

Perancangan Algoritma Tata Letak Penempatan Barang dengan Mempertimbangkan Kombinasi Penumpukan Barang Terhadap Konsumsi Energi *Material Handling Forklift*

Design of The Layout Algorithm of The Placement of Goods Taking Into Account the Combination of Piles of Goods Against Energy Consumption Material Handling Forklift

Ari Setiawan^{1*}, Jamont Criston Sihombing²

¹Program Studi Teknik Industri dan Program Studi Manajemen Rantai Pasok, Institut Teknologi Harapan Bangsa, Bandung

²Program Studi Manajemen Rantai Pasok, Institut Teknologi Harapan Bangsa, Bandung

*Penulis korespondensi: Ari Setiawan, ari_setiawan@ithb.ac.id

Abstrak

Metode heuristik merupakan teknik pencarian solusi dengan waktu yang cepat dan mendekati nilai optimal. Metode block stacking adalah metode peletakan barang dengan cara ditumpuk secara vertikal dan horizontal. Pada penelitian ini dilakukan perhitungan jumlah konsumsi energi di setiap penumpukan barang pada proses put away dan picking di area gudang. Pada kasus di area gudang, perlu diperhatikan posisi penumpukan barang berdasarkan aspek volume dan berat. Penumpukan barang yang tidak sesuai, dimana barang yang lebih berat ditempatkan di bagian atas dari tumpukan akan menimbulkan risiko pada kerusakan barang yang berada di bawahnya, kerugian biaya inventori dan tingginya konsumsi energi material handling forklift. Algoritma yang digunakan dimulai dari menghitung jumlah kombinasi penumpukan yang bergantung pada banyaknya permintaan, memperhatikan kapasitas penumpukan yang bergantung pada ukuran barang dan ukuran pallet, menentukan syarat pemilihan barang untuk ditumpuk berdasarkan volume, berat dan konsumsi energi pada material handling forklift. Oleh karena itu fokus utama dari penelitian ini adalah melakukan perancangan algoritma tata letak kombinasi penumpukan barang dengan memperhatikan jenis barang terhadap energi dan menguji beberapa algoritma lainnya. Dari hasil perancangan yang sudah dilakukan, kriteria pemilihan algoritma yang digunakan berdasarkan jumlah konsumsi energi yang terkecil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma 1 menghasilkan jumlah konsumsi energi terkecil, yaitu 38,880,767 joule, sedangkan algoritma 2 menghasilkan jumlah konsumsi energi sebesar 56,272,982 joule dan algoritma 3 yaitu sebesar 75,148,190 joule.

Kata kunci: Algoritma Tata Letak Barang, Block Stacking, Heuristik, Kombinasi, Konsumsi Energi

Abstract

Heuristic methods are solution search techniques with a fast time and close to optimal value. The Block stacking method is of laying goods by stacking vertically and horizontally. In this study, the calculation of the amount of energy consumption in each stack of goods for the allocation of selected goods in putting away and picking process in warehouse area. In the case of this warehouse area, it is necessary to pay attention to the position of the accumulation of goods based on aspects of volume and weight. Improper stacking of goods, where heavier items are placed at the top of the pile will pose a risk to the damage to the goods below, cost losses inventory and the high energy consumption of the handling material forklift. The algorithms used start from calculating the number of stacking combinations that depend on the number of request, paying attention of stacking capacity depending on the size of the goods and pallet size, determine the requirements for the selection of goods to be stacked based on volume, weight and energy consumption in forklift material handling. Therefore the main focus of the research is to designing a combination of goods by paying attention to the type of goods to energy and testing several other algorithms. From the results of the design that has been done, the selection criteria of the algorithms used based on the lowest amount of energy consumption. There is an algorithm result

that has been done that algorithm 1 has a total energy consumption of 38,880,767 joules, algorithm 2 has an energy consumption of 56,272,982 joules and algorithm 3 with a consumption rate of 75,148,190 joules.

Keywords: Block Stacking, Combination, Energy Consumption, Heuristic, Items Layout Algorithm

Informasi Artikel:

Diterima tanggal 11 November 2021; Disetujui tanggal 28 Mei 2022; Terbit online tanggal 30 Juni 2022.

DOI: 10.28932/jis.v5i1.4165

1. Pendahuluan

Gudang merupakan salah satu hal yang dapat mempengaruhi *profit* perusahaan. Aktivitas pergudangan adalah untuk menjaga persediaan permintaan barang serta tempatnya alokasi akumulasi dalam kegiatan pendistribusian (Meldra, 2018). Dalam berbagai macam sektor industri, khususnya perusahaan yang memiliki variasi permintaan dan jenis-jenis produk dengan aktivitas di dalam gudang, terdapat proses-proses penyusunan dan tata cara penyimpanan barang di dalam gudang, maka barang-barang tidak boleh disimpan dengan keadaan sembarang, karena akan mengakibatkan lamanya waktu proses *put away* dan *picking*, kerugian biaya dan tingginya konsumsi energi yang dihasilkan oleh *material handling*. Proses *picking* merupakan bagian yang memberikan kontribusi terbanyak dari aktivitas pergudangan dengan jumlah konsumsi lebih dari 50% waktu dari seluruh aktivitas gudang, *receiving* 15%, *storage put away* 20% dan *delivery* 15% (Edward, 2002).

Perencanaan dan pengendalian fasilitas gudang juga harus dibuat lebih kompleks dalam layanan dan kualitas di suatu perusahaan industri, beberapa pengukuran layanan kualitas penting pada gudang yang berkaitan dengan persepsi konsumen diantaranya *on time delivery*, *time receiving*, *accurate and timely documentation*, *compliance with rules for loading and marking*, *internal organization and analysis customer complaints* (Kenneth B, 2017). Penyusunan barang di gudang dapat dilakukan dengan cara pemilihan penumpukan untuk mengetahui apakah barang dapat ditumpuk atau tidak dapat ditumpuk saat berat penumpukan barang tidak seimbang. Dengan melakukan penyusunan barang terpilih untuk ditumpuk, maka akan didapatkan hasil tata letak barang di gudang dan konsumsi energi *material handling forklift* disetiap satu penumpukan barang. Dalam penyusunan kombinasi penumpukan barang perlu dihitung juga yaitu jumlah frekuensi perpindahan *material handling forklift* terhadap barang dapat melalui dari seberapa banyak jumlah permintaan barang keluar masuk pintu gudang dengan mengkonversikan satuan barang ke dalam satuan energi joule per *pallet* per meter, sedangkan perhitungan jarak dengan menentukan titik pusat pengambilan barang di setiap area terpilih peletakan barang dan titik pusat dari tiap benda, sehingga akan didapatkan jarak perpindahan yang terjadi di dalam gudang. Metode yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan metode *block stacking*, *block stacking* adalah metode penataan barang di dalam gudang. Dalam metode ini, barang dapat ditumpuk ke arah atas vertikal dan disusun secara horizontal menjadi sebuah baris atau blok. Metode *block stacking* tidak memakan biaya karena tidak memerlukan penggunaan rak dan dapat dilakukan di berbagai tipe gudang dengan lahan terbuka luas (Hambali, 2009).

