



DOI: <https://doi.org/10.38035/jsmd.v4i1>
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pemodelan Pengembangan Pusat Pengelolaan Limbah Terjadwal

Herdy¹, Koespiadi², Florianus Rooslan Edy Santosa³, Adi Prawito⁴, Wateno Oetomo⁵

¹Magister Teknik Sipil, Universitas Narotama, Surabaya herdyst@gmail.com

²Magister Teknik Sipil, Universitas Narotama, Surabaya koespiadi65@gmail.com

³Magister Teknik Sipil, Universitas Narotama, Surabaya rooslan.edy@gmail.com

⁴Magister Teknik Sipil, Universitas Narotama, Surabaya herdyst25@gmail.com

⁵Magister Teknik Sipil, Universitas Narotama, Surabaya herdy_herdy@yahoo.com

Corresponding Author: herdyst@gmail.com¹

Abstract: *Scheduled waste management is a critical component of environmental sustainability and public health protection, particularly in industries that generate hazardous waste requiring strict management systems. Verantis Pte Ltd, as a company engaged in environmental protection, faces various challenges in developing an effective waste management center that complies with regulatory standards. This study develops a scheduled waste management model using Structural Equation Modeling (SEM) with the SmartPLS 4 approach to examine the relationships among key factors contributing to the effectiveness of waste management. Data were collected through a mixed-method approach, combining secondary sources such as government regulations, industry reports, and previous studies, with primary data obtained from surveys involving stakeholders at Verantis Pte Ltd who are directly engaged in the waste management process. The findings indicate that regulatory factors, technology, and risk management have a significant influence on the effectiveness of scheduled waste management.*

Keywords: *Scheduled Waste Management, SmartPLS 4, Environmental Protection, Structural Equation Modeling.*

Abstrak: Pengelolaan limbah terjadwal merupakan bagian penting dalam upaya menjaga keberlanjutan lingkungan dan kesehatan masyarakat, terutama dalam konteks industri yang menghasilkan limbah berbahaya yang memerlukan sistem pengelolaan yang ketat. Verantis Pte Ltd, sebagai perusahaan yang bergerak di bidang perlindungan lingkungan, menghadapi berbagai tantangan dalam mengembangkan pusat pengelolaan limbah yang efektif dan sesuai dengan standar regulasi. Dalam penelitian ini, dikembangkan sebuah model pengelolaan limbah terjadwal menggunakan pendekatan Structural Equation Modeling (SEM) berbasis SmartPLS 4 untuk mengeksplorasi hubungan antara faktor-faktor utama yang berkontribusi terhadap efektivitas pengelolaan limbah. Data dikumpulkan melalui metode kombinasi, yaitu sumber sekunder yang mencakup regulasi pemerintah, laporan industri, serta studi terdahulu, serta data primer yang diperoleh dari survei terhadap pemangku kepentingan di Verantis Pte Ltd yang terlibat langsung dalam proses pengelolaan limbah. Hasil penelitian menunjukkan

bahwa faktor regulasi, teknologi, dan manajemen risiko memiliki pengaruh signifikan terhadap efektivitas pengelolaan limbah terjadwal.

Kata Kunci: Pengelolaan Limbah Terjadwal, SmartPLS 4, Perlindungan Lingkungan, *Structural Equation Modeling*.

PENDAHULUAN

Perkembangan industri yang pesat dalam beberapa dekade terakhir telah membawa dampak besar terhadap peningkatan produksi limbah, baik yang bersifat domestik maupun industri (Yang *et al.*, 2021; Shah *et al.*, 2023). Pengelolaan limbah menjadi salah satu aspek penting dalam keberlanjutan industri, terutama bagi perusahaan yang bergerak di sektor lingkungan. Limbah yang dihasilkan oleh industri dapat memiliki dampak negatif yang signifikan terhadap lingkungan dan kesehatan manusia jika tidak dikelola dengan baik (Jain, *et al.*, 2023). Salah satu kategori limbah yang menjadi perhatian utama adalah limbah terjadwal, yaitu limbah yang memiliki sifat beracun, mudah terbakar, korosif, atau reaktif, sehingga memerlukan metode pengelolaan khusus. Limbah terjadwal menjadi perhatian utama dalam pengelolaan lingkungan karena sifatnya yang dapat menyebabkan pencemaran lingkungan serta membahayakan kesehatan manusia jika tidak ditangani dengan baik (Artika H. *et al.*, 2019). Pengelolaan limbah terjadwal menjadi semakin kompleks seiring dengan meningkatnya jumlah produksi industri dan peraturan yang semakin ketat dari pemerintah serta organisasi lingkungan global.

Verantis Pte Ltd merupakan salah satu perusahaan yang bergerak di bidang perlindungan lingkungan. Perusahaan ini memiliki tanggung jawab untuk memastikan bahwa proses pengelolaan limbah terjadwal dilakukan dengan metode yang aman, efisien, dan sesuai dengan regulasi yang berlaku. Perusahaan ini berfokus pada solusi pengelolaan lingkungan yang mencakup sistem kontrol polusi udara, pengolahan limbah cair, serta sistem daur ulang limbah industri. Dalam praktiknya, pengelolaan limbah menghadapi berbagai tantangan, termasuk kompleksitas regulasi, keterbatasan teknologi, serta risiko yang berkaitan dengan dampak lingkungan. Dengan meningkatnya tekanan dari regulator dan pemangku kepentingan lainnya, Verantis Pte Ltd perlu mengembangkan model pengelolaan limbah terjadwal yang lebih efisien dan efektif untuk memastikan kepatuhan terhadap regulasi, meminimalkan dampak lingkungan, serta meningkatkan efisiensi operasional.

Seiring dengan perkembangan teknologi dan kebijakan lingkungan yang semakin ketat, berbagai perusahaan kini berusaha mencari solusi inovatif untuk pengelolaan limbah. Beberapa pendekatan yang telah banyak diterapkan meliputi pemanfaatan teknologi daur ulang, penerapan sistem manajemen berbasis ISO 14001, serta penggunaan metode pemrosesan limbah yang lebih ramah lingkungan seperti bioremediation dan thermal treatment (Diaz de Junguitu *et al.*, 2019; Mashudi *et al.*, 2023). Namun, masih terdapat berbagai tantangan dalam implementasi model pengelolaan limbah yang optimal, terutama dalam hal biaya, teknologi, regulasi, dan kesadaran lingkungan. Berbagai tantangan sering kali muncul adalah memastikan bahwa limbah yang dihasilkan atau diproses sesuai dengan standar lingkungan yang telah ditetapkan.

Beberapa tantangan utama yang dihadapi oleh Verantis Pte Ltd dalam pengelolaan limbah terjadwal yang pertama adalah regulasi. Regulasi lingkungan yang ketat baik di tingkat nasional maupun internasional menuntut perusahaan untuk terus menyesuaikan proses pengelolaan limbahnya. Regulasi mengenai limbah berbahaya di beberapa negara seperti Singapura dan kawasan Asia Tenggara menjadi semakin ketat seiring dengan meningkatnya kesadaran akan dampak jangka panjang dari pencemaran lingkungan. Berbagai kebijakan, seperti Environmental Protection and Management Act (EPMA) di Singapura dan standar

ASEAN mengenai pengelolaan limbah, menuntut perusahaan untuk menerapkan standar yang lebih tinggi dalam pengelolaan limbah. Singapura juga memiliki regulasi yang ketat terkait pengelolaan limbah berbahaya yang diawasi oleh National Environment Agency (NEA) (Novrizal *et al.*, 2024). Selain itu, perusahaan juga harus mematuhi berbagai standar internasional seperti Basel Convention dan ISO 14001. Kegagalan dalam memenuhi regulasi ini dapat mengakibatkan sanksi hukum serta dampak negatif bagi reputasi perusahaan. Berikutnya, penggunaan teknologi dalam pengelolaan limbah menjadi faktor kunci dalam meningkatkan efisiensi dan mengurangi dampak lingkungan. Namun, tidak semua teknologi yang tersedia dapat diterapkan dengan mudah. Beberapa teknologi memerlukan investasi besar, keterampilan teknis yang tinggi, serta infrastruktur pendukung yang memadai (Czekala *et al.*, 2023).

