Model Simulasi Sistem Dinamik Evaluasi Skenario Distribusi Sampah Makanan Pasar Horas Pematangsiantar

Kasih Simbolon[1*], Lasker Pangarapan Sinaga[2]
[1,2]*Matematika, Universitas Negeri Medan, Kota Medan, 20221 Indonesia*
**Coresponding Author: kasihsimbolon02@gmail.com*

Abstrak

Sampah makanan merupakan sampah yang berasal dari makanan yang diproduksi untuk konsumsi manusia namun terbuang atau rusak sebelum dikonsumsi. Di Indonesia, total sampah makanan mencapai 20.800.000 ton/tahun atau sekitar 40–45% dari total sampah nasional, dengan pasar tradisional sebagai penyumbang utama. Penelitian ini dilakukan di Pasar Horas Kota Pematangsiantar, dimana 40% limbah organik berasal dari sayuran, dengan timbulan sebesar 11.760,77 kg dalam 7 hari (rata-rata 1.680,11 kg/hari). Evaluasi pengelolaan limbah dilakukan menggunakan pendekatan sistem dinamik dengan perangkat lunak Vensim PLE 10.2.2. Dua skenario diuji, yaitu komposting menggunakan larva Black Soldier Fly (BSF) dan vermikomposting menggunakan cacing tanah Lumbricus rubellus. Hasil simulasi menunjukkan bahwa semua desain pengembangan mampu mengkomposting limbah >90%, namun tidak untuk desain pengembangan oleh (Suryakusuma, 2024). Pada skenario pertama desain pengembangan yang paling optimal adalah desain pengembangan kedua dengan persentase komposting sebesar 98,72%. Sedangkan pada skenario kedua desain pengembangan yang paling optimal adalah desain pengembangan ketiga dengan persentase komposting sebesar 99,91%, dimana hal ini menjadikannya sebagai desain pengembangan terbaik. Hasil ini hanya berupa simulasi dan jika ingin diterapkan harus disesuaikan dengan lokasi pengelolaan limbah yang ada di Pasar Horas. Selain meminimalkan timbulan limbah sayuran, kedua skenario ini berpotensi menghasilkan nilai ekonomi melalui produksi pakan ternak dan pupuk kompos.

Kata kunci: *Simulasi Sistem Dinamik; Skenario Distribusi; Sampah Sayuran; Pasar Horas Pematangsiantar; Vensim PLE*

Abstract

Food wastage is waste originating from food produced for human consumption but wasted or spoiled before consumption. In Indonesia, total food waste reaches 20,800,000 tons/year or around 40–45% of the total national waste, with traditional markets being the main contributor. This research was conducted at Horas Market in Pematangsiantar City, where 40% of organic waste comes from vegetables, with a generation of 11,760.77 kg in 7 days (an average of 1,680.11 kg/day). Waste management evaluation was conducted using a dynamic systems approach with Vensim PLE 10.2.2 software. Two scenarios were tested, namely composting using Black Soldier Fly (BSF) larvae and vermicomposting using Lumbricus rubellus earthworms. Simulation results showed that all development designs were able to compost >90% of waste, but not for the development design by (Suryakusuma, 2024). In the first scenario, the most optimal development design was the second development design with a composting percentage of 98.72%. Meanwhile, in the second scenario, the most optimal development design is the third, with a composting percentage of 99.91%, making it the best development design. These results are only simulations and, if implemented, must be adapted to the waste management location at Horas Market. In addition to minimizing vegetable waste, both scenarios have the potential to generate economic value through the production of animal feed and compost.

Keywords*: Dynamic System Simulation; Distribution Scenario; Vegetable Waste; Horas Market in Pematangsiantar; Vensim PLE*

Citation: Simbolon, K., & Sinaga, L. P. (2025). Model Simulasi Sistem Dinamik Evaluasi Skenario Distribusi Sampah Makanan Pasar Horas Pematangsiantar. *Prodising Seminar Nasional Jurusan Matematika 2025*. 11 - 20

PENDAHULUAN

Sampah makanan (*food wastage*) merupakan sampah yang berasal dari makanan yang diproduksi untuk konsumsi manusia tetapi terbuang atau rusak sebelum dikonsumsi sepanjang rantai pasokan pangan. Sampah ini terdiri atas *food loss*, yaitu limbah makanan yang berasal dari bahan pangan seperti sayuran, buah-buahan, atau bahan mentah lainnya yang sudah tidak dapat diolah menjadi makanan yang akhirnya terbuang, dan *food waste*, yaitu limbah dari makanan yang sudah siap dikonsumsi tetapi justru dibuang tanpa dimanfaatkan, sehingga akhirnya menumpuk di tempat pembuangan akhir (TPA) (*Zero Waste Indonesia*, 2021).

Setiap tahun, sepertiga dari total makanan di dunia hilang atau terbuang (*World Food Programme*, 2019), dan Indonesia menjadi salah satu penyumbang terbesar, dengan limbah makanan mencapai 20.800.000 ton per tahun atau sekitar 40–45% dari total sampah nasional (Satyawati *et al*., 2024). Rata-rata setiap orang di Indonesia membuang 115–184 kg sampah makanan rumah tangga per tahun (Bappenas, 2021), dan tanpa kebijakan pengendalian, angka ini diperkirakan naik hingga 344 kg per orang pada 2045. Selain rumah tangga, pasar tradisional menjadi penyumbang sampah makanan terbesar kedua, dengan kontribusi sekitar 20,9% (Al-Hanniya *et al*., 2022). Kondisi ini menempatkan

Indonesia sebagai negara dengan tingkat *food loss and waste* (FLW) tertinggi di Asia Tenggara (*United Nations Environment Programme*, 2024), dan kedua di dunia.