Barang dapat ditumpuk hanya dengan satu tumpukan berdasarkan faktor volume, berat dan kapabilitas *material handling forklift* di gudang. Pada penelitian ini mengacu pula pada karakteristik barang yaitu kriteria barang bawah tumpukan dan kriteria barang atas sebagai penumpuk menggunakan heuristik dalam penyusunan barang. Heuristik tersebut sebagai solusi dalam penyusunan tumpukan barang dan menentukan hasil optimal terhadap tingkat konsumsi energi. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian yang dilakukan yaitu merancang algoritma tata letak penumpukan barang dengan mempertimbangkan kombinasi penumpukan barang terhadap jumlah konsumsi energi dengan menguji solusi terbaik dari beberapa

algoritma penempatan penumpukan barang. Dengan demikian, penelitian ini merancang tiga algoritma yang mengacu pada volume dan berat barang. Terdapat algoritma 1 yaitu algoritma penumpukan barang berdasarkan volume, berat dan penumpukan barang terpilih. Algoritma 2 yaitu algoritma penumpukan barang berdasarkan volume dan berat yang sama. Algoritma 3 yaitu algoritma penumpukan barang berdasarkan satu jenis volume yang sama dan penyusunan dimulai dari berat terbesar.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Manajemen Gudang

Manajemen gudang adalah untuk memastikan kegiatan logistik perusahaan yang bertanggung jawab atas penyimpanan persediaan barang untuk melayani konsumen (Ross, 2015). Gudang digunakan untuk penyimpanan barang bahan baku (*Raw material*), barang setengah jadi (*Semi-finished goods*) dan barang jadi (*Finished goods*) baik dari pusat distribusi (*Distribution centers*) yang melayani ke gudang lokal ataupun suatu perusahaan yang memiliki gudang. Gudang juga digunakan untuk menyimpan varian inventori barang musiman untuk periode yang akan datang. Pergudangan melakukan beberapa aktivitas dasar yaitu manajemen pemesanan (*Order management*), penyimpanan persediaan (*Inventory storage*), penanganan bahan (*Materials handling*), dan transaksi informasi (*Information transfer*). Penyimpanan barang di gudang memberikan nilai (*Value*) pada pemasaran dan penjualan dengan memastikan bahwa barang tersedia untuk memenuhi permintaan konsumen.

2.2 Metode Penyimpanan Barang

Terdapat metode dalam penyimpanan barang, diantaranya sebagai berikut (Heldy, 2016):

- *Random Storage*
Implikasi metode ini adalah waktu pencarian barang lebih lama. *Random storage* memerlukan sistem yang baik, umumnya cara ini dilakukan pada sistem AS/RS (*Automated Storage/Retrieval System*).
- *Fixed Storage* atau *Dedicated Storage*
Aplikasi penempatan satu jenis barang atau *material* di tempat khusus hanya untuk bahan baku atau *material* tersebut. Kebijakan ini akan mengurangi waktu dalam pencarian barang, namun ruang yang dibutuhkan menjadi kurang efisien karena ruang kosong untuk satu bahan atau material tidak diperbolehkan untuk ditempati bahan atau *material* lainnya.
- *Class Based Storage*
Penempatan barang atau *material* berdasarkan atas kesamaan suatu jenis barang ke dalam suatu kelompok. Kelompok ini nantinya ditempatkan pada suatu lokasi khusus pada gudang. Kesamaan barang atau bahan pada suatu kelompok, bisa dalam bentuk satu jenis item yang sama atau kesamaan pada suatu daftar pemesanan konsumen.
- *Shared Storage*
Penempatan beberapa barang atau *material* dalam satu area yang dikhususkan untuk barang tersebut. Metode ini merupakan kebijakan untuk mengurangi jumlah kebutuhan luas gudang dan mampu untuk peningkatan utilisasi area penempatan persediaan.

2.3 Material Movement

Material dapat dipindahkan secara manual maupun dengan metode otomatis, *material* juga dapat dipindahkan satu kali ataupun berulang kali. *Material* dapat dialokasikan pada lokasi yang tetap maupun secara acak. Apabila terdapat dua buah area penempatan *i* dan *j* yang koordinatnya ditunjukkan sebagai (x_i, y_i) dan (x_j, y_j) , maka untuk e atau perpindahan *material* dapat dilihat sebagai berikut (Fabiani, 2019):

- *Rectilinear Distance*
Jarak diukur sepanjang lintasan dengan menggunakan garis tegak lurus (Orthogonal) satu dengan yang lainnya. Dapat menggunakan salah satu persamaan sebagai berikut:
$$d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (1)$$

- *Euclid Distance*
Jarak diukur sepanjang garis lurus antara dua buah titik. Jarak Euclidean dapat diilustrasikan sebagai *conveyor* lurus yang memotong dua buah area penempatan. Dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:
$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2)$$
- *Squared Euclidean Distance*
Jarak diukur sepanjang lintasan sebenarnya yang melintas antara dua buah titik. Dapat menggunakan persamaan berikut:
$$d_{ij} = [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2] \quad (3)$$
- *Aisle Distance*
Mengukur jarak aktual sepanjang lintasan yang dilalui oleh alat angkut pemindahan bahan.

2.4 Pergudangan

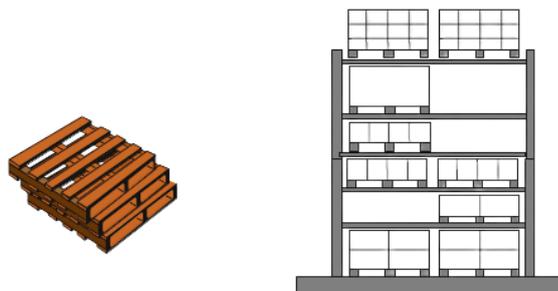
Terdapat beberapa proses dalam pergudangan yaitu *pre-receipt*, *receiving*, *put away* dan *picking*, dapat dilihat sebagai berikut (Gwynee, 2014):

- *Prereceipt*
Proses gudang untuk menentukan atau menyetujui penggunaan pengemasan barang, jumlah item per *pallet* dan pelabelan khusus antara pemasok dan konsumen terhadap identitas penerimaan dan penyimpanan barang.
- *Receiving*
Proses untuk memastikan barang telah masuk diterima dalam jumlah yang tepat, kondisi yang tepat dan waktu yang tepat.
- *Put away*
Proses ini mengalokasikan barang untuk barang dapat disimpan sesuai dengan area lokasi di dalam gudang.
- *Picking*
Proses pengambilan barang dari lokasi area penyimpanan barang.

2.5 Fasilitas Penempatan Barang

Terdapat beberapa jenis penyimpanan barang pada gudang, diantaranya sebagai berikut (Ross, 2015):

- *Open Floor Storage*
Jenis penyimpanan ini cocok untuk barang yang bermacam-macam bentuk ukuran. Dapat menggunakan *pallet* maupun rak dan diaplikasikan terhadap produk yang memiliki jumlah stok banyak dalam tata letak ruang gudang.
- *Pallet and Rack*
Tipe penyimpanan yang dirancang untuk memfasilitasi penyimpanan barang dalam jumlah banyak yang dapat ditempatkan di atas *pallet*. Dengan menentukan tinggi kapasitas *pallet* dan membutuhkan peralatan *pallet handling* khusus. Keuntungannya ialah kemudahan penyimpanan barang, kemampuan efisiensi lokasi menggunakan *pallet*, kemudahan control dan akurasi inventori serta aksesibilitas penempatan barang.



Gambar 1. *Pallet and rack*

- *Drive in/Double Deep Pallet Racks*

Rak *pallet* dirancang untuk menyimpan dua atau lebih *pallet* serta kapasitas *pallet* dalam layer rak. Rak *pallet* dapat mempermudah *material handling forklift* mengambil dan menyimpan barang ke rak antara tiang penyangga rak.