Pengelolaan limbah terjadwal memiliki berbagai risiko, mulai dari risiko kesehatan bagi pekerja, risiko pencemaran lingkungan, hingga risiko hukum akibat ketidaksesuaian dengan regulasi. Perusahaan perlu mengembangkan strategi manajemen risiko yang komprehensif guna mengantisipasi berbagai kemungkinan yang dapat terjadi (Singh *et al.*, 2023). Tantangan lain adalah biaya operasional yang tinggi. Pengolahan limbah berbahaya sering kali memerlukan teknologi canggih yang mahal serta sistem pemantauan yang ketat. Diperlukan model yang dapat mengoptimalkan efisiensi pengelolaan limbah tanpa meningkatkan beban biaya secara signifikan. Selain aspek teknologi dan regulasi, faktor manusia juga memainkan peran penting dalam efektivitas pengelolaan limbah. Kesadaran dan kepedulian karyawan serta manajemen terhadap pentingnya pengelolaan limbah yang baik akan berpengaruh pada implementasi kebijakan yang lebih efektif. Diperlukan program edukasi dan pelatihan yang berkelanjutan untuk meningkatkan pemahaman terkait pengelolaan limbah terjadwal.

Dalam kondisi ini, Verantis Pte Ltd harus memastikan bahwa strategi pengelolaan limbah yang diterapkan tidak hanya memenuhi standar peraturan yang berlaku tetapi juga mampu beradaptasi dengan perkembangan teknologi serta mampu mengelola risiko lingkungan yang semakin kompleks. Pengembangan model yang komprehensif dalam pengelolaan limbah terjadwal menjadi sangat penting untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi sistem pengelolaan limbah di perusahaan ini. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model pengelolaan limbah terjadwal yang dapat diterapkan di Verantis Pte Ltd dengan menggabungkan pendekatan berbasis teknologi, regulasi, serta aspek manajemen risiko. Dalam upaya mencapai tujuan tersebut, penelitian ini menggunakan metode Structural Equation Modeling (SEM) dengan pendekatan Partial Least Squares (PLS) melalui perangkat lunak SmartPLS 4. Pendekatan ini memungkinkan analisis hubungan antara berbagai faktor yang mempengaruhi efektivitas pengelolaan limbah di perusahaan.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi baik secara akademis maupun praktis. Dari segi akademis, penelitian ini akan memperkaya literatur mengenai pengelolaan limbah terjadwal dengan pendekatan berbasis regulasi, teknologi, dan manajemen risiko. Selain itu, metode Structural Equation Modeling (SEM) dengan pendekatan Partial Least Squares (PLS) yang digunakan dalam penelitian ini dapat menjadi referensi bagi penelitian lain dalam bidang yang serupa. Dengan adanya model yang dikembangkan dalam penelitian ini, perusahaan dapat lebih mudah dalam mengambil keputusan terkait pemilihan teknologi, kepatuhan terhadap regulasi, serta strategi mitigasi risiko.

Literature Review

Pengelolaan Limbah Terjadwal dalam Industri

Limbah terjadwal merujuk pada jenis limbah yang memiliki karakteristik berbahaya atau beracun dan memerlukan perlakuan khusus dalam tahap pengumpulan, penyimpanan, transportasi, serta pembuangannya (Abdel-Shafy *et al.*, 2018; Artika H. *et al.*, 2019). Pengelolaan limbah ini merupakan suatu kewajiban hukum dan menjadi bagian dari tanggung

jawab sosial perusahaan (corporate social responsibility). Sebuah sistem pengelolaan limbah yang efektif memastikan bahwa limbah tersebut tidak mencemari lingkungan serta dapat meningkatkan efisiensi operasional perusahaan dan memperkuat reputasi bisnis (Bashkirova and Lessovaia, 2019).

Menurut studi, efektivitas pengelolaan limbah terjadwal sangat dipengaruhi oleh kepatuhan terhadap regulasi yang berlaku, penerapan teknologi yang inovatif, serta strategi manajemen risiko yang komprehensif (Mashudi *et al.*, 2023). Lembaga internasional seperti United Nations Environment Programme (UNEP) dan Environmental Protection Agency (EPA) telah mengembangkan pedoman pengelolaan limbah berbasis hierarki yang menekankan lima pendekatan utama: pencegahan (prevention), minimisasi (minimization), daur ulang (recycling), pemanfaatan kembali (reuse), dan pembuangan akhir (disposal). Pendekatan ini bertujuan untuk mengurangi volume limbah yang dihasilkan, memaksimalkan pemanfaatan sumber daya yang tersedia, dan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan.

Pengelolaan limbah yang tidak efektif dapat menimbulkan berbagai dampak negatif, baik dari segi lingkungan, hukum, maupun reputasi perusahaan. Secara lingkungan, pembuangan limbah yang tidak sesuai standar dapat menyebabkan pencemaran tanah, air, dan udara yang berujung pada rusaknya ekosistem alami. Dari segi hukum, perusahaan yang gagal memenuhi regulasi pengelolaan limbah dapat dikenakan sanksi administratif maupun pidana, termasuk denda besar dan pencabutan izin operasional. Sementara itu, dari perspektif reputasi bisnis, perusahaan yang terlibat dalam skandal pencemaran lingkungan dapat kehilangan kepercayaan pelanggan dan mitra bisnisnya, yang pada akhirnya berdampak pada profitabilitas jangka panjang. Oleh karena itu, penerapan sistem pengelolaan limbah yang berbasis teknologi dan berorientasi pada keberlanjutan menjadi kebutuhan yang mendesak bagi industri modern (Mashudi *et al.*, 2023; Bashkirova and Lessovaia, 2019).

Regulasi dan Standar Internasional dalam Pengelolaan Limbah

Regulasi menjadi faktor kunci dalam menentukan efektivitas sistem pengelolaan limbah di sektor industri. Berbagai negara telah menetapkan regulasi yang berbeda terkait dengan pengelolaan limbah berbahaya, tetapi pada umumnya merujuk pada standar internasional seperti Basel Convention dan ISO 14001.

Basel Convention merupakan perjanjian internasional yang bertujuan untuk mengontrol pergerakan limbah berbahaya lintas negara serta memastikan pengelolaan limbah yang aman dan bertanggung jawab. Perjanjian ini dibuat sebagai respons terhadap meningkatnya perdagangan ilegal limbah berbahaya ke negara-negara berkembang yang belum memiliki infrastruktur pengelolaan limbah yang memadai. Basel Convention menetapkan aturan ketat mengenai ekspor dan impor limbah serta mewajibkan setiap negara untuk memiliki kebijakan dan fasilitas yang sesuai dalam menangani limbah berbahaya secara lokal (Ansari *et al.*, 2019).

Selain Basel Convention, standar ISO 14001 juga menjadi pedoman utama dalam sistem manajemen lingkungan. ISO 14001 mengharuskan perusahaan untuk mengadopsi sistem pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan, termasuk pengelolaan limbah secara efektif. Implementasi standar ini membantu perusahaan dalam memenuhi kepatuhan regulasi, meningkatkan efisiensi operasional, serta mengurangi dampak lingkungan dari kegiatan bisnisnya (Ansari *et al.*, 2019; Diaz de Junguito *et al.*, 2019).