Pasar Horas Kota Pematangsiantar adalah salah satu pasar tradisional terbesar di Sumatera Utara, dengan luas mencapai 146 meter × 104 meter yang terdiri dari empat gedung (Dinas Pasar Horas Kota Pematangsiantar, 2024). Pasar ini berperan sebagai pusat perdagangan dan distribusi pangan yang menyediakan berbagai kebutuhan pokok, seperti sayuran, buah-buahan, daging, dan produk olahan lainnya. Berdasarkan hasil wawancara dengan koordinator petugas kebersihan pasar diperoleh rata-rata timbulan sampah yang dihasilkan setiap hari dari gedung 1-4 pasar Horas mencapai 6 ton, dimana 30% dari total seluruh sampah merupakan sampah anorganik, sedangkan 70% lainnya merupakan sampah organik. Dan dari keseluruhan sampah organik yang dihasilkan, 40% adalah limbah sayuran yang merupakan penyumbang terbesar sampah organik, dan 60% lainnya adalah limbah buah-buahan dan sisa makanan dengan masing-masing sebesar 30%. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada limbah sayuran karena memiliki tingkat pembusukan yang cepat, volume yang tinggi, serta potensi untuk dimanfaatkan kembali, misalnya sebagai kompos atau pakan ternak.

Tingginya jumlah timbulan sampah makanan yang dihasilkan setiap hari disebabkan adanya ketidaksesuaian antara distribusi bahan pangan dengan kebutuhan konsumsi masyarakat, kondisi pasar yang padat dan kurang terorganisir dikarenakan kedudukan pasar Horas sebagai salah satu pasar utama di kota Pematangsiantar, serta kebiasaan pedagang yang cenderung menyortir produk mereka berdasarkan tampilan fisik, sehingga sayuran yang tampak kurang segar atau memiliki bentuk yang tidak sempurna dianggap tidak layak jual dan akhirnya dibuang. Seluruh sampah yang dihasilkan pasar Horas akan dibuang secara langsung ke tempat pembuangan sementara (TPS) yang berada di sekitar pasar tersebut yang kemudian akan diangkut dan dibuang ke TPA Tanjung Pinggir Kota Pematangsiantar yang berjarak sekitar $\pm$5 km dari pasar tersebut, sehingga mengakibatkan penumpukan sampah. Hal ini akan berdampak pada lingkungan (menghasilkan GRK), ekonomi (mengurangi pendapatan), dan sosial (ketahanan pangan).

Berdasarkan urgenisitas tersebut, maka perlu mengkaji sampah makanan yang dihasilkan oleh Pasar Horas Kota Pematangsiantar dan mengevaluasi strategi distribusi sampah makanan melalui pendekatan yang lebih sistematis dan berbasis data yang dapat digunakan dalam membuat kebijakan pengelolaan sampah makanan yang lebih efisien, khususnya limbah sayuran untuk mengurangi sampah makanan di Pasar Horas Kota Pematangsiantar. Evaluasi skenario distribusi sampah makanan yang melibatkan hubungan antar variabel jangka panjang lebih tepat dilakukan dengan simulasi sistem dinamik. Model ini, yang didasarkan pada *stock*, *flow*, umpan balik, dan penundaan waktu, membantu peneliti memahami faktor-faktor penyebab limbah makanan di pasar dan menguji dampak berbagai skenario pengelolaan. Hasilnya dapat menjadi acuan bagi pengambil kebijakan di Pasar Horas Kota Pematangsiantar untuk merumuskan strategi pengurangan sampah makanan yang lebih efektif dan terencana.

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan permasalahan sampah makanan menggunakan model berbasis sistem dinamik. Salah satu diantaranya adalah penelitian yang dilakukan oleh (Tamara *et al*., 2020), yang meneliti pengelolaan *food waste* di jaringan *grocery store* dengan sistem dinamis. Pada studi ini diperoleh bahwa daya tahan produk berpengaruh terhadap jumlah *food waste*, dan kebijakan perusahaan, yaitu melakukan proses ulang dan diskon untuk meningkatkan *profit*, dinilai cukup efektif dalam menguranginya. Selain itu, ada juga penelitian yang dilakukan oleh (Suryakusuma, 2024) yang berjudul *A System Dynamics Approach for Organic Waste Management in Traditional Market*. Studi ini merancang pengelolaan sampah organik di Pasar Tempel, Selman, dengan larva *Black Soldier Fly* (BSF). BSF dapat mengurangi 320.000 kg sampah dalam 5 tahun dan menghasilkan pakan ternak serta pupuk. Investasi balik modal dalam 11 bulan, sehingga dinilai layak dan efektif.

Model simulasi (*stock and flow diagram*) yang digunakan pada kedua referensi di atas berbeda-beda. Pada referensi pertama (Tamara *et al*., 2020), modelnya berupa dinamik dari *stock* produk segar ke *stock* produk yang diolah dan diskon, kemudian menjadi *food waste*, dimana selama proses dinamiknya, faktor daya tahan, konsumsi, dan biaya juga diperhatikan. Kemudian pada referensi kedua (Suryakusuma, 2024), model simulasinya berupa dinamik sampah TPA yang diperoleh dari sampah pedagang dan penduduk yang pergi ke pasar. Dari kedua model tersebut, penelitian oleh (Tamara *et al*., 2020) akan dijadikan sebagai acuan dalam membangun model dasar dalam penelitian ini dikarenakan sesuai dengan skema timbulnya limbah sayuran pada kondisi *existing* di Pasar Horas Kota Pematangsiantar, sedangkan untuk model penelitian oleh (Suryakusuma, 2024) akan digunakan sebagai referensi dalam membangun skenario baru pada model dasar. Berdasarkan pemaparan diatas, maka akan dilakukan penelitian menggunakan model simulasi sistem dinamik untuk menentukan skenario distribusi kebijakan yang paling efektif dalam mengurangi sampah makanan, khususnya sampah sayuran di Pasar Horas Kota Pematangsiantar.