2.6 Konsumsi Energi

Kegiatan *material handling* untuk melakukan perpindahan bahan mencapai 50% - 70% dari total waktu produksi (Puspita, 2014). Dalam konsep *green supply chain management* terdapat proses untuk meningkatkan efisiensi pesanan di pergudangan. Dengan begitu, maka akan terjadi pengurangan penggunaan energi dan mempengaruhi *green warehouse*. *Green warehouse* merupakan pendekatan yang menerapkan ramah lingkungan atau penghijauan pada gudang dan proses distribusi. Pada proses *material handling* untuk penyimpanan pesanan barang dibutuhkan 55% jumlah penggunaan energi (dan biayanya) dari total biaya operasi gudang (Goran, 2010). Proses tersebut dapat dibagi menjadi tiga komponen yaitu waktu untuk perjalanan antar item, waktu pemilihan item dan waktu untuk aktivitas sisa lainnya.

2.7 Tata Letak

Penumpukan barang dengan mempertimbangkan berbagai ukuran khususnya berbentuk kubus dapat digunakan untuk memaksimalkan penggunaan *pallet* pada area tata letak gudang (G. Abdou, 2000). Area tata letak ditentukan berdasarkan jumlah gang (*aisle*) yang digunakan dan tingkat kedalaman penyimpanan barang di setiap tempat area barang, dengan begitu dapat untuk mengoptimasi pemanfaatan area gudang dan meminimalkan biaya *material handling* (Shahab, 2019). Penempatan produk pada gudang dengan mempertimbangkan volume, berat dan jumlah unit dapat meminimalkan konsumsi energi yang diperoleh menggunakan *forklift* pada gudang (Y. Martinus, 2020).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Variabel Penelitian

Berikut ini terdapat notasi untuk penumpukan barang di dalam gudang, yaitu:

1) Indeks

- a adalah area penempatan di dalam gudang
- b adalah berat barang
- k adalah kriteria barang
- u adalah unit barang
- v adalah volume barang
- x adalah arah penyusunan barang secara horizontal
- y adalah penumpukan barang secara vertikal

2) Parameter

- $AP_{u,v,b}$ adalah area terpilih penumpukan barang terhadap unit, volume dan berat
- $AP_{u,v,b,(x,y+1)}$ adalah terpilih penempatan terhadap unit, volume, berat di area selanjutnya pada sumbu $x = 1$ dan $y = 1$
- $KU_{v,b,bawah}$ adalah kriteria unit tumpukan volume dan berat barang bawah
- $KU_{v,b,atas}$ adalah kriteria unit tumpukan volume dan berat barang atas
- $U_{v,b,bawah}$ adalah jumlah unit penumpukan volume dan berat barang bawah
- $U_{v,b,atas}$ adalah jumlah unit penumpukan volume dan berat barang atas
- $Y_{v,b,u=0}$ adalah penumpukan kombinasi volume dan berat unit barang tidak terpilih

3) Variabel

- $KE_{mh,v,b,x,y}$ adalah konsumsi energi *material handling* terhadap volume, berat barang, dan jarak $x = 1, y = 1$ pada area penempatan barang
- $F_{x,y}$ adalah frekuensi *put away* dan *picking* pada sumbu $x = 1$ dan $y = 1$ di setiap area penempatan barang

- $Td_{v,b,x,y}$ adalah total jarak terhadap volume, berat, jarak $x = 1$ dan $y = 1$ pada area penempatan barang
 - $UTE_{v,b,x,y}$ adalah total konsumsi energi dari volume, berat, jarak $x = 1$ dan $y = 1$ pada area penempatan barang
 - $Y_{v,b,u=1}$ adalah penumpukan kombinasi volume dan berat unit barang terpilih
- 4) Variabel Keputusan
- $AP_{v,b,x,y} \begin{cases} 1, & \text{Jika area penempatan barang terpilih} \\ 0, & \text{Jika area penempatan barang tidak terpilih} \end{cases}$
 - $Y_{v,b,u} \begin{cases} 1, & \text{Jika penumpukan barang terpilih} \\ 0, & \text{Jika penumpukan barang tidak terpilih} \end{cases}$

3.2 Data Hipotetik

Pada penelitian ini digunakan data hipotetik untuk ukuran barang berbentuk kubus. Barang-barang tersebut memiliki 3 ukuran volume, yaitu: (v_1) volume kecil, (v_2) volume medium dan (v_3) volume besar serta 3 ukuran berat, yaitu: (b_1) berat ringan, (b_2) berat sedang dan (b_3) sangat berat, dengan dimensi ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Data Ukuran Barang

Unit Barang			
Volume (p x l x t)	Rusuk (Cm)	Berat (Kg)	Beban (Kg)
v_1	40	b_1	100
v_2	60	b_2	150
v_3	120	b_3	400

Data permintaan akan digunakan sebagai jumlah penumpukan barang di dalam gudang, ditunjukkan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Data Demand

Demand			
Level	v_1	v_2	v_3
b_1	90	100	200
b_2	90	120	220
b_3	90	140	240

Dalam setiap penumpukan barang pada *pallet* yang diangkut oleh alat *material handling forklift* jenis Toyota 8FD80N terdapat jumlah konsumsi energi *forklift* yang dikeluarkan untuk setiap unit barang, seperti ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Konsumsi Energi Material Handling Forklift

Konsumsi Energi MH Forklift (Joule/Unit)			
Level	v_1	v_2	v_3
b_1	5,3	5,25	5,3
b_2	8	8	8
b_3	21,2	21,25	21

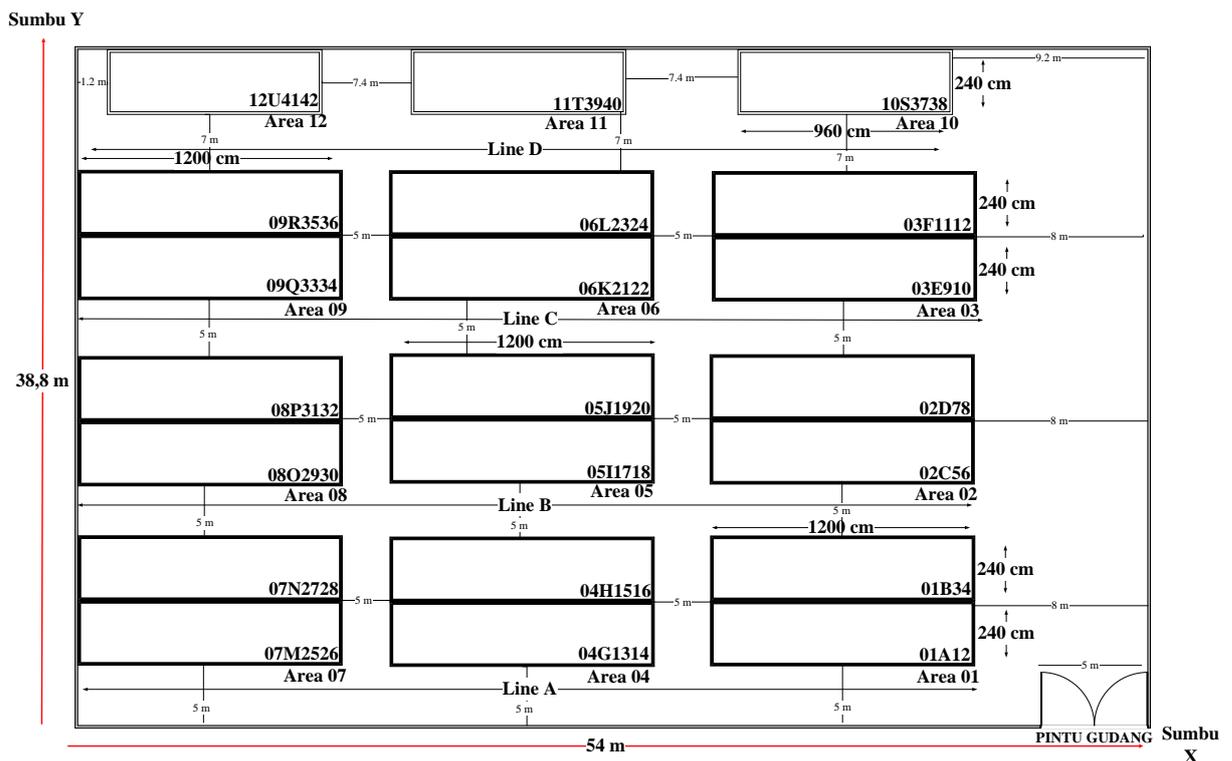
Volume setiap unit barang digunakan dalam pemanfaatan luas alas permukaan *pallet*. Dengan jenis *pallet* yang digunakan yaitu tipe *Plastic WR2-1814 M* yang berdimensi $P = 120$ cm, $L = 120$ cm, $T = 15$ cm), maka luas permukaan *pallet* dapat menampung 9 unit barang untuk v_1 , 4 unit barang untuk v_2 dan 1 unit barang untuk v_3 . Dengan terpenuhinya luas *pallet* oleh volume barang, maka terdapat perpindahan satu *pallet* yang berisi satu tumpukan untuk sampai ke area