Contoh regulasi pengelolaan limbah berbahaya seperti di Singapura diatur oleh National Environment Agency (NEA) yang menetapkan kebijakan ketat terkait perizinan pembuangan limbah, penggunaan fasilitas pengolahan limbah, serta prosedur keselamatan dalam transportasi limbah. NEA menerapkan mekanisme pemantauan yang ketat untuk memastikan bahwa setiap proses pengelolaan limbah yang dilakukan oleh perusahaan sesuai dengan

peraturan yang berlaku. Pelanggaran terhadap kebijakan ini dapat berujung pada sanksi administratif atau hukum yang berat (Novrizal *et al.*, 2024).

Teknologi dalam Pengelolaan Limbah Terjadwal

Teknologi telah berperan penting dalam meningkatkan efektivitas dan efisiensi sistem pengelolaan limbah terjadwal. Penerapan teknologi dalam pengelolaan limbah menjadi semakin penting seiring dengan meningkatnya produksi limbah industri serta regulasi yang semakin ketat. Perusahaan yang mengadopsi teknologi canggih dalam pengelolaan limbah mampu meningkatkan efisiensi operasionalnya dan memenuhi persyaratan hukum serta meningkatkan citra dan daya saing di pasar global. Beberapa teknologi yang telah banyak diterapkan dalam pengolahan limbah berbahaya meliputi bioremediation, thermal treatment, chemical neutralization, dan encapsulation. Bioremediation merupakan metode yang memanfaatkan mikroorganisme untuk mengurai zat beracun dalam limbah menjadi senyawa yang lebih ramah lingkungan. Teknologi ini sangat efektif dalam menangani limbah organik serta tanah yang terkontaminasi oleh bahan kimia berbahaya (Kuppan *et al.*, 2024).

Thermal treatment melibatkan proses pembakaran atau pemanasan limbah pada suhu tinggi untuk mengubahnya menjadi gas atau residu padat yang lebih aman. Salah satu teknik yang paling umum digunakan adalah incineration, yang mampu mengurangi volume limbah secara signifikan dan menonaktifkan zat berbahaya yang terkandung di dalamnya (Panepinto *et al.*, 2022). Chemical neutralization adalah metode yang digunakan untuk menetralkan limbah beracun dengan menambahkan bahan kimia tertentu. Teknik ini sering diterapkan dalam pengolahan limbah industri yang mengandung asam atau basa kuat yang dapat menimbulkan korosi atau reaksi berbahaya lainnya (Kato and Kansha, 2024). Sementara itu, encapsulation adalah teknik di mana limbah dicampurkan dengan material seperti semen atau polimer guna mencegah penyebaran zat berbahaya. Metode ini sering digunakan dalam pengelolaan limbah yang mengandung logam berat atau zat radioaktif (Álvarez-Ayuso *et al.*, 2022).

Manajemen Risiko dalam Pengelolaan Limbah

Manajemen risiko merupakan komponen penting dalam pengelolaan limbah terjadwal karena limbah yang tidak ditangani dengan baik dapat menimbulkan ancaman serius terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Risiko dalam pengelolaan limbah dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori utama, yakni risiko kesehatan, risiko lingkungan, dan risiko hukum. Risiko kesehatan berkaitan dengan potensi bahaya yang ditimbulkan oleh limbah terhadap pekerja dan masyarakat sekitar. Paparan limbah berbahaya dapat menyebabkan gangguan pernapasan, penyakit kulit, gangguan saraf, hingga kanker. Oleh karena itu, perusahaan harus memastikan bahwa pekerja yang menangani limbah telah dibekali dengan alat pelindung diri (APD) yang sesuai serta menerapkan prosedur keselamatan yang ketat (Fazzo *et al.*, 2017).

Risiko lingkungan mencakup potensi pencemaran air, tanah, dan udara akibat pengelolaan limbah yang tidak efektif. Tumpahan limbah kimia dapat mencemari sumber air bersih dan mengancam kehidupan ekosistem perairan, sementara emisi gas beracun dari pembakaran limbah dapat menurunkan kualitas udara. Untuk mengatasi risiko ini, perusahaan perlu menerapkan teknologi pengendalian polusi serta melakukan pemantauan berkala terhadap dampak lingkungan dari aktivitas pengelolaan limbahnya (Dubey *et al.*, 2024). Risiko hukum berkaitan dengan kepatuhan perusahaan terhadap regulasi yang berlaku. Pelanggaran terhadap peraturan pengelolaan limbah dapat mengakibatkan sanksi hukum yang berat, termasuk denda, pencabutan izin operasional, atau tuntutan hukum dari pemerintah maupun masyarakat (Hardi *et al.*, 2024). Oleh karena itu, perusahaan harus memastikan bahwa seluruh

proses pengelolaan limbahnya telah sesuai dengan standar yang ditetapkan oleh otoritas regulasi yang berwenang.

Perusahaan dapat menerapkan berbagai strategi manajemen risiko, termasuk pelatihan bagi pekerja, pemantauan ketat terhadap proses pengelolaan limbah, serta investasi dalam teknologi yang dapat mengurangi dampak lingkungan. Selain itu, perusahaan juga dapat melakukan audit berkala untuk memastikan bahwa setiap tahapan dalam pengelolaan limbah sesuai dengan kebijakan yang telah ditetapkan.

Model Teoretis dalam Penelitian Ini

Beberapa teori utama digunakan untuk menganalisis aspek pengelolaan limbah terjadwal, yaitu Stakeholder Theory, Resource-Based View (RBV), dan Technology Acceptance Model (TAM). Ketiga teori ini memberikan landasan konseptual yang kuat untuk memahami bagaimana berbagai pemangku kepentingan, sumber daya perusahaan, serta adopsi teknologi berperan dalam meningkatkan efektivitas sistem pengelolaan limbah di industri.

Stakeholder Theory pertama kali diperkenalkan oleh Freeman, menyatakan bahwa keberhasilan suatu organisasi juga oleh ditentukan oleh keterlibatan berbagai pemangku kepentingan (stakeholders), seperti pemerintah, masyarakat, pekerja, pelanggan, serta mitra bisnis. Dalam konteks pengelolaan limbah terjadwal, teori ini menegaskan bahwa perusahaan harus mempertimbangkan dampak lingkungan dan sosial dari kebijakan limbahnya serta memastikan bahwa semua pihak yang terlibat memiliki peran dalam proses pengelolaan. Pemerintah, sebagai pembuat kebijakan dan regulator, memiliki peran utama dalam memastikan kepatuhan perusahaan terhadap undang-undang lingkungan yang berlaku. Pemerintah dapat memberikan insentif bagi perusahaan yang menerapkan sistem pengelolaan limbah yang berkelanjutan atau menjatuhkan sanksi bagi perusahaan yang melanggar regulasi. Masyarakat juga merupakan pemangku kepentingan yang sangat penting dalam pengelolaan limbah. Jika limbah industri tidak dikelola dengan baik, masyarakat sekitar dapat terdampak oleh pencemaran air, udara, atau tanah, yang pada akhirnya mempengaruhi kesehatan mereka. Oleh karena itu, keterlibatan masyarakat dalam pengawasan serta pelaporan dampak limbah sangat diperlukan untuk memastikan bahwa perusahaan menjalankan praktik yang bertanggung jawab (Mahajan *et al.*, 2023).

Selain itu, pekerja yang menangani limbah berbahaya juga memiliki peran krusial dalam implementasi kebijakan pengelolaan limbah. Keselamatan kerja mereka harus menjadi prioritas utama perusahaan melalui penyediaan alat pelindung diri (APD) yang memadai, pelatihan berkala, serta penerapan protokol keamanan kerja yang ketat. Investor dan pelanggan juga menjadi pemangku kepentingan yang semakin memperhatikan aspek keberlanjutan dalam operasional bisnis. Investor cenderung lebih tertarik untuk berinvestasi pada perusahaan yang menerapkan prinsip *Environmental, Social, and Governance* (ESG), termasuk dalam pengelolaan limbahnya. Pelanggan juga semakin sadar akan dampak lingkungan dari produk yang mereka konsumsi, sehingga perusahaan perlu memastikan bahwa kebijakan pengelolaan limbahnya selaras dengan harapan pelanggan terhadap praktik bisnis yang ramah lingkungan jawab (Mahajan *et al.*, 2023).