© Jurusan Matematika - Universitas Negeri Medan

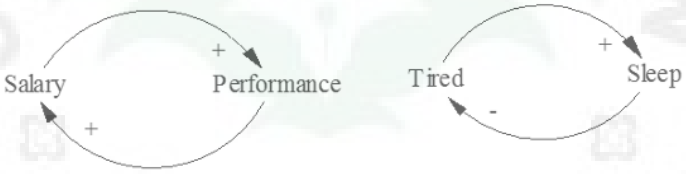
METODE PENELITIAN

Sistem dinamik pertama kali diperkenalkan oleh Professor Jay Forrester dari universitas *Massachusetts Institute of Technology* pada pertengahan tahun 1950. Sistem dinamik membantu mengidentifikasi variabel yang memengaruhi sistem kompleks. Secara umum, sistem ini memodelkan masalah nyata secara matematis menggunakan persamaan diferensial dengan parameter yang saling berhubungan. Perubahan dalam sistem dinamik dipengaruhi oleh variabel yang saling terkait dan berkembang seiring waktu (Sinaga *et al*., 2021).

Model sistem dinamik menganalisis hubungan dan perilaku sistem kompleks yang terdiri dari variabel dan *feedback loop*. Pemodelan proses kompleks biasanya dimulai dengan diagram *loop* kausal untuk memvisualisasikan bagaimana variabel dalam suatu sistem saling terkait. Diagram ini kemudian diubah menjadi diagram stok-dan-aliran, yang merupakan dasar dari pemodelan dinamika sistem, yang terdiri dari stok, aliran, parameter dan hubungan di antara mereka yang diwakili oleh fungsi dan/atau konverter. Sistem dinamik memiliki beberapa variabel untuk mempermudah dalam mengalkulasi model yang berisikan formulasi matematis.

Penelitian ini berupa "studi kasus" di Pasar Horas Kota Pematangsiantar. Untuk pengumpulan data, peneliti menggunakan teknik pengumpulan dan riset lapangan (*field research*), yaitu suatu metode penelitian yang dilakukan secara langsung untuk mencari data yang dibutuhkan untuk bahan penulisan. Adapun tahapan-tahapan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut: (1) identifikasi kondisi dan permasalahan sampah makanan, khususnya limbah sayuran di Pasar Horas Kota Pematangsiantar; (2) studi literatur dari sumber-sumber pendukung; (3) pengumpulan data mengenai variabel yang dibutuhkan dalam tahap identifikasi variabel dengan cara observasi, wawancara, dan dokumentasi; dan (4) identifikasi variabel dan parameter yang akan menjadi *input* pada tahap penyusunan *causal loop diagram*.

Diagram *Loop* Sebab-Akibat (*Causal Loop Diagram*) atau diagram kausatik direpresentasikan oleh struktur *feedback* dari sistem. Komponen dalam CLD ini berupa variabel-variabel yang dihubungkan dengan *link* $(\rightarrow)$, dimana notasi polaritas pada ujung *link* berupa tanda $(+)$ atau $(-)$. Berikut ilustrasinya:

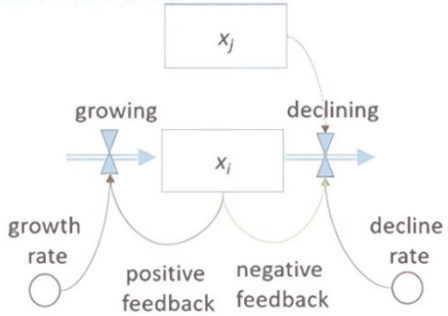


Gambar 1. Contoh Diagram Kausatik (Audianto, 2019)

Pembuatan model matematis atau *stock-flow diagram* yang mengadaptasi penelitian oleh (Tamara *et* al., 2020) dengan memodifikasi variabel dan struktur sesuai kondisi distribusi sampah makanan di Pasar Horas Kota Pematangsiantar yang menggambarkan keterkaitan antar variabel dalam sistem. Model dirumuskan melalui persamaan berbasis data yang diolah menggunakan Vensim PLE 10.2.2. Diagram alir (*stock and flow diagram*) disingkat SFD merupakan representasi struktur sistem secara rinci. *Stock* merupakan akumulasi yang dapat bertambah dan berkurang, sedangkan *flow* adalah proses yang menyebabkan *stock* bertambah atau berkurang. Berikut bentuk umum SFD:



Gambar 2. Contoh *Stock and Flow Diagram* (SFD) (Baralangi, 2021)



Gambar 3. Ilustrasi Diagram *Stock and Flow* Mewakili Persamaan Diferensial (Dorgo *et al*., 2018)

Diagram *stock and flow* memiliki makna matematis yang tepat. Stok mengakumulasi (mengintegrasikan) aliran masuknya dikurangi aliran keluarnya. Laju perubahan stok adalah total aliran masuk dikurangi total aliran keluar. Dengan demikian, peta *stock and flow* sesuai dengan sistem persamaan integral atau diferensial. Rumus perhitungan matematika dari *stock and flow* adalah sebagai berikut (Arnandy, 2018):

Rumus *Stock*:

$$stock(t_1) = stock(t_0) + inflows(t_0, t_1) - outflows(t_0, t_1) \quad (1)$$

Differential Equation:

$$\frac{dStock}{dt} = NetChange\ in\ Stock = Inflow(t) - Outflow(t) \quad (2)$$

Integral Equation:

$$Stock(t) = \int_{t_0}^{t} [Inflow(s) - Outflow(s)]ds + Stock(t_0) \quad (3)$$

Atau dalam Notasi Vensim:

$$Stock = INTEG(Inflow - Outflow, Stock_{t_0}) \quad (4)$$

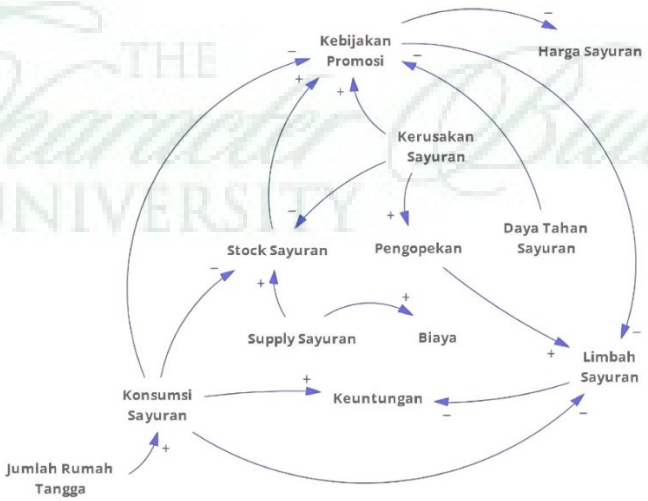
Deskripsi matematis suatu sistem hanya memerlukan stok dan laju perubahannya. Akan tetapi, sering kali *berguna* untuk mendefinisikan variabel antara atau variabel pembantu. Variabel pembantu terdiri dari fungsi stok dan konstanta. Pemodelan sistem dinamik yang menggunakan *stock-flow diagram* memiliki besaran-besaran pokok yang berupa variabel *level*, *rate, auxiliary*, konstanta, sumber dan penampung, dan garis penghubung.

Pengujian model melalui tahap verifikasi dan validasi model. Tahap ini bertujuan untuk menghasilkan model simulasi yang telah teruji kebenarannya dalam menggambarkan model aktual dengan benar. Apabila model simulasi telah dinyatakan valid maka dapat dilanjutkan ke tahap selanjutnya, namun apabila model simulasi gagal dinyatakan valid maka proses kembali ke tahap pembuatan *causal loop diagram* untuk menyusun ulang model simulasi. Memodelkan skenario baru pada kondisi *existing* guna mengurangi timbulan sampah pasar yang dihasilkan. Analisis hasil untuk memperoleh model pendukung keputusan dalam mengatasi permasalahan timbulan sampah makanan di Pasar Horas Kota Pematangsiantar dari skenario yang paling efektif dan menghasilkan *output* terbaik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Model Sistem Dinamik

Pada tahap ini akan dibentuk *causal loop diagram* (CLD) dan *stock and flow diagram* (SFD), yang merupakan model matematis yang menggambarkan keterkaitan antar variabel dalam sistem. CLD dan SFD dalam penelitian ini merupakan adaptasi dari penelitian oleh (Tamara *et al*., 2020), dengan memodifikasi variabel dan struktur sesuai kondisi distribusi sampah makanan di Pasar Horas Kota Pematangsiantar. Model dirumuskan melalui persamaan berbasis data yang diolah menggunakan Vensim PLE 10.2.2.

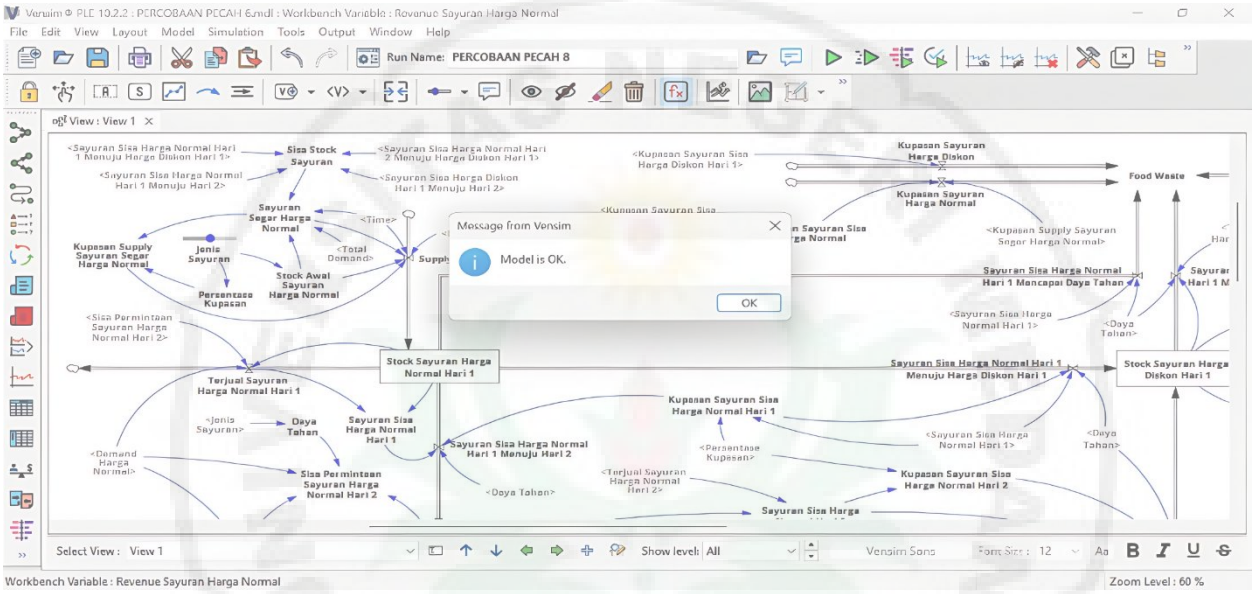


Gambar 4. *Causal Loop Diagram* Kondisi *Existing*

Dalam pembuatan *Causal Loop Diagram* (CLD), dilakukan *brainstorming* dan observasi untuk menentukan variabel yang mempengaruhi timbulnya *food waste* sayuran yang ada di Pasar Horas Kota Pematangsiantar. Wawancara dilakukan