penempatan dan pengambilan keluar barang dari dalam gudang. Dengan demikian, konsumsi energi *material handling forklift* untuk setiap *pallet* yang memuat barang dengan dimensi volume dan berat yang berbeda diperlihatkan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Konsumsi Energi *Material Handling Forklift*

Konsumsi Energi MH Forklift (Joule/Pallet/Meter)			
Level	9 unit v_1	4 unit v_2	1 unit v_3
b_1	48	21	5,3
b_2	72	32	8
b_3	191	85	21

Area gudang untuk penempatan barang memiliki dimensi panjang 54 meter, lebar 38.8 meter dan tinggi internal 19.56 meter. Peletakan tumpukan barang berdasarkan jumlah konsumsi energi *material handling* yang dibutuhkan untuk menempatkan barang tersebut di setiap area penempatan. Barang yang membutuhkan energi terbesar akan dialokasikan pada area penempatan terdekat dari pintu gudang, yaitu dimulai dari area 01A12. Hal tersebut bertujuan untuk menghemat penggunaan energi di dalam gudang. Terdapat gudang kosong yang berfungsi untuk menyimpan penumpukan barang berdasarkan algoritma, dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. *Layout* area penempatan barang dalam gudang

3.3 Pengolahan Data

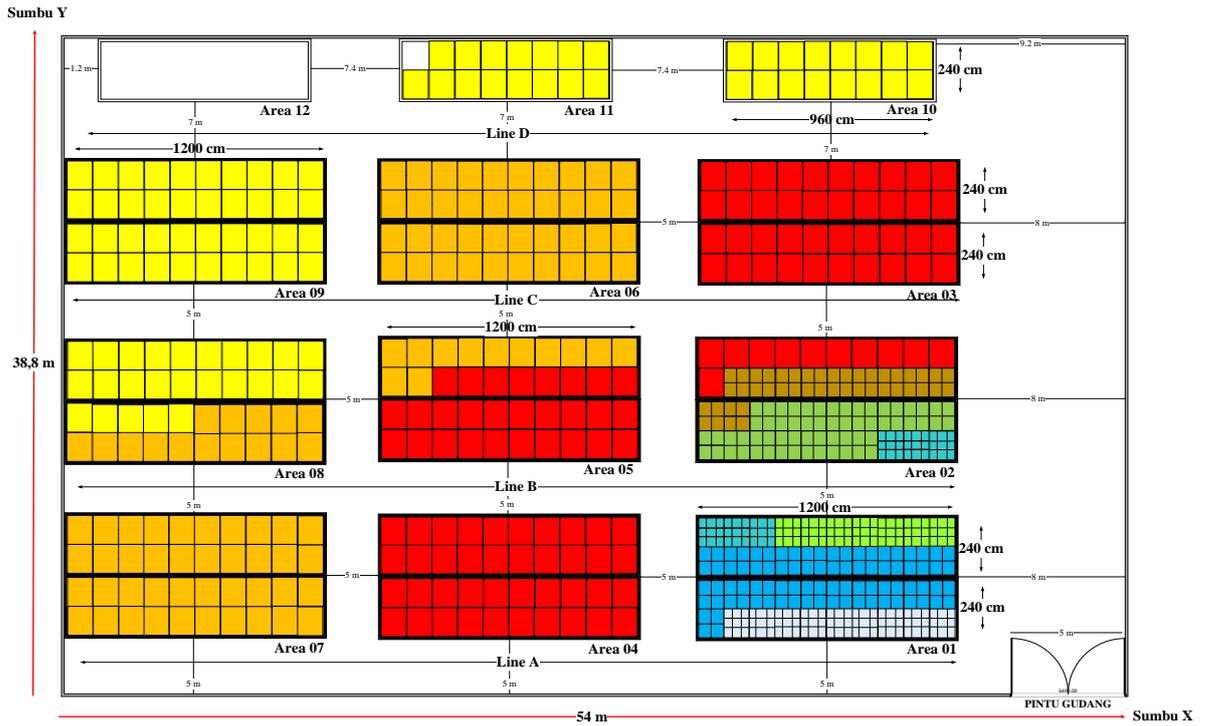
Dari data konsumsi energi *material handling forklift* untuk masing-masing barang dengan dimensi yang berbeda, selanjutnya dilakukan pengurutan yang dimulai dari energi terbesar hingga terkecil di area penempatan. Hal tersebut untuk meningkatkan performa perusahaan dalam efisiensi energi *forklift* saat sedang operasi, sehingga energi terbesar perlu ditempatkan di area penempatan terdekat dengan pintu gudang. Pada penumpukan barang, terdapat juga persyaratan sebuah barang dapat ditumpuk atau tidak. Apabila total berat seluruh barang ($U_{v,b,atas}$) lebih besar beratnya dibandingkan dengan total seluruh berat barang dibawahnya ($U_{v,b,bawah}$), maka barang tersebut tidak dapat ditumpuk. Dengan demikian, barang atas ($U_{v,b,atas}$) dapat ditumpuk di atas barang yang berada di bawahnya ($U_{v,b,bawah}$) hanya jika total berat seluruh barang atas tidak lebih besar atau sama dengan total berat seluruh barang dibawahnya.