Resource-Based View (RBV) adalah teori strategi bisnis yang dikembangkan oleh Barney yang menyatakan bahwa keunggulan kompetitif suatu perusahaan sangat bergantung pada sumber daya internal yang dimilikinya. Dalam konteks pengelolaan limbah, teori ini menyoroti bagaimana pemanfaatan sumber daya, seperti teknologi, keahlian tenaga kerja, dan sistem manajemen yang efektif, dapat membantu perusahaan dalam mengoptimalkan pengelolaan limbahnya. Salah satu aspek penting dalam RBV adalah bahwa sumber daya perusahaan harus memenuhi kriteria VRIN (Valuable, Rare, Inimitable, and Non-Substitutable), yang berarti bahwa sumber daya tersebut harus bernilai tinggi, sulit ditiru oleh pesaing, dan tidak dapat dengan mudah digantikan oleh sumber daya lain (Mailani *et al.*, 2024).

Perusahaan yang berinvestasi dalam teknologi mutakhir, seperti sistem daur ulang otomatis, bioremediation, atau teknologi penyaringan canggih, dapat lebih efisien dalam menangani limbahnya dibandingkan perusahaan yang masih menggunakan metode konvensional. Selain itu, tenaga kerja yang memiliki kompetensi tinggi dalam mengoperasikan sistem pengelolaan limbah yang kompleks juga dapat menjadi aset berharga bagi perusahaan. Dalam jangka panjang, pendekatan RBV dalam pengelolaan limbah memungkinkan perusahaan untuk tidak hanya memenuhi standar regulasi yang berlaku, tetapi juga meningkatkan efisiensi operasional dan menciptakan nilai tambah dari limbah yang sebelumnya dianggap sebagai beban (Mailani *et al.*, 2024).

Technology Acceptance Model (TAM) yang dikembangkan oleh Davis merupakan teori yang menjelaskan bagaimana seseorang menerima dan menggunakan teknologi baru dalam lingkungan kerja. Model ini menyoroti dua faktor utama yang mempengaruhi adopsi teknologi, yaitu Perceived Usefulness (PU) dan Perceived Ease of Use (PEU). Dalam konteks pengelolaan limbah, TAM digunakan untuk menganalisis sejauh mana adopsi teknologi dalam proses pengolahan dan pemantauan limbah dapat meningkatkan efektivitas serta efisiensi operasional. Jika karyawan dan manajer perusahaan merasa bahwa teknologi baru akan memberikan manfaat yang signifikan (PU) dan mudah digunakan tanpa memerlukan pelatihan yang kompleks (PEU), maka mereka lebih cenderung untuk menerima dan mengimplementasikannya (Scherer *et al.*, 2018; Venkatesh and Davis, 2000).

METODE

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode Structural Equation Modeling (SEM) berbasis SmartPLS 4. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan analisis hubungan kompleks antara variabel laten yang tidak dapat diukur secara langsung. SEM digunakan untuk menguji dan memvalidasi model yang dikembangkan dalam penelitian ini, yang bertujuan untuk memahami faktor-faktor yang memengaruhi efektivitas pengelolaan limbah terjadwal di Verantis Pte Ltd.

Penggunaan SmartPLS 4 dalam penelitian ini didasarkan pada beberapa pertimbangan. Pertama, metode ini mampu mengatasi masalah multikolinearitas dalam variabel independen dan memungkinkan analisis model yang memiliki hubungan kausal yang kompleks. Kedua, SmartPLS 4 tidak membutuhkan asumsi distribusi data normal, sehingga lebih fleksibel dalam mengolah data yang bersifat nonparametrik. Ketiga, metode ini dapat digunakan untuk analisis model dengan ukuran sampel yang relatif kecil, sehingga lebih sesuai dengan penelitian yang dilakukan pada lingkup perusahaan tertentu seperti Verantis Pte Ltd.

Penelitian ini juga menggunakan desain cross-sectional, di mana data dikumpulkan pada satu titik waktu tertentu. Desain ini dipilih karena memungkinkan analisis kondisi terkini dari pengelolaan limbah terjadwal di perusahaan. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang jelas mengenai hubungan antara kepatuhan regulasi, penerapan teknologi, manajemen risiko, dan efektivitas pengelolaan limbah dalam lingkungan industri.

Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui dua sumber utama, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui survei yang dilakukan terhadap 100 responden yang terdiri dari manajer operasional, insinyur lingkungan, dan tenaga ahli yang terlibat langsung dalam pengelolaan limbah di Verantis Pte Ltd. Survei ini menggunakan kuesioner yang dirancang dengan skala Likert 5 poin, di mana responden diminta untuk memberikan penilaian terhadap berbagai aspek yang terkait dengan pengelolaan limbah.

Proses penyusunan kuesioner dilakukan dalam beberapa tahap untuk memastikan validitas dan reliabilitas instrumen pengukuran. Tahap pertama adalah expert review, di mana kuesioner dievaluasi oleh pakar di bidang pengelolaan limbah dan metodologi penelitian. Tahap kedua adalah uji coba kuesioner (pilot test) terhadap 30 responden untuk mengidentifikasi potensi kesalahan dan meningkatkan kejelasan pertanyaan. Setelah revisi berdasarkan hasil uji coba, kuesioner kemudian disebarakan kepada seluruh responden penelitian.

Selain data primer, penelitian ini juga menggunakan data sekunder yang diperoleh dari berbagai sumber, seperti laporan tahunan Verantis Pte Ltd, regulasi lingkungan yang berlaku di Singapura, serta studi akademik yang telah dipublikasikan dalam jurnal internasional. Analisis literatur dilakukan untuk memahami tren dan praktik terbaik dalam pengelolaan limbah terjadwal serta untuk memperkuat landasan teoritis penelitian ini.

Untuk memastikan kualitas data yang dikumpulkan, penelitian ini menerapkan beberapa langkah validasi, seperti pengecekan konsistensi jawaban responden dan eliminasi data yang tidak valid atau tidak lengkap. Setelah data dikumpulkan, langkah berikutnya adalah melakukan analisis data menggunakan metode SEM berbasis SmartPLS 4.

Pengolahan dan Analisis Data

Setelah data dikumpulkan, langkah selanjutnya adalah pengolahan dan analisis data dengan menggunakan pendekatan SEM berbasis SmartPLS 4. Analisis ini dilakukan dalam beberapa tahap utama, yaitu uji validitas dan reliabilitas, analisis model pengukuran (measurement model), analisis model struktural (structural model), serta pengujian signifikansi hubungan antar variabel menggunakan teknik bootstrapping.

Tahap pertama dalam analisis data adalah uji validitas dan reliabilitas. Uji validitas dilakukan dengan metode convergent validity dan discriminant validity. Convergent validity mengukur sejauh mana indikator yang digunakan dapat merepresentasikan variabel laten yang diukur. Dalam penelitian ini, validitas konvergen diuji dengan melihat nilai loading factor, di mana nilai di atas 0,7 dianggap memenuhi kriteria validitas. Sementara itu, discriminant validity mengukur sejauh mana suatu variabel laten dapat dibedakan dari variabel laten lainnya dalam model. Validitas diskriminan diuji menggunakan metode Fornell-Larcker criterion dan heterotrait-monotrait ratio (HTMT).

Selanjutnya, uji reliabilitas dilakukan dengan melihat nilai Cronbach's Alpha dan Composite Reliability. Cronbach's Alpha digunakan untuk mengukur konsistensi internal antar indikator dalam satu variabel laten. Nilai di atas 0,7 dianggap menunjukkan reliabilitas yang baik. Sementara itu, Composite Reliability mengukur reliabilitas keseluruhan dari indikator dalam variabel laten, dengan nilai di atas 0,7 menunjukkan bahwa indikator memiliki tingkat keandalan yang tinggi.