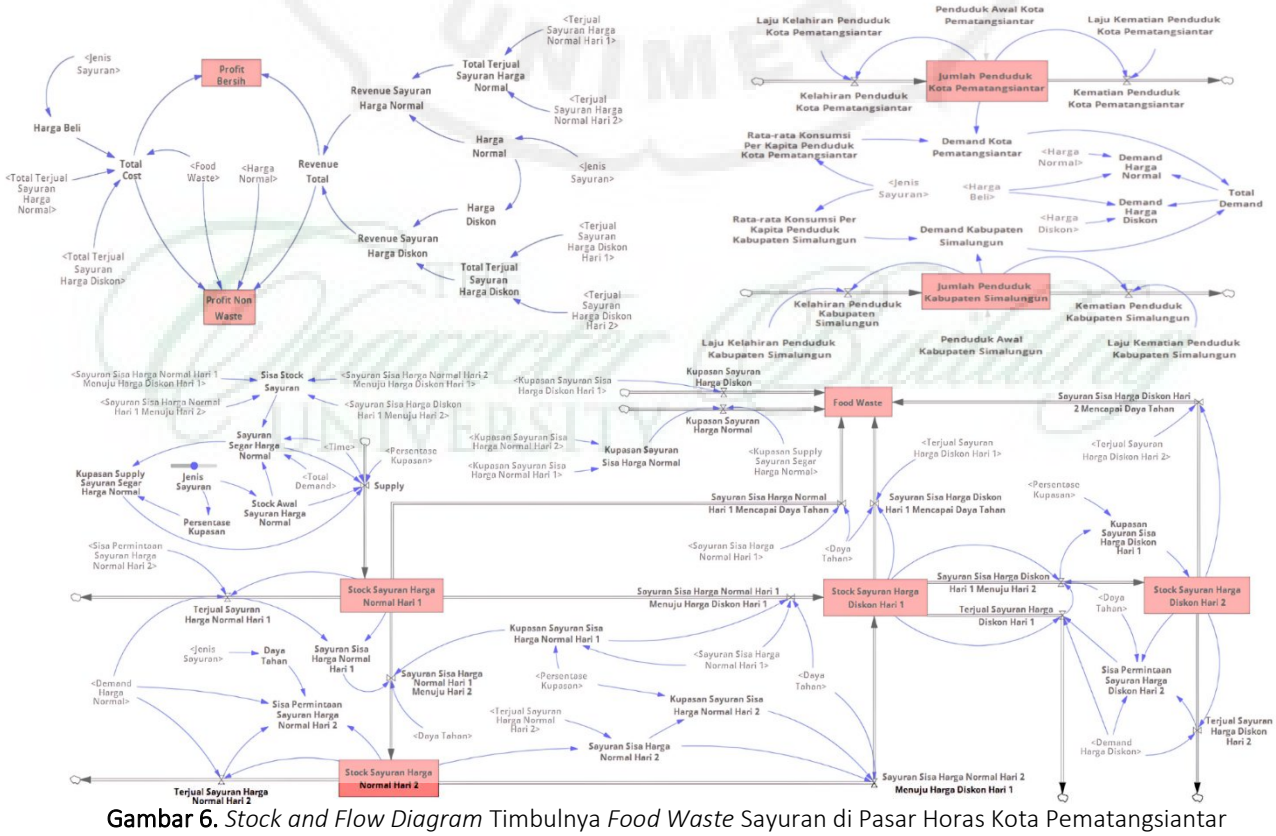
dengan koordinator petugas kebersihan dan para pedagang sayur di pasar Horas Kota Pematangsiantar untuk memperoleh data yang diperlukan. Berikut adalah variabel yang digunakan dalam CLD pada skenario *existing*.

Stock and flow diagram untuk skenario *existing* pada distribusi sampah makanan sayuran di Pasar Horas Kota Pematangsiantar dapat dilihat pada Gambar 6. Setiap variabel yang telah didefinisikan akan memiliki formulasi yang berbeda-beda. Formulasi untuk setiap variabel dibuat dengan menggunakan operasi matematika berdasarkan kondisi aktual yang terjadi dan data terkait. Pengujian model untuk mengetahui keakuratan dari model SFD yang telah dibangun tersebut, maka akan dilakukan pengujian model simulasi yang terdiri atas dua tahap, yaitu verifikasi model dan validasi model.



Gambar 5. Tampilan Model Terverifikasi di Vensim PLE 10.2.2

Gambar 5 di atas menampilkan *Message from Vensim* bertuliskan "Model is OK" yang berarti model sudah berjalan dengan baik tanpa *error* pada formulasinya, sehingga dapat disimpulkan model telah terverifikasi.



Gambar 6. *Stock and Flow Diagram* Timbulnya *Food Waste* Sayuran di Pasar Horas Kota Pematangsiantar

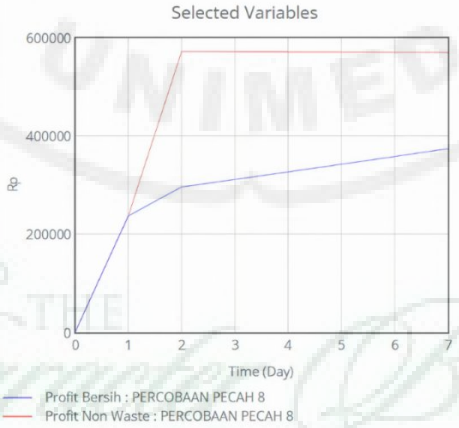
Kemudian Validasi Model diuji menggunakan 3 jenis uji yaitu; (1) Extreme Condition Test; (2) Parameter Condition; dan (3) Uji Nilai MAPE.



Gambar 7. Hasil Simulasi *Stock* Sayuran Segar pada Kondisi Ekstrem

Grafik pada Gambar 7 menunjukkan bahwa ketika nilai variabel *supply* dimisalkan bernilai 0, maka variabel *stock* sayuran harga normal hari 1, sayuran sisa harga normal hari 1 mencapai daya tahan, sayuran sisa harga normal hari 1 menuju harga diskon hari 1, sayuran sisa harga normal hari 1 menuju hari 2, dan terjual sayuran harga normal juga akan bernilai 0, hal ini dikarenakan tidak adanya *input* dari variabel *supply* untuk memenuhi *demand* (permintaan) penduduk kota Pematangsiantar dan kabupaten Simalungun.

Uji parameter condition bertujuan untuk melihat hasil simulasi yang menunjukkan apakah hubungan antar variabel sesuai dengan kenyataan yang seharusnya. Variabel yang akan dibandingkan adalah variabel *profit* bersih dan *profit non waste*. Hasil simulasinya dapat dilihat pada grafik di bawah ini.



Gambar 8. Perbandingan *Profit* Bersih dan *Profit Non Waste*

Grafik pada Gambar 8 menunjukkan bahwa *profit non waste* mengalami peningkatan terus-menerus seiring waktu, sedangkan *profit* bersih mengalami penurunan. Hasil ini membuktikan bahwa semakin banyak sayuran yang terbuang, semakin besar kerugian finansial yang terjadi. Peningkatan limbah yang tidak terkendali dapat menyebabkan penurunan *profit* secara signifikan, sehingga diperlukan strategi manajemen stok dan pengurangan pemborosan untuk meningkatkan efisiensi dan profitabilitas.

Setelah model disimulasikan dalam Vensim, maka akan dilakukan perhitungan nilai MAPE untuk jumlah limbah sayuran selama 7 hari di Pasar Horas Kota Pematangsiantar. Berikut akan ditampilkan data aktual dan hasil simulasi jumlah limbah sayuran per hari dan jumlah keseluruhan dalam 1 Minggu di Pasar Horas Kota Pematangsiantar. Dari hasil uji validitas menggunakan MAPE pada Tabel 1 dan Tabel 2, tingkat kesalahan untuk hasil simulasi jumlah limbah sayuran per hari sebesar 25,85%, yang menunjukkan hasil pemodelan yang wajar, sedangkan untuk tingkat kesalahan hasil simulasi jumlah limbah sayuran dalam 1 Minggu sebesar 0,00654%, yang menunjukkan hasil pemodelan yang sangat akurat. Hal

ini menunjukkan bahwa model dapat menggambarkan sistem sebenarnya. Maka berdasarkan ketiga uji tersebut terbukti bahwa hasil simulasi model sudah akurat, sesuai kenyataan, dan dapat diterima. Maka dapat disimpulkan bahwa model SFD pada penelitian ini telah tervalidasi.

Tabel 1. Validasi Hasil Simulasi Jumlah Limbah Sayuran Per Hari dalam 1 Minggu dengan MAPE

Hari	Data Aktual	Data Simulasi	*error*	ABS	
1	1.680	1.084,8	595,2	595,2	0,35
2	1.680	1.838,1	-158,1	158,1	0,09
3	1.680	1.879,2	-199,2	199,2	0,11
4	1.680	2.106,9	-426,9	426,9	0,25
5	1.680	1.201,2	478,8	478,8	0,28
6	1.680	2.440,6	-760,6	760,6	0,45
7	1.680	1.209,6	470,4	470,4	0,28
				Total	1,81
				MAPE	0,2585
				Percent Error	25,85%

Tabel 2. Validasi Hasil Simulasi Jumlah Keseluruhan Limbah Sayuran dalam 1 Minggu dengan MAPE

Data Aktual	Data Simulasi	*error*	ABS	MAPE
11.760	11.760,77	-0,77	0,77	0,0000654
			Percent Error	0,00654%

Analisis Skenario

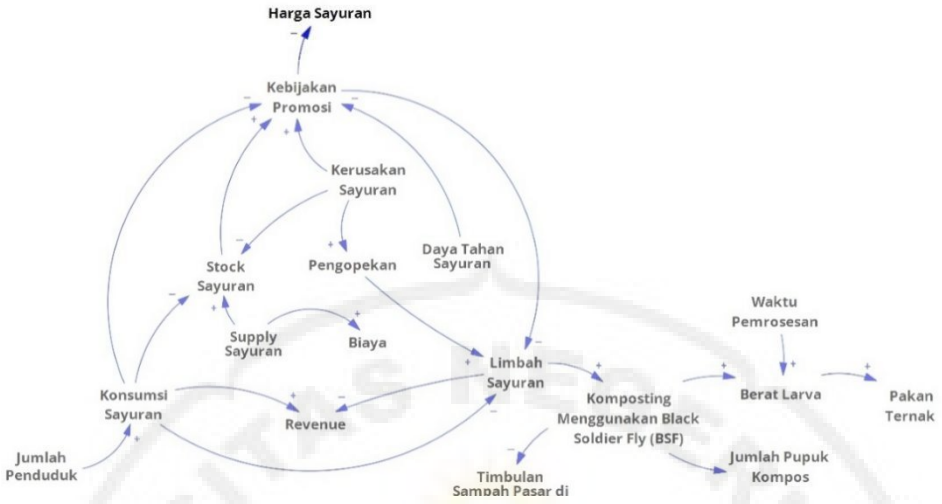
Tingginya jumlah *food waste* sayuran yang dihasilkan (dapat dilihat pada data simulasi Tabel 1 dan Tabel 2) menunjukkan bahwa kebijakan yang dilakukan oleh dinas Pasar Horas Kota Pematangsiantar untuk mengurangi jumlah *food waste*, khususnya limbah sayuran belum optimal. Oleh karena itu, perlu dilakukan peningkatan model SFD pada kondisi *existing* melalui proses skenariosasi. Pengembangan skenario baru dalam penelitian ini merujuk pada penelitian oleh (Suryakusuma, 2024) mengenai *A System Dynamics Approach for Organic Waste Management in Traditional Market*. Terdapat 2 skenario baru yang dikembangkan, yaitu:

Pada skenario pertama akan dilakukan teknik komposting dengan menggunakan larva *Black Soldier Fly* (BSF). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Suryakusuma, 2024), pada skenario ini akan dirancang 9 rak desain pengembangan dengan masing-masing rak 5 biopond sebagai tempat pengelolaan sampah organik oleh larva BSF. Namun sebelumnya sampah organik yang akan diolah harus sudah dirajang terlebih dahulu. Berikut diagram *loop* kausal dan *stock-flow* untuk skenario pertama yang diusulkan.

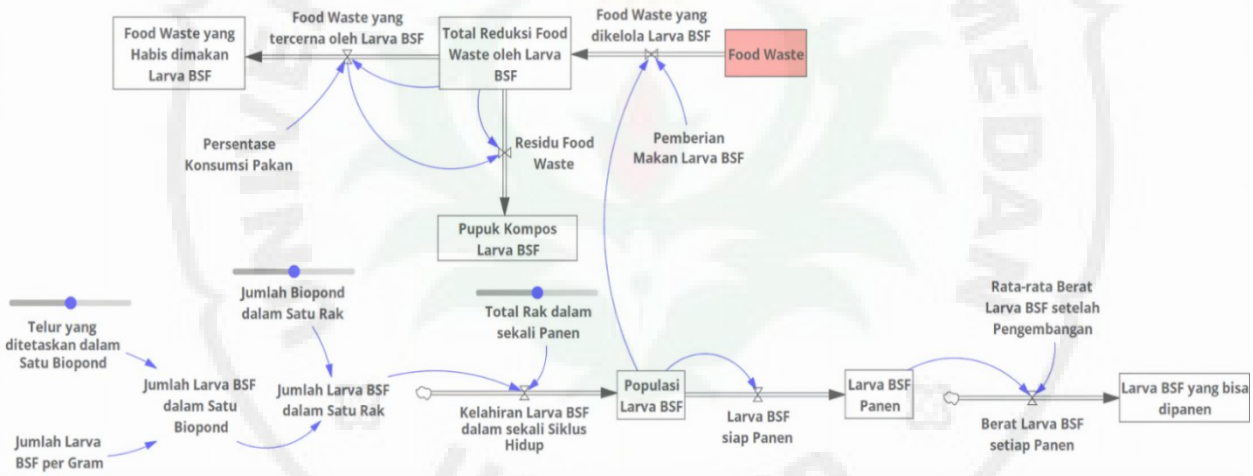
Model SFD pada Gambar 10 beserta formulasinya akan menghitung jumlah food waste, pupuk kompos, dan pakan ternak yang dihasilkan oleh larva BSF. Pada skenario ini akan disimulasikan 3 desain pengembangan yang berbeda, dimana desain pengembangan yang pertama mengikuti rancangan penelitian oleh (Suryakusuma, 2024) yang menggunakan 9 rak dengan masing-masing rak 5 biopond. Untuk desain pengembangan yang kedua dan ketiga penulis akan mengubah jumlah rak dan biopond secara bergantian, namun hanya salah satunya saja, dimana jika jumlah biopond diubah maka jumlah rak akan tetap seperti sebelumnya, dan begitu sebaliknya. Kemudian akan dicari jumlah yang paling meminimalkan sisa food waste serta menghasilkan pupuk kompos dan pakan ternak yang lebih banyak.

Setelah dilakukan beberapa percobaan, diperoleh hasil bahwa desain pengembangan kedua terdiri atas 9 rak dengan masing-masing rak 14 biopond, sedangkan untuk desain pengembangan ketiga terdiri atas 25 rak dengan masing-masing rak 5 biopond. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan diperoleh bahwa desain pengembangan kedua yang terdiri atas 9 rak dengan masing-masing rak 14 biopond lebih optimal dalam meminimalkan sisa *food waste*. Selain itu jumlah pupuk kompos dan pakan ternak yang dihasilkan juga lebih banyak dibanding desain pengembangan yang pertama dan ketiga.

Pada skenario kedua akan dilakukan teknik vermikomposting dengan menggunakan cacing tanah *Lumbricus rubellus*. Desain pengembangan yang diusulkan ini mirip dengan skenario pertama yang menggunakan larva BSF, yaitu merancang 9 rak pengembangan, namun terdapat perbedaan ukuran rak pengembangan sehingga jumlah biopond di masing-masing rak hanya ada 2 biopond sebagai tempat pengelolaan sampah organik (namun telah dicincang sebelumnya) oleh cacing tanah *Lumbricus rubellus*. Adapun untuk diagram *loop* kausal dan *stock-flow* pada skenario kedua ini sama dengan skenario pertama, hanya berbeda di penamaan dan nilai variabel serta parameter yang digunakan.



Gambar 9. CLD Skenario Komposting Menggunakan Larva *Black Soldier Fly* (BSF)



Gambar 10. Skenario Peningkatan SFD *Existing* Menggunakan Larva BSF

Pada skenario ini juga akan disimulasikan 3 desain pengembangan yang berbeda. Untuk desain pengembangan yang pertama akan mengikuti rancangan penelitian oleh (Suryakusuma, 2024) yaitu menggunakan 9 rak dengan masing-masing rak 2 biopond. Kemudian untuk desain pengembangan yang kedua dan ketiga masing-masing terdiri atas 9 rak dengan masing-masing rak 206 biopond dan 929 rak dengan masing-masing rak 2 biopond. Jumlah ini diperoleh setelah melakukan beberapa percobaan simulasi dan mendapatkan hasil yang paling meminimalkan sisa *food waste* serta menghasilkan pupuk kompos dan pakan ternak yang paling banyak. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh bahwa desain pengembangan ketiga yang terdiri atas 929 rak dengan masing-masing rak 2 biopond lebih optimal dalam meminimalkan sisa *food waste*. Selain itu jumlah pupuk kompos dan pakan ternak yang dihasilkan juga lebih banyak dibanding desain pengembangan yang pertama dan ketiga.

Kedua skenario yang diusulkan dapat memperbaiki skenario *existing* dengan mengurangi total limbah sayuran di tempat pembuangan sementara sampah Pasar Horas Kota Pematangsiantar. Akan tetapi kedua skenario ini hanya berfokus pada pengurangan limbah sayuran, sedangkan untuk limbah anorganik dan organik lainnya, seperti limbah buah-buahan dan sisa makanan belum ada pengurangan, dan hal ini menjadi batasan dalam penelitian ini. Hasil simulasi antara desain pengembangan yang ada di skenario 1 dan 2 akan dilakukan perbandingan, namun hanya menggunakan limbah sayuran di hari pertama saja dikarenakan jumlah komposting tiap hari sama.

Berdasarkan hasil simulasi diperoleh bahwa persentase komposting desain pengembangan yang digunakan dalam penelitian oleh (Suryakusuma, 2024) adalah yang paling kecil dibanding desain pengembangan lainnya yang memperoleh persentase $> 90\%$. Pada skenario pertama, desain pengembangan yang paling optimal adalah desain pengembangan kedua dengan persentase komposting sebesar 98,72%, sedangkan pada skenario kedua, desain pengembangan yang paling optimal adalah desain pengembangan ketiga dengan persentase komposting sebesar 99,91%, dimana hal ini juga menjadikannya yang paling optimal secara keseluruhan.

Hasil ini hanya berupa simulasi dan jika ingin diterapkan harus disesuaikan dengan lokasi pengelolaan limbah yang ada di Pasar Horas Kota Pematangsiantar. Dari desain pengembangan ini, dinas pasar juga dapat mengeluarkan produk baru dalam bentuk larva BSF atau cacing tanah *Lumbricus rubellis* hidup yang siap dijual untuk dijadikan sebagai pengganti pakan konvensional oleh peternak unggas dan ikan. Namun, perlu untuk melakukan uji ulang kandungan nutrisi hasil panen larva dan cacing tanah tersebut di tempat pembuangan sementara di masa depan.

KESIMPULAN

Simulasi kondisi *existing* menunjukkan tingginya timbulan *food waste* sayuran di Pasar Horas Kota Pematangsiantar, dimana dalam 7 hari total limbah sayuran yang dihasilkan mencapai 11.760,77 kg, dengan rata-rata sebesar 1.680,11 kg/hari. Mengatasi permasalahan tersebut maka diusulkan 2 skenario baru, yaitu komposting menggunakan larva *Black Soldier Fly* (BSF) dan vermikomposting menggunakan cacing tanah *Lumbricus rubellus*. Di antara kedua skenario tersebut, desain pengembangan pada skenario kedua adalah yang paling optimal, yaitu desain pengembangan ketiga. Namun, pada skenario 2 jumlah rak yang dibutuhkan sangat banyak jika dibandingkan pada skenario 1. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh hanyalah sebatas simulasi dan jika ingin diterapkan harus disesuaikan dengan lokasi pengelolaan limbah yang ada di Pasar Horas Kota Pematangsiantar.

Pengelolaan limbah sayuran menggunakan larva BSF dan cacing tanah *Lumbricus rubellus* dapat menjadi sumber pendapatan baru bagi dinas pasar Horas. Limbah sayuran yang sebelumnya tidak memiliki nilai dapat diolah menjadi produk baru dalam bentuk larva BSF dan cacing tanah *Lumbricus rubellus*, serta pupuk organik yang dapat digunakan sebagai pakan ternak dan dijual. Dengan cara ini, limbah sayuran yang tidak memiliki nilai akan menjadi lebih berharga.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan ilmu, bantuan, dan dukungan, baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Al-Hanniya, U. H., & Purnomo, Y. S. (2022). Kuantifikasi dan Karakterisasi Timbulan Sampah Makanan (*Food Waste*) di Pasar Tradisional Kota Surabaya Timur. *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, *1*(6), 880-888.

Arnandy, D.A. (2018). "Pengembangan Model Sistem Dinamik Untuk Perencanaan Strategis Teknologi Informasi Dalam Rangka Mengembangkan Smart People Dan Smart Economy (Studi Kasus Di Surabaya)." Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Audianto, F.S. (2019). "Pengembangan Model Sistem Dinamik Untuk Meningkatkan Aksesibilitas Kendaraan Umum (Studi Kasus: Kota Surabaya)." Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Bappenas. (2021). *Food Loss and Waste in Indonesia Supporting The Implementation of Circular Economy and Low Carbon Development*. Diakses pada 27 November 2024, di GRASP 2030 | BAPPENAS Study Report: Food Loss and Waste in Indonesia Supporting The Implementation of Circular Economy and Low Carbon Development.

Baralangi, E.M. (2021). "Model Simulasi Sistem Dinamik Untuk Analisis Pengoptimalan *Revenue* Site Benteng_Somba_Opu_Sns_Ag *Micro Cluster* (MC) Makassar Kota 1." Makassar: Universitas Hasanuddin.

Dorgo, G., Honti, G., & Abonyi, J. (2018). "Automated analysis of the interactions between sustainable development goals extracted from models and texts of sustainability science". *Chemical Engineering Transactions*, *70*, 781-786.

Satyawati, N. G. A. D., Suyatna, I. N., Gede Arya Sumerta Yasa, P., Palguna, I., & Rajaratnam, N. (2024). "Regulating *Food Waste* Management In Indonesia: Do We Need An Omnibus Law (Again)?". *Indonesia Law Review*, *14*(1), 3.

Sinaga, L.P., Kartika, D., and Nasution, H. (2021). *Pengantar Sistem Dinamik*. Amal Insani Publisher.

Suryakusuma, M. (2024). *A System Dynamics Approach for Organic Waste Management in Traditional Market* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Indonesia).

Tamara, V., Mulyana, I. J., & Gunawan, I. (2020). Pemodelan pengelolaan *Food Waste* di jaringan *grocery store* dengan sistem dinamis. *Widya Teknik*, *19*(1), 49-58.

United Nations Environment Programme. (2024). "*Food Waste* Index Report 2024. Think Eat Save: Tracking Progress to Halve Global *Food Waste*". Diakses pada 27 November 2024, pada *Food Waste Index Report 2024. Think Eat Save: Tracking Progress to Halve Global Food Waste*.

World Food Programme. (2019). "1.3 Billion Reasons to #StopTheWaste". Diakses pada 27 November 2024, pada *1.3 billion reasons to #StopTheWaste | World Food Programme*.

Zero Waste Indonesia. (2021). Apa Perbedaan *Food Loss* dan *Food Waste*? Diakses pada 27 November 2024, pada *Apa Perbedaan Food Loss dan Food Waste? - Zero Waste* Indonesia.

© Jurusan Matematika - Universitas Negeri Medan