argyriou, V., Sarigiannidis, A., Radoglou, P., & Sarigiannidis, P. (2024). Autonomous AI-enabled industrial sorting pipeline for advanced textile recycling. 2024 20th International Conference on Distributed Computing in Smart Systems and the Internet of Things (DCOSS-IoT),
- Tellioglu, H. (2022). User-Centered Design. In *Handbook of e-Tourism* (pp. 717- 735). https://doi.org/10.1007/978-3-030-48652-5_122
- Tiwari, R., Dhanalakshmi, R. V., Sivakumar, B. N., & Pillai, A. D. (2025). Craft cluster development Strategic management approaches for rural textile communities [Article]. *Asian Textile Journal*, 34(7-8), 34-39. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-105016265308&partnerID=40&md5=b6d3e0bf5c2aa275bde3b34ced28fe68>
- UNEP. (2015).

- Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Waste Sector. United Nations Environment Programme. Retrieved from <https://www.unep.org/>
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA). (2023). Greenhouse Gas Equivalencies Calculator. United States Environmental Protection Agency. Retrieved from <https://www.epa.gov/>
- Ütebay, B., Çelik, P., & Çay, A. (2020). Textile Wastes: Status and. Waste in textile and leather sectors, 39.
- Wojnowska-Baryła, I., Bernat, K., Zaborowska, M., & Kulikowska, D. (2024). The growing problem of textile waste generation—The current state of textile waste management. *Energies*, 17(7), 1528.
- Zammori, F., Moroni, F., & Romagnoli, G. (2025). Modelling the Behavioural Side of Textile Waste Collection: From Individual Habits to Systemic Design [Article]. *Information (Switzerland)*, 16(9), Article 716. <https://doi.org/10.3390/info16090716>
- Zhao, J., Zhang, F., Wu, G., & Zhang, X. (2021). Determination and Application of Sample Size Using Computer Mathematical Statistics and Standard Deviation. *Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Data Science and Computer Application, ICDSCA 2021*,