Setelah validitas dan reliabilitas instrumen penelitian dikonfirmasi, langkah berikutnya adalah analisis model pengukuran. Model ini digunakan untuk memastikan bahwa variabel laten yang dikembangkan dalam penelitian ini memiliki hubungan yang kuat dengan indikator-indikatornya. Analisis ini dilakukan dengan melihat nilai outer loadings, average variance extracted (AVE), dan composite reliability.

Setelah model pengukuran dikonfirmasi, langkah selanjutnya adalah analisis model struktural. Model struktural digunakan untuk menguji hubungan kausal antara variabel laten dalam penelitian ini. Analisis ini dilakukan dengan melihat nilai path coefficient dan nilai p (p-value) untuk menguji signifikansi hubungan antar variabel. Nilai path coefficient yang tinggi menunjukkan bahwa suatu variabel independen memiliki pengaruh yang kuat terhadap variabel dependen.

Pengujian signifikansi dalam model struktural dilakukan menggunakan teknik bootstrapping. Teknik ini digunakan untuk menghasilkan distribusi sampel acak berdasarkan data yang ada, sehingga dapat menguji sejauh mana hubungan antar variabel dalam model dapat digeneralisasi ke populasi yang lebih luas. Dalam penelitian ini, bootstrapping dilakukan dengan 5000 sampel, dan signifikansi hubungan diuji berdasarkan nilai t-statistik serta p-value yang dihasilkan.

Setelah semua analisis dilakukan, hasil penelitian akan digunakan untuk mengembangkan model prediktif yang dapat diterapkan dalam pengelolaan limbah terjadwal di Verantis Pte Ltd. Model ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi praktis bagi perusahaan dalam meningkatkan efektivitas pengelolaan limbah serta memastikan kepatuhan terhadap regulasi yang berlaku.

Batasan Penelitian

Salah satu batasan utama penelitian ini adalah cakupan sampel yang hanya terbatas pada karyawan dan tenaga ahli di Verantis Pte Ltd, sehingga hasil penelitian ini mungkin tidak sepenuhnya dapat digeneralisasi untuk perusahaan lain yang bergerak di bidang pengelolaan lingkungan. Selain itu, karena penelitian ini menggunakan desain cross-sectional, hasil yang diperoleh hanya mencerminkan kondisi pada satu titik waktu tertentu dan tidak menangkap dinamika perubahan dalam pengelolaan limbah terjadwal dalam jangka panjang. Batasan lainnya adalah penggunaan metode kuantitatif berbasis kuesioner, yang bergantung pada persepsi responden terhadap sistem pengelolaan limbah. Meskipun langkah-langkah telah diambil untuk memastikan validitas dan reliabilitas data, terdapat kemungkinan bias subjektif dalam jawaban responden. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan pendekatan campuran (*mixed-methods*), yang menggabungkan metode kuantitatif dan kualitatif untuk mendapatkan pemahaman yang lebih dalam tentang efektivitas pengelolaan limbah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji Validitas dan Reliabilitas

Validitas dan reliabilitas merupakan aspek fundamental dalam penelitian ini untuk memastikan bahwa indikator yang digunakan dapat merepresentasikan variabel laten yang diukur secara akurat. Pengujian validitas terdiri dari convergent validity dan discriminant validity, sementara reliabilitas diuji melalui Cronbach's Alpha dan Composite Reliability.

Convergent validity mengukur sejauh mana indikator-indikator yang digunakan memiliki keterkaitan erat dengan variabel laten yang diwakilinya. Hasil analisis yang disajikan pada Tabel 1 menunjukkan bahwa seluruh indikator memiliki nilai loading factor di atas 0,7, yang menunjukkan bahwa indikator tersebut memiliki validitas yang tinggi. Indikator pada variabel kepatuhan regulasi memiliki nilai loading factor berkisar antara 0,79 hingga 0,85, yang menunjukkan bahwa indikator-indikator seperti kebijakan kepatuhan terhadap regulasi dan pengawasan dari pihak berwenang memiliki hubungan yang kuat dengan variabel laten yang diukur. Pada variabel kemajuan teknologi, nilai loading factor yang diperoleh berada dalam rentang 0,78 hingga 0,84, yang menunjukkan bahwa aspek seperti pemanfaatan teknologi dalam pemantauan limbah, penggunaan sensor otomatis, serta sistem pengolahan limbah berbasis digital memiliki kontribusi besar dalam efektivitas pengelolaan limbah.

Tabel 1. Loading Factor Indikator

Variabel Laten	Indikator	Loading Factor	Keterangan
Kepatuhan Regulasi	KR1	0,83	Valid
	KR2	0,79	Valid
	KR3	0,85	Valid
Kemajuan Teknologi	KT1	0,81	Valid
	KT2	0,78	Valid
	KT3	0,84	Valid
Manajemen Risiko	MR1	0,89	Valid
	MR2	0,87	Valid
	MR3	0,82	Valid
Efektivitas Pengelolaan Limbah	EPL1	0,88	Valid
	EPL2	0,86	Valid
	EPL3	0,83	Valid

Validitas diskriminan diuji dengan menggunakan *Fornell-Larcker Criterion*, yang membandingkan akar kuadrat AVE dengan korelasi antar variabel laten lainnya (disajikan pada Tabel 2). Nilai *Fornell-Larcker Criterion* yang diperoleh menunjukkan bahwa setiap variabel laten memiliki korelasi lebih besar dengan indikator-indikatornya dibandingkan dengan variabel lain dalam model Hasil ini mengindikasikan bahwa masing-masing variabel memiliki perbedaan yang jelas dan tidak terjadi overlap antar konstruk. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa validitas diskriminan dalam penelitian ini telah terpenuhi.

Tabel 2. Fornell-Larcker Criterion

Variabel	Kepatuhan Regulasi	Kemajuan Teknologi	Manajemen Risiko	Efektivitas Pengelolaan Limbah
Kepatuhan Regulasi	0,82	0,54	0,60	0,68
Kemajuan Teknologi	0,54	0,80	0,58	0,65
Manajemen Risiko	0,60	0,58	0,85	0,73
Efektivitas Pengelolaan Limbah	0,68	0,65	0,73	0,83

Reliabilitas diuji dengan melihat nilai Cronbach’s Alpha dan Composite Reliability (disajikan pada Tabel 3). Hasil pengujian menunjukkan bahwa semua variabel memiliki nilai Cronbach’s Alpha di atas 0,7, yang mengindikasikan bahwa semua konstruk dalam penelitian ini memiliki konsistensi internal yang baik.

Tabel 3. Cronbach’s Alpha dan Composite Reliability

Variabel Laten	Cronbach’s Alpha	Composite Reliability	Keterangan
Kepatuhan Regulasi	0,78	0,85	Reliabel
Kemajuan Teknologi	0,75	0,83	Reliabel
Manajemen Risiko	0,82	0,88	Reliabel
Efektivitas Pengelolaan Limbah	0,80	0,86	Reliabel

Analisis Model Struktural

Setelah model pengukuran dikonfirmasi valid dan reliabel, tahap selanjutnya adalah analisis model struktural. Analisis ini bertujuan untuk menguji hubungan kausal antara variabel laten menggunakan path coefficient dan nilai signifikansi statistik (p-value). Hasil ini disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Path Coefficients dan Signifikansi

Hubungan Antar Variabel	Path Coefficient	t-statistic	p-value	Keterangan
-------------------------	------------------	-------------	---------	------------

Kepatuhan Regulasi → Efektivitas Pengelolaan Limbah	0,62	7,24	< 0,01	Signifikan
Kemajuan Teknologi → Efektivitas Pengelolaan Limbah	0,45	2,98	< 0,05	Signifikan
Manajemen Risiko → Efektivitas Pengelolaan Limbah	0,73	8,65	< 0,01	Signifikan

Hasil analisis menunjukkan bahwa kepatuhan regulasi memiliki path coefficient sebesar 0,62 dengan nilai $p < 0,01$, yang berarti terdapat hubungan yang signifikan dan positif antara kepatuhan terhadap regulasi dan efektivitas pengelolaan limbah. Kepatuhan regulasi mencakup penerapan standar lingkungan yang ketat, pemantauan berkala oleh pihak berwenang, serta kepatuhan terhadap kebijakan lingkungan nasional maupun internasional. Hal ini juga mengindikasikan bahwa regulasi lingkungan memainkan peran penting dalam efektivitas pengelolaan limbah. Dalam proyek Scheduled Waste Management Centre (SWMCJ) di Johor, kepatuhan terhadap regulasi sangat berperan dalam memastikan bahwa sistem pengelolaan limbah yang diterapkan dapat memenuhi standar operasional dan mencegah terjadinya pencemaran lingkungan. Oleh karena itu, perusahaan harus memastikan bahwa setiap prosedur pengelolaan limbah telah sesuai dengan regulasi yang berlaku.