Tabel 5. Tingkat konsumsi energi

No	Tingkat konsumsi energi terbesar hingga terkecil
1	v_1, b_3
2	v_2, b_3
3	v_1, b_2
4	v_1, b_1
5	v_2, b_2
6	v_2, b_1
7	v_3, b_3
8	v_3, b_2
9	v_3, b_1

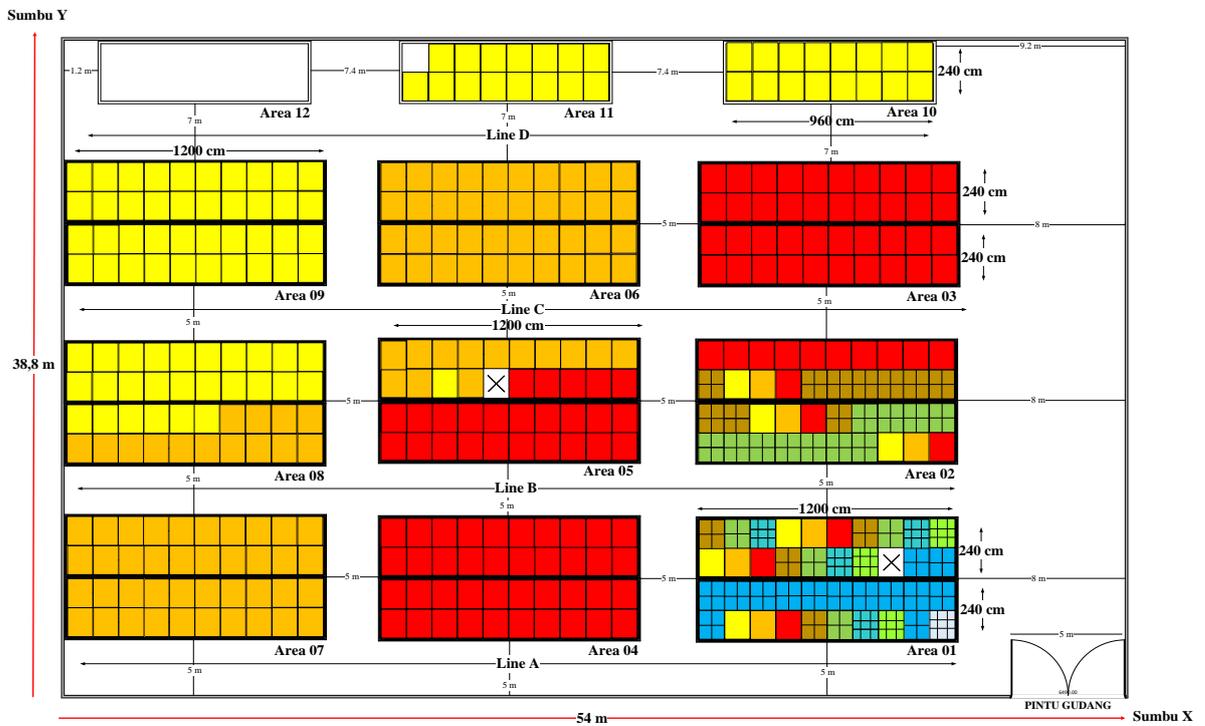
1) Algoritma 1

Algoritma 1 merupakan algoritma penumpukan barang berdasarkan volume, berat dan penumpukan barang terpilih. Dengan unit barang yang terdiri dari 3 jenis volume (V_u) dan 3 jenis berat (B_u) terdapat 9 kombinasi dari 3 jenis volume (V_u) dan 3 jenis berat (B_u) barang yang menghasilkan 81 kombinasi penumpukan barang. Setelah didapatkan 81 kombinasi, perlu dilakukan penentuan penumpukan barang terpilih ($Y_{v,b,u=1}$). Tidak semua barang dari 81 kombinasi dapat ditumpuk, hanya terdapat 46 kombinasi penumpukan barang terpilih yang tidak melebihi muatan berat pada *pallet*. Sebelum diletakkan pada area penempatan barang, diperhatikan pula urutan penyusunan penumpukan barang terpilih dimulai dari energi per *pallet* kriteria barang bawah ($KU_{v,b,bawah}$) dan energi per *pallet* kriteria barang atas ($KU_{v,b,atas}$) dari yang memiliki energi terbesar. Jika urutan energi sudah tersusun pada masing-masing *pallet*, dilakukan perhitungan jumlah kebutuhan barang bawah ($U_{v,b,bawah}$) dan jumlah kebutuhan barang atas ($U_{v,b,atas}$) untuk setiap tumpukan barang. Penyusunan tumpukan barang terpilih ($Y_{v,b,u=1}$) satu per-satu diletakkan di area penempatan pertama, yaitu area 01A12 *Line A* secara horizontal (sumbu X) dari yang memiliki konsumsi energi terbesar. Lalu dilakukan penyusunan tumpukan barang secara vertikal (sumbu Y), apabila area penempatan penyusunan penumpukan secara sumbu x sudah penuh. Selanjutnya dilakukan penyusunan kembali penumpukan barang ke area penempatan selanjutnya ($AP_{u,v,b,(x,y+1)}$) apabila area penempatan sudah penuh. Kemudian dilakukan perhitungan total jarak ($Td_{v,b,x,y}$) pengangkutan tumpukan barang di setiap area pada bagian penempatan barang. Hitung jumlah frekuensi ($F_{x,y}$) dari setiap tumpukan barang di area penempatan barang ($AP_{u,v,b}$). Tentukan jumlah energi barang per *pallet* pada *material handling forklift* ($KE_{mh,v,b,x,y}$) dalam satuan joule/*pallet*/meter. Dengan demikian diperoleh jumlah konsumsi energi ($UTE_{v,b,x,y}$) dalam satuan joule. Hasil *Layout* barang bawah dalam gudang diperlihatkan dalam Gambar 3.



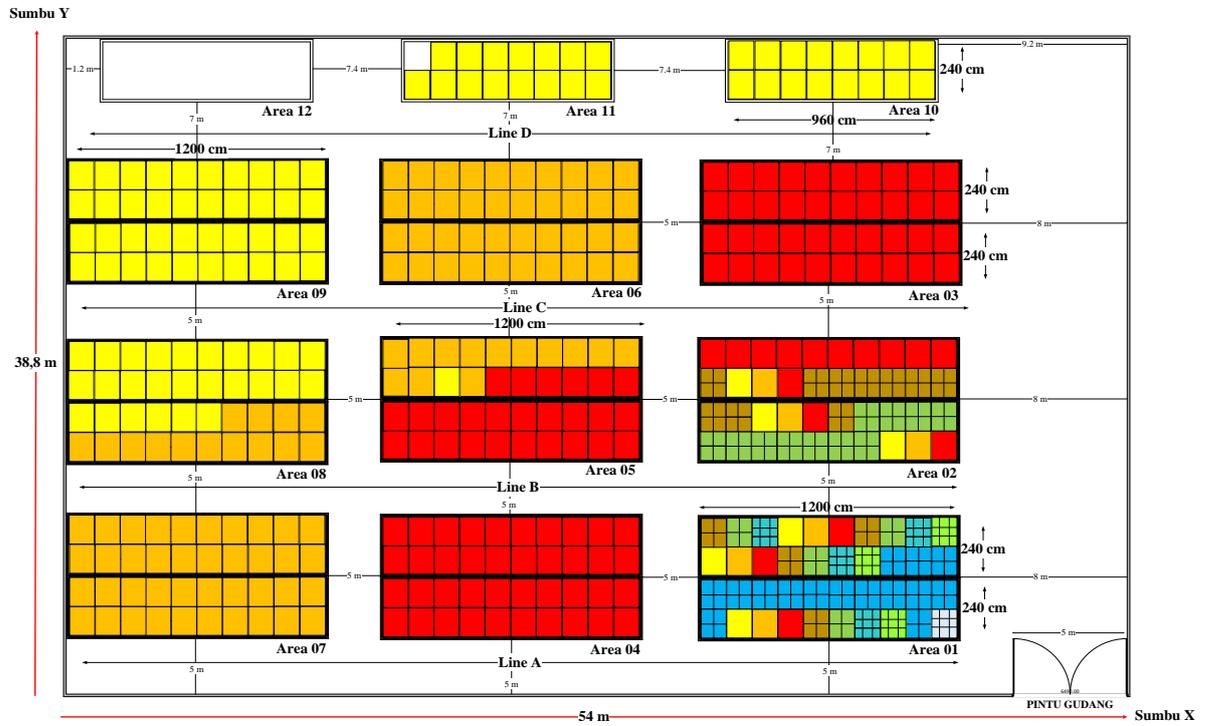
Gambar 3. Layout barang bawah dalam gudang

Pada proses *put away* dan *picking*, dimana *forklift* bergerak mulai dari area tengah pintu gudang hingga area tengah penempatan barang, dilakukan perhitungan total jarak selama pengangkutan dan jumlah frekuensi barang. Layout barang atas dalam gudang diperlihatkan dalam Gambar 4.