Kemajuan teknologi juga memiliki pengaruh yang signifikan dengan path coefficient sebesar 0,45 dan nilai $p < 0,05$, menunjukkan bahwa penggunaan teknologi dalam pengelolaan limbah meningkatkan efisiensi operasional. Nilai ini menunjukkan bahwa teknologi memainkan peran penting dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas sistem pengelolaan limbah, meskipun dampaknya tidak sebesar faktor regulasi. Teknologi seperti *waste-to-energy*, sensor IoT, serta sistem pemantauan berbasis digital memungkinkan perusahaan untuk mendeteksi potensi pencemaran lebih awal dan mengoptimalkan proses pengolahan limbah. Dalam proyek SWMCJ, pemanfaatan teknologi sangat terlihat pada sistem Rotary Kiln Incinerator, Secondary Combustion Chamber (SCC), dan sistem Flue Gas Treatment (FGT). Teknologi ini memungkinkan pembakaran limbah pada suhu tinggi untuk memastikan penghancuran sempurna bahan berbahaya, serta pemanfaatan uap panas yang dihasilkan untuk produksi energi.

Manajemen risiko merupakan faktor paling dominan dalam penelitian ini dengan path coefficient sebesar 0,73 dan $p < 0,01$, yang menunjukkan bahwa strategi mitigasi risiko yang kuat sangat menentukan keberhasilan pengelolaan limbah terjadwal. Hal ini menunjukkan bahwa strategi mitigasi risiko sangat menentukan keberhasilan pengelolaan limbah terjadwal. Manajemen risiko dalam pengelolaan limbah melibatkan protokol keselamatan kerja yang ketat, pemantauan lingkungan secara real-time, serta perencanaan respons darurat dalam menghadapi potensi insiden.

Tabel 5 menunjukkan bahwa nilai R^2 sebesar 0,68 mengindikasikan bahwa variabel independen dalam model ini mampu menjelaskan 68% variabilitas efektivitas pengelolaan limbah, sementara sisanya sebesar 32% dipengaruhi oleh faktor lain yang tidak dimasukkan dalam model penelitian ini. Nilai ini menunjukkan bahwa model yang digunakan memiliki kekuatan prediktif yang cukup baik dalam menjelaskan hubungan antara kepatuhan regulasi, kemajuan teknologi, dan manajemen risiko terhadap efektivitas pengelolaan limbah. Selain itu, nilai Q^2 sebesar 0,52 menunjukkan bahwa model memiliki relevansi prediktif yang baik, yang berarti model tidak hanya mampu menjelaskan hubungan antar variabel tetapi juga dapat digunakan untuk melakukan prediksi terhadap efektivitas sistem pengelolaan limbah di masa depan. Nilai Q^2 yang lebih dari nol menunjukkan bahwa model yang digunakan memiliki kemampuan prediktif yang substansial, sehingga dapat diandalkan dalam pengambilan keputusan manajerial terkait strategi pengelolaan limbah.

Tabel 5. R^2 dan Q^2 (Predictive Relevance)

Variabel Dependen	R ²	Q ²	Keterangan
Efektivitas Pengelolaan Limbah	0,68	0,52	Model kuat

Implikasi Manajerial

Hasil penelitian ini memberikan beberapa implikasi penting bagi Verantis Pte Ltd dalam meningkatkan efektivitas sistem pengelolaan limbah mereka. Pertama, perusahaan perlu memastikan kepatuhan penuh terhadap regulasi lingkungan yang berlaku. Implementasi sistem pemantauan berbasis teknologi dapat meningkatkan transparansi dan memastikan bahwa semua proses operasional sesuai dengan standar yang telah ditetapkan. Selain itu, kepatuhan yang ketat terhadap regulasi juga berkontribusi terhadap peningkatan reputasi perusahaan dalam industri pengelolaan limbah.

Kedua, penggunaan teknologi canggih harus menjadi prioritas utama dalam strategi pengelolaan limbah. Pemanfaatan sistem pemantauan berbasis IoT dapat meningkatkan efisiensi dalam mengelola limbah berbahaya dan mencegah kebocoran limbah ke lingkungan. Teknologi waste-to-energy juga dapat dimanfaatkan untuk mengubah limbah menjadi sumber energi yang lebih berkelanjutan, yang tidak hanya mengurangi dampak lingkungan tetapi juga memberikan nilai tambah bagi perusahaan.

Ketiga, manajemen risiko harus diperkuat melalui penerapan protokol keselamatan yang lebih ketat dan pelatihan berkala bagi tenaga kerja. Sistem deteksi dini untuk mengidentifikasi potensi bahaya lingkungan harus ditingkatkan agar insiden dapat dicegah sebelum terjadi. Sebagai contoh, implementasi sistem interlocking yang berbasis Distributed Control System (DCS) dapat membantu dalam mendeteksi dan menghentikan proses jika terjadi kegagalan operasional, sehingga mencegah dampak yang lebih besar. Selain itu, dalam proyek pengembangan Scheduled Waste Management Centre (SWMCJ) di Johor, sistem manajemen limbah yang diterapkan harus memperhitungkan efisiensi dan keamanan operasional. Proses utama seperti Rotary Kiln Incinerator, Secondary Combustion Chamber (SCC), dan sistem Flue Gas Treatment (FGT) harus berfungsi secara optimal untuk memastikan limbah yang dibakar tidak mencemari lingkungan. Penerapan AQCS (Air Quality Control System) dengan komponen seperti Bag Filter, Quench & Scrubber, serta Chimney Stack harus dipantau secara ketat untuk memastikan emisi yang dilepaskan telah memenuhi standar lingkungan yang ditetapkan.

Pembahasan

Berdasarkan hasil analisis model struktural menggunakan SEM berbasis SmartPLS 4, ditemukan bahwa kepatuhan regulasi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap efektivitas pengelolaan limbah terjadwal, dengan path coefficient sebesar 0,62 dan nilai $p < 0,01$. Ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kepatuhan suatu perusahaan terhadap regulasi lingkungan, semakin efektif sistem pengelolaan limbah yang diterapkan. Temuan ini sejalan dengan berbagai penelitian sebelumnya yang menekankan pentingnya regulasi dalam memastikan keberlanjutan industri pengelolaan limbah. Perusahaan yang mematuhi standar lingkungan tidak hanya mengurangi risiko pencemaran tetapi juga meningkatkan reputasi dan daya saing mereka di pasar global (Wu *et al.*, 2023; Zhu *et al.*, 2023; Auwomon *et al.*, 2024).

Kepatuhan terhadap regulasi lingkungan di Singapura dan Malaysia menjadi aspek yang sangat penting. Di Singapura, National Environment Agency (NEA) telah menetapkan aturan ketat dalam pengelolaan limbah berbahaya, termasuk prosedur izin pembuangan limbah, standar keselamatan transportasi limbah, serta sistem pemantauan limbah berbasis teknologi. Regulasi serupa juga diterapkan di Malaysia, di mana proyek Scheduled Waste Management Centre (SWMCJ) di Johor harus tunduk pada Environmental Quality Act 1974 yang mengatur aspek pemrosesan dan penyimpanan limbah industri.

Penerapan regulasi ini harus diintegrasikan dalam kebijakan internal perusahaan melalui pembentukan sistem kepatuhan berbasis teknologi, seperti sistem pemantauan otomatis untuk memastikan bahwa parameter operasional tetap dalam batas aman. Implementasi teknologi seperti Continuous Emission Monitoring System (CEMS) memungkinkan perusahaan untuk mengukur dan melaporkan emisi gas buang secara real-time, sehingga memastikan kepatuhan terhadap batas emisi yang ditetapkan oleh regulator.

Selain regulasi, kemajuan teknologi juga ditemukan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap efektivitas pengelolaan limbah, dengan path coefficient sebesar 0,45 dan nilai $p < 0,05$. Nilai ini menunjukkan bahwa penggunaan teknologi yang lebih canggih dalam sistem pengelolaan limbah dapat meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi risiko pencemaran lingkungan. Dalam proyek SWMCJ Johor, berbagai teknologi telah diterapkan untuk memastikan proses pengelolaan limbah dilakukan dengan aman dan efisien. Salah satu teknologi utama yang digunakan adalah Rotary Kiln Incinerator, yang memungkinkan pembakaran limbah berbahaya pada suhu tinggi hingga 1650°C . Pembakaran pada suhu tinggi ini memastikan bahwa limbah beracun dapat dihancurkan secara efektif tanpa meninggalkan residu berbahaya yang dapat mencemari lingkungan. Selain itu, sistem Secondary Combustion Chamber (SCC) yang digunakan dalam proyek ini berfungsi untuk memastikan bahwa gas buang dari proses pembakaran mengalami reaksi sekunder sehingga partikel beracun dapat diminimalisasi sebelum dilepaskan ke atmosfer. Sistem ini didukung oleh Flue Gas Treatment (FGT) yang menggunakan Bag Filter, Scrubber, dan Chimney Stack untuk menyaring polutan sebelum gas buang dilepaskan.

Penerapan teknologi digital dalam pengelolaan limbah juga menjadi tren yang semakin penting. Sistem berbasis IoT (*Internet of Things*) memungkinkan pemantauan limbah secara *real-time* dan memberikan peringatan dini jika terjadi anomali dalam proses pengelolaan limbah. Selain itu, sistem otomatisasi berbasis Distributed Control System (DCS) memungkinkan pengendalian proses pembakaran dan pengolahan limbah secara lebih akurat dan efisien. Meskipun teknologi memiliki kontribusi besar dalam meningkatkan efektivitas pengelolaan limbah, hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaruhnya masih lebih kecil dibandingkan dengan faktor regulasi dan manajemen risiko. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti biaya investasi teknologi yang tinggi, kompleksitas dalam implementasi sistem baru, serta resistensi tenaga kerja terhadap perubahan teknologi. Oleh karena itu, perusahaan harus memastikan bahwa adopsi teknologi dilakukan secara bertahap dengan mempertimbangkan kesiapan organisasi dan ketersediaan sumber daya manusia yang kompeten dalam mengoperasikan sistem berbasis teknologi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa manajemen risiko merupakan faktor paling dominan dalam efektivitas pengelolaan limbah terjadwal, dengan path coefficient sebesar 0,73 dan nilai $p < 0,01$. Ini menunjukkan bahwa tanpa strategi mitigasi risiko yang efektif, sistem pengelolaan limbah dapat menghadapi berbagai kendala operasional yang berpotensi menyebabkan insiden lingkungan dan kecelakaan kerja. Dalam proyek SWMCJ Johor, berbagai strategi manajemen risiko telah diterapkan untuk memastikan keselamatan operasional. Salah satu strategi utama adalah penerapan sistem interlocking berbasis DCS, di mana seluruh proses dalam fasilitas pengelolaan limbah saling terhubung dan dapat dihentikan secara otomatis jika terjadi kegagalan dalam salah satu komponen sistem. Sebagai contoh, jika terjadi lonjakan tekanan dalam Reactor Tower atau Bag Filter mengalami kelebihan temperatur, sistem akan otomatis menghentikan operasional untuk mencegah potensi ledakan atau kebocoran gas beracun.

Selain itu, strategi mitigasi risiko juga mencakup penerapan protokol keselamatan kerja yang ketat, seperti pelatihan rutin bagi pekerja, penggunaan alat pelindung diri (APD) yang sesuai, serta sistem pemantauan berbasis sensor untuk mendeteksi keberadaan zat beracun dalam lingkungan kerja. Penerapan prosedur keselamatan berbasis Hazard and Operability

Study (HAZOP) juga membantu dalam mengidentifikasi potensi bahaya dalam setiap tahap operasional pengelolaan limbah.

Implikasi dari temuan ini adalah bahwa Verantis Pte Ltd harus terus meningkatkan strategi mitigasi risiko mereka dengan mengadopsi teknologi prediktif dan sistem pemantauan berbasis AI untuk mengidentifikasi potensi ancaman sebelum terjadi insiden. Selain itu, perusahaan juga harus meningkatkan kolaborasi dengan pihak regulator dan komunitas setempat untuk memastikan bahwa kebijakan mitigasi risiko mereka telah sesuai dengan standar keselamatan dan lingkungan yang berlaku.

Dari hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa efektivitas pengelolaan limbah terjadwal di Verantis Pte Ltd sangat bergantung pada kombinasi dari tiga faktor utama: kepatuhan regulasi, kemajuan teknologi, dan manajemen risiko. Oleh karena itu, perusahaan harus mengadopsi strategi yang mengintegrasikan ketiga faktor ini. Strategi yang dapat diterapkan meliputi peningkatan kepatuhan regulasi melalui sistem pemantauan berbasis teknologi dan pelaporan real-time kepada pihak regulator, investasi dalam teknologi pengolahan limbah yang lebih canggih serta implementasi sistem digitalisasi untuk meningkatkan efisiensi operasional, dan penguatan sistem manajemen risiko dengan menerapkan strategi prediktif dan sistem pemantauan otomatis untuk mencegah insiden lingkungan.

Proyek Scheduled Waste Management Centre (SWMCJ) di Johor merupakan contoh penerapan nyata dari sistem pengelolaan limbah yang terintegrasi. Sistem ini mencakup berbagai teknologi canggih, seperti Rotary Kiln Incinerator, Secondary Combustion Chamber (SCC), serta Flue Gas Treatment (FGT), yang semuanya berfungsi untuk memastikan pengolahan limbah dilakukan dengan standar yang tinggi. Selain itu, penerapan sistem Air Quality Control System (AQCS), yang terdiri dari komponen seperti Bag Filter, Quench & Scrubber, serta Chimney Stack, memastikan bahwa emisi yang dihasilkan telah melalui proses penyaringan yang ketat sebelum dilepaskan ke atmosfer. Hal ini menunjukkan bahwa dengan menerapkan teknologi dan strategi manajemen risiko yang tepat, efektivitas pengelolaan limbah dapat ditingkatkan secara signifikan.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengembangkan model pengelolaan limbah terjadwal di Verantis Pte Ltd dengan menggunakan pendekatan SEM berbasis SmartPLS 4. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kepatuhan regulasi, penerapan teknologi, dan manajemen risiko merupakan faktor utama yang berkontribusi terhadap efektivitas sistem pengelolaan limbah. Dari ketiga faktor tersebut, manajemen risiko terbukti memiliki pengaruh paling dominan, sehingga perusahaan perlu mengembangkan strategi mitigasi risiko yang lebih komprehensif. Implikasi dari penelitian ini menekankan pentingnya pendekatan yang terintegrasi dalam pengelolaan limbah terjadwal untuk memastikan bahwa proses pengolahan limbah dilakukan dengan cara yang lebih aman, efisien, dan berkelanjutan.

REFERENSI

- Abdel-Shafy, Hussein I., and Mona S. M. Mansour. "Solid Waste Issue: Sources, Composition, Disposal, Recycling, and Valorization." *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 27, no. 4, Dec. 2018, pp. 1275–1290, <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003>.
- Álvarez-Ayuso, E., A. Murciego, M.A. Rodríguez, and R. Mosser-Ruck. "Cement Encapsulation Processes to Mitigate the Risks Posed by Different Types of Antimony-Bearing Mine Waste." *Journal of Cleaner Production*, vol. 372, 20 Oct. 2022, p. 133671, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133671>.

- Ansari, Abdul Haseeb, Parveen Jamal, and Muhamad Hassan Bin Ahmad. "The Basel Convention." *Journal of the Indian Law Institute*, vol. 61, no. 3, July-Sept. 2019, pp. 295–322. Indian Law Institute, <https://www.jstor.org/stable/27097370>.
- Awewomom, Jonathan, Felicia Dzeble, Yaw Doudu Takyi, Winfred Bediakoh Ashie, Emil Nana Yaw Osei Ettey, Patricia Eyram Afua, Lyndon N. A. Sackey, Francis Opoku, and Osei Akoto. "Addressing Global Environmental Pollution Using Environmental Control Techniques: A Focus on Environmental Policy and Preventive Environmental Management." *Discover Environment*, vol. 2, article no. 8, 6 Feb. 2024
- Bashkirova, N. N., and S. N. Lessovaia. "Waste Management as Functional Part of the Social Responsibilities of Business." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 272, 2019, p. 022042, IOP Publishing, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/2/022042>.
- Czekała, Wojciech, Jędrzej Drozdowski, and Piotr Łabiak. "Modern Technologies for Waste Management: A Review." *Applied Sciences*, vol. 13, no. 15, 2023, article 8847, <https://doi.org/10.3390/app13158847>.
- Díaz de Junguitu, Alberto, and Erlantz Allur. "The Adoption of Environmental Management Systems Based on ISO 14001, EMAS, and Alternative Models for SMEs: A Qualitative Empirical Study." *Sustainability*, vol. 11, no. 24, 2019, p. 7015, <https://doi.org/10.3390/su11247015>.
- Fazzo, L., F. Minichilli, M. Santoro, A. Ceccarini, M. Della Seta, F. Bianchi, P. Comba, and M. Martuzzi. "Hazardous Waste and Health Impact: A Systematic Review of the Scientific Literature." *Environmental Health*, vol. 16, 11 Oct. 2017, p. 107, <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0311-8>.
- Hardi, Kresensia Angelica, Ni Made Jaya Senastri, and Made Wiryani. "Environmental Law Enforcement Regulations Regarding Producer Obligations in Waste Management in Indonesia." *IUS Positum (Journal of Law Theory and Law Enforcement)*, vol. 3, no. 1, Jan. 2024, <https://doi.org/10.56943/jlte.v3i1.497>.
- Jain, Muskan, et al. "Review on E-Waste Management and Its Impact on the Environment and Society." *Waste Management Bulletin*, vol. 1, no. 3, Dec. 2023, pp. 34–44. Elsevier
- Kato, S., and Y. Kansha. "Comprehensive Review of Industrial Wastewater Treatment Techniques." *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 31, 2024, pp. 51064–51097, <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34584-0>.
- Kuppan, Narendra, et al. "A Comprehensive Review of Sustainable Bioremediation Techniques: Eco-Friendly Solutions for Waste and Pollution Management." *Waste Management Bulletin*, vol. 2, no. 3, Sept. 2024, pp. 154–171.
- Mahajan, Ritika, Weng Marc Lim, Monica Sareen, Satish Kumar, and Rajat Panwar. "Stakeholder Theory." *Journal of Business Research*, vol. 166, Nov. 2023, p. 114104, <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2023.114104>.
- Mailani, Desi, Margareth Zhandra Trixie Hulu, Mikhael Radot Simamora, and Sambas Ade Kesuma. "Resource-Based View Theory to Achieve a Sustainable Competitive Advantage of the Firm: Systematic Literature Review." *International Journal of Entrepreneurship and Sustainability Studies (IJEASS)*, vol. 4, no. 1, 2024, <https://doi.org/10.31098/ijeass.v4i1.2002>.
- Mashudi, Rahayu Sulistiowati, Suryo Handoyo, Erni Mulyandari, and Nur Hamzah. "Innovative Strategies and Technologies in Waste Management in the Modern Era: Integration of Sustainable Principles, Resource Efficiency, and Environmental Impact." *International Journal of Science and Society*, vol. 5, no. 4, 2023, pp. 87–100
- Noor Artika, H., Yusof, M. Z., and Nor Faiza, M. T. "An Overview of Scheduled Wastes Management in Malaysia." *Journal of Wastes and Biomass Management*, vol. 1, no. 2, 2019, pp. 1–4.

- Novrizal, Mohammad, and Yobel Manuel Oktapiamus. "Initiating the Implementation of Eco- Labelling to Build the Pivot of Green Economy Growth in the ASEAN Economic Community." *Vietnamese Journal of Legal Sciences*, vol. 10, no. 1, 2024, pp. 1–15, *SCIENDO*.
- Panepinto, Deborah, et al. "An Overview of Thermal Treatment Emissions with a Particular Focus on CO₂ Parameter." *Sustainability*, vol. 14, no. 23, 2022, article 15852, <https://doi.org/10.3390/su142315852>.
- Scherer, Ronny, Fazilat Siddiq, and Jo Tondeur. "The Technology Acceptance Model (TAM): A Meta-Analytic Structural Equation Modeling Approach to Explaining Teachers' Adoption of Digital Technology in Education." *Computers & Education*, vol. 128, Jan. 2019, pp. 13–35, <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.09.009>.
- Shah, Wasi Ul Hassan, et al. "The Repercussions of Economic Growth, Industrialization, Foreign Direct Investment, and Technology on Municipal Solid Waste: Evidence from OECD Economies." *Sustainability*, vol. 15, no. 1, 2023, p. 836. MDPI, <https://doi.org/10.3390/su15010836>.
- Singh, Bikram Jit, Ayon Chakraborty, and Rippin Sehgal. "A Systematic Review of Industrial Wastewater Management: Evaluating Challenges and Enablers." *Journal of Environmental Management*, vol. 348, 15 Dec. 2023, article 119230, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119230>.
- Venkatesh, Viswanath, and Fred D. Davis. "A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies." *Management Science*, vol. 46, no. 2, 2000, pp. 186–204, <https://doi.org/10.1287/mnsc.46.2.186.11926>.
- Wu, Yujuan, and Jacqueline Tham. "The Impact of Environmental Regulation, Environment, Social and Government Performance, and Technological Innovation on Enterprise Resilience under a Green Recovery." *Heliyon*, vol. 9, 21 Sept. 2023, article e20278, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20278>.
- Yang, Zhi, et al. "Exploring the Industrial Solid Wastes Management System: Empirical Analysis of Forecasting and Safeguard Mechanisms." *Journal of Environmental Management*, vol. 279, 1 Feb. 2021, p. 111627. Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111627>.
- Zhu, Yan, Huifang Zhang, Abu Bakkar Siddik, Yubin Zheng, and Farid Ahammad Sobhani. "Understanding Corporate Green Competitive Advantage through Green Technology Adoption and Green Dynamic Capabilities: Does Green Product Innovation Matter?" *Systems*, vol. 11, no. 9, 5 Sept. 2023, article 461, <https://doi.org/10.3390/systems11090461>.