Gambar 4. Layout barang atas dalam gudang

Dalam *layout* barang atas dalam gudang, terdapat dua tumpukan barang yang tidak dapat ditumpuk oleh barang lainnya v_2, b_3 yang berjumlah 4 unit dan kedua yaitu 1 unit v_3, b_3 . Hal tersebut dapat dilihat pada simbol (x) dalam Gambar 4. *Layout* untuk masing-masing tumpukan barang di area penempatan dalam gudang diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5. *Layout* penumpukan barang algoritma 1

Sebagai contoh, perhitungan jumlah konsumsi energi pada salah satu penumpukan barang ($KU_{v,b,bawah}$) yaitu v_2, b_1 dan barang ($KU_{v,b,atas}$) yaitu v_3, b_3 :

- Jumlah Barang (unit)
 - $v_2, b_1 = 4$ unit
 - $v_3, b_3 = 1$ unit
 - Jumlah barang = 5 Unit
- Jarak Lokasi (meter)
 - Jarak area pintu gudang ke area 02D78 Line C = 36.1 Meter
 - Frekuensi *Put away* dan *picking* = 2 kali
 - Total Jarak: $36.1 \times 2 = 72.2$ meter
- Energi Penumpukan Barang (Joule), diperoleh dari Tabel 4:
 - $v_2, b_1 = 21$ joule
 - $v_3, b_3 = 21$ joule
 - Total energi: $v_2, b_1 + v_3, b_3 = 42$ Joule
- Total Konsumsi Energi Penumpukan Barang untuk penumpukan barang v_2, b_1 dan v_3, b_3
 - Total konsumsi energi barang = Jumlah barang (unit) \times Jarak area (m) \times Frekuensi *put away* dan *picking* \times Total energi (joule) = 15.162 Joule

Total konsumsi energi penumpukan seluruh barang dengan menerapkan algoritma satu sebesar 38.880.767 Joule.

2) Algoritma 2

Algoritma 2 merupakan algoritma penumpukan barang berdasarkan satu jenis volume dan berat. Dalam algoritma 2 ini tumpukan barang memperhatikan volume, berat dan energi yang

sama, dimana penumpukan barang memiliki selisih 0 antar barang yang ditumpuk atau dapat memenuhi syarat tumpukan barang terpilih. Dalam algoritma ini perlu penentuan untuk masing-masing tumpukan berdasarkan volume dan berat barang yang sama, dimana hasilnya ditunjukkan dalam Tabel 6.

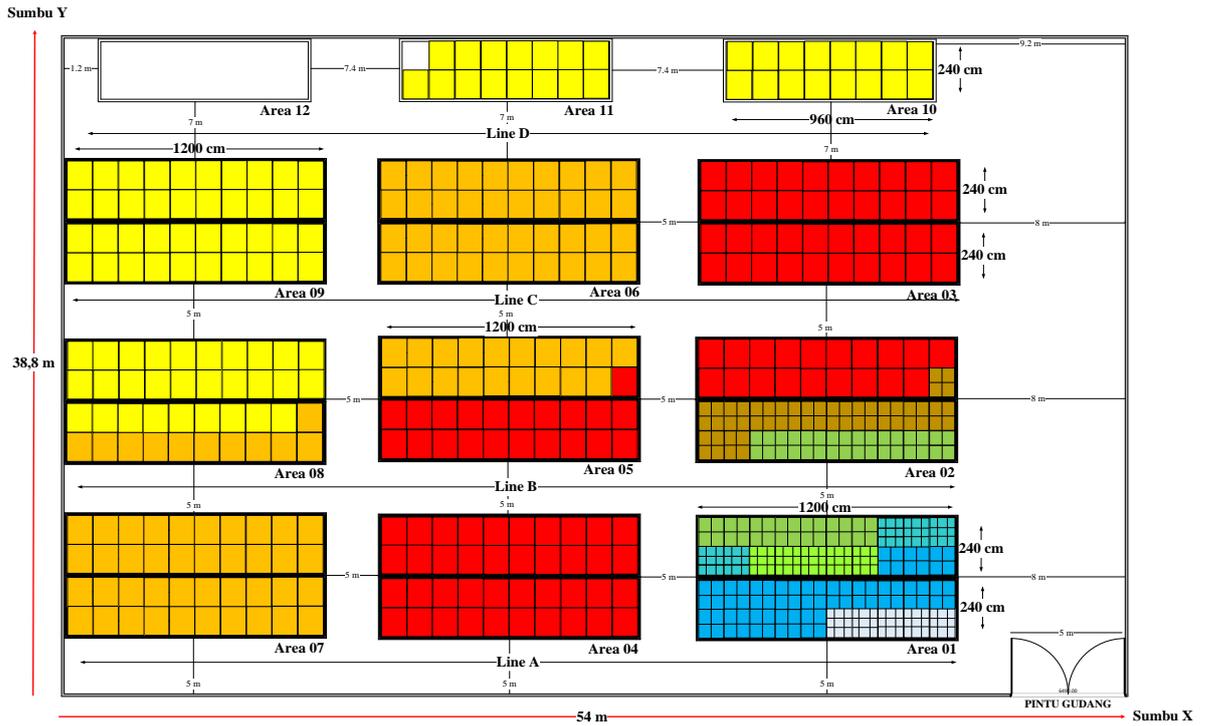
Tabel 6. Satu jenis volume dan berat

Penumpukan Barang	
$KU_{v,b,bawah}$	$KU_{v,b,atas}$
v_1, b_3	v_1, b_3
v_2, b_3	v_2, b_3
v_1, b_2	v_1, b_2
v_1, b_1	v_1, b_1
v_2, b_2	v_2, b_2
v_2, b_1	v_2, b_1
v_3, b_3	v_3, b_3
v_3, b_2	v_3, b_2
v_3, b_1	v_3, b_1

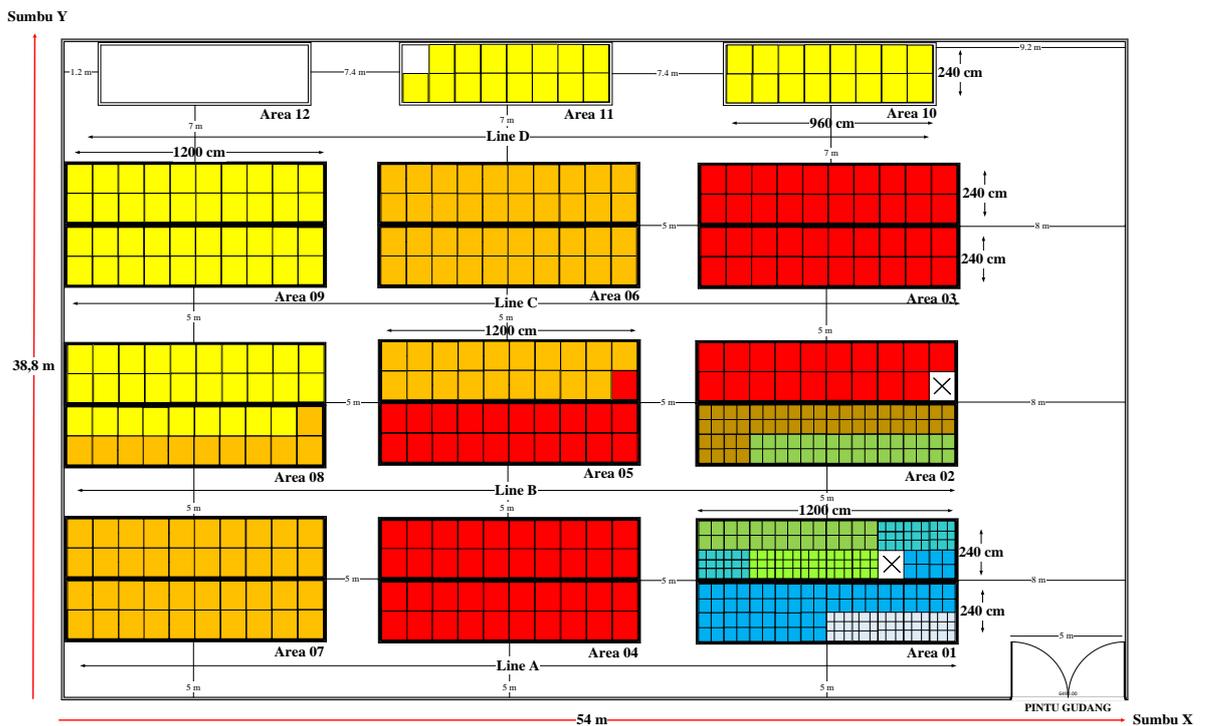
Langkah-langkah untuk menentukan volume dan berat barang yang sama adalah sebagai berikut:

1. Pilih unit barang yang terdiri dari 3 jenis volume (V_u) dan 3 jenis berat (B_u).
2. Tentukan masing-masing tumpukan berdasarkan jenis volume dan berat barang yang sama. Dapat dilihat pada Tabel 6.
3. Susun penumpukan barang terpilih ($Y_{v,b,u=1}$), total berat seluruh barang bawah ($U_{v,b,bawah}$) lebih besar sama dengan (\geq) total berat seluruh barang atas ($U_{v,b,atas}$) dan susunan penumpukan barang terpilih tidak melebihi muatan berat *pallet*.
4. Tentukan urutan penyusunan penumpukan barang terpilih berdasarkan energi per *pallet* kriteria barang bawah ($KU_{v,b,bawah}$) dan energi per *pallet* barang atas ($KU_{v,b,atas}$) dari energi terbesar.
5. Hitung jumlah kebutuhan barang bawah ($U_{v,b,bawah}$) dan jumlah kebutuhan barang atas ($U_{v,b,atas}$) untuk penentuan setiap tumpukan barang.
6. Susun tumpukan jumlah barang bawah ($U_{v,b,bawah}$) dan jumlah barang atas ($U_{v,b,atas}$) berdasarkan penumpukan barang terpilih ($Y_{v,b,u=1}$) ke area penempatan pertama yaitu area 01A12 *Line A* secara horizontal sumbu X dari yang memiliki konsumsi energi terbesar.
7. Susun tumpukan barang secara vertikal sumbu Y apabila penyusunan penumpukan secara horizontal sudah penuh.
8. Letakkan dan lakukan penyusunan kembali penumpukan barang ke area penempatan selanjutnya ($AP_{u,v,b,(x,y+1)}$) apabila area penempatan sudah terpenuhi.
9. Lakukan perhitungan total jarak ($Td_{v,b,x,y}$) pada penumpukan barang di setiap area penempatan barang.
10. Hitung jumlah frekuensi ($F_{x,y}$) pada setiap penumpukan barang di area penempatan barang ($AP_{u,v,b}$).
11. Tentukan jumlah energi barang per pallet pada alat *material handling forklift* ($KE_{mh,v,b,x,y}$) dalam satuan joule/*pallet*/meter.
12. Tentukan perhitungan total konsumsi ($UTE_{v,b,x,y}$) dalam satuan joule.

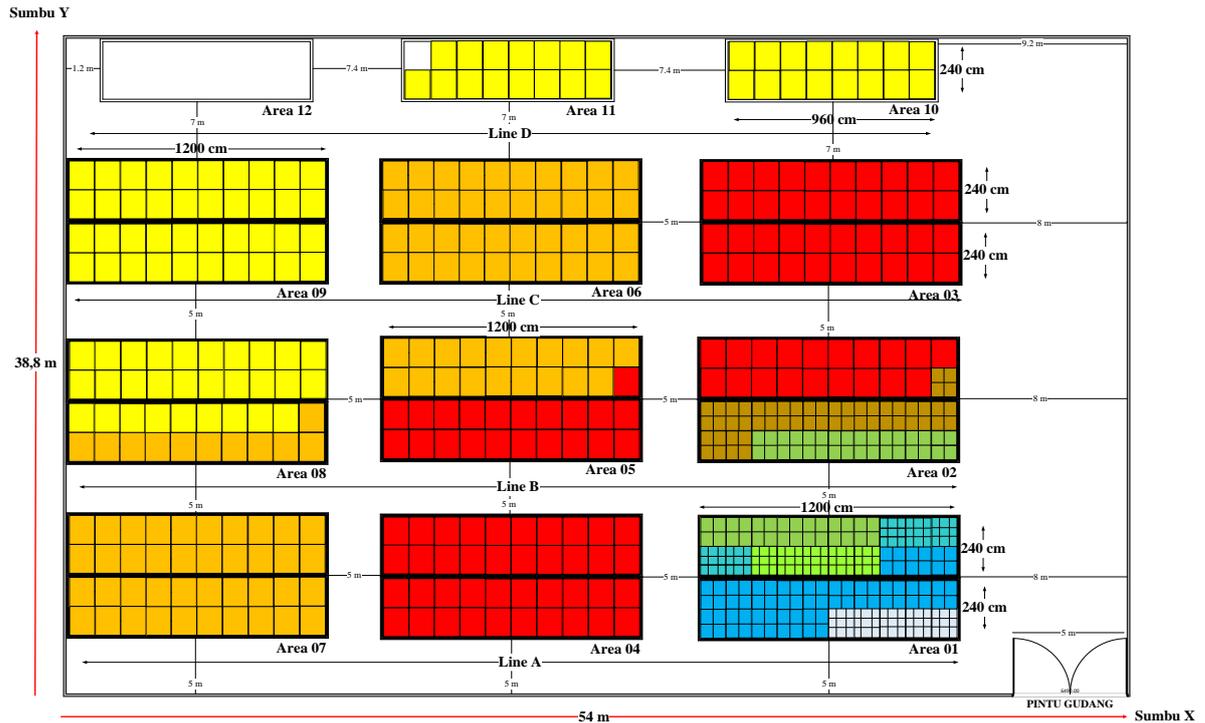
Terdapat hasil *layout* penumpukan barang untuk barang bawah ($U_{v,b,bawah}$) pada Gambar 6 dan hasil penumpukan barang untuk barang atas ($KU_{v,b,atas}$) pada Gambar 7. Pada *layout* barang atas ($KU_{v,b,atas}$) terdapat 2 tanda silang (\times) bahwa ada barang yang tidak dapat ditumpuk yaitu hanya barang bawah 4 unit v_2, b_1 dan barang bawah 4 unit v_2, b_3 .



Gambar 6. Layout gudang barang bawah



Gambar 7. Layout gudang barang atas



Gambar 8. Layout gudang penumpukan barang algoritma 2

Berikut contoh perhitungan pada salah satu penumpukan barang yaitu barang ($KU_{v,b,bawah}$) v_2 , b_1 dan barang ($KU_{v,b,atas}$) yaitu v_2 , b_1 .

- Jumlah Barang (unit)
 - $v_2, b_1 = 4$ unit
 - $v_2, b_1 = 4$ unit
 - Jumlah seluruh barang $v_2, b_1 = 96$ unit
- Jarak Lokasi (meter)
 - Jarak area 02C56 Line B = 26.3 meter
 - Frekuensi jarak = 2 kali
 - Frekuensi *put away* dan *picking* = 12 kali (Jumlah penumpukan)
 - Total Jarak: $26.3 \times 2 = 52.6$ meter
- Energi Penumpukan Barang (Joule)
 - $v_2, b_1 = 21$ joule
 - $v_2, b_1 = 21$ joule
 - Total energi: $v_2, b_1 + v_2, b_1 = 42$ Joule
- Hasil Total Konsumsi Energi Penumpukan Barang
 - Total konsumsi energi barang = Jumlah seluruh barang (unit) \times Jarak area (m) \times Frekuensi *put away* dan *picking* \times Total energi (joule) = 2.544.998,4 Joule

Hasil seluruh konsumsi energi penumpukan barang pada algoritma dua yaitu 56.272.982 Joule.

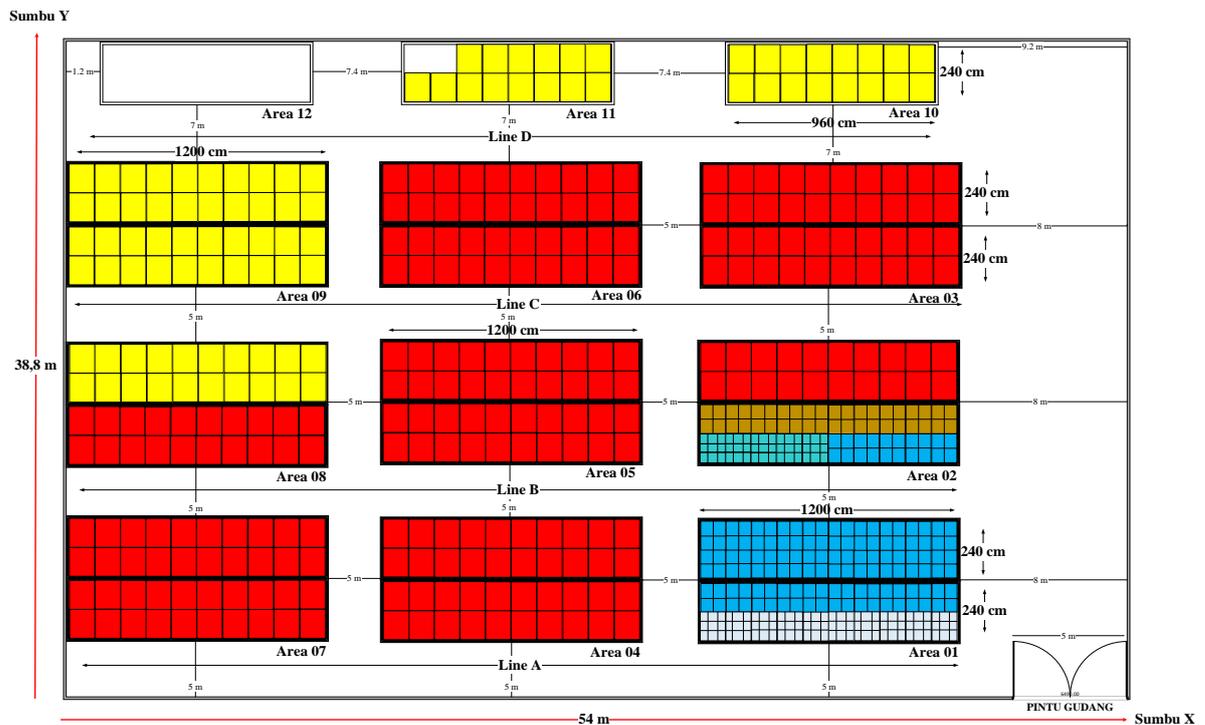
3) Algoritma 3

Algoritma 3 merupakan algoritma penumpukan barang berdasarkan satu jenis volume dan penyusunan berat terbesar. Algoritma ini diperlukan untuk masing-masing satu jenis volume barang yang sama dan urutan penyusunan tumpukan berdasarkan berat terbesar. Satu jenis volume barang dan berat barang yang berbeda diantaranya sebagai berikut:

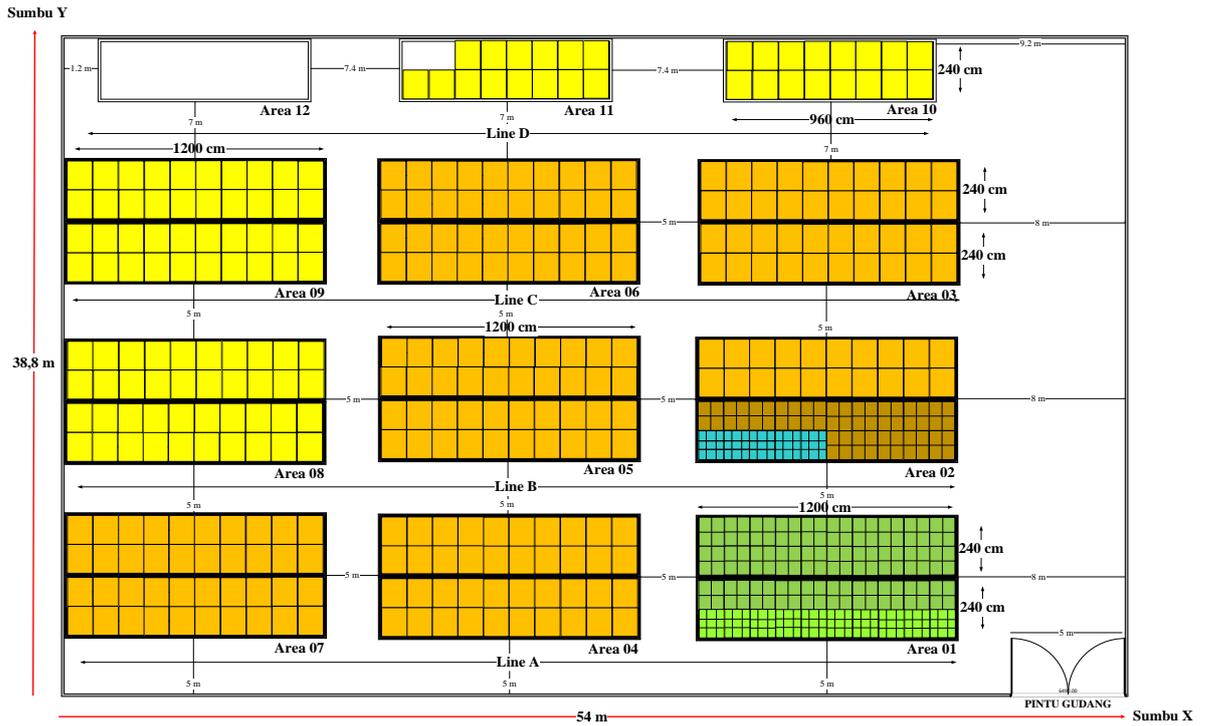
1. $v_3, b_3 - v_3, b_2 - v_3, b_1$
2. $v_2, b_3 - v_2, b_2 - v_2, b_1$
3. $v_1, b_3 - v_1, b_2 - v_1, b_1$

Algoritma ini memiliki urutan penumpukan barang berdasarkan berat atau energi terbesar hingga terkecil, diantaranya sebagai berikut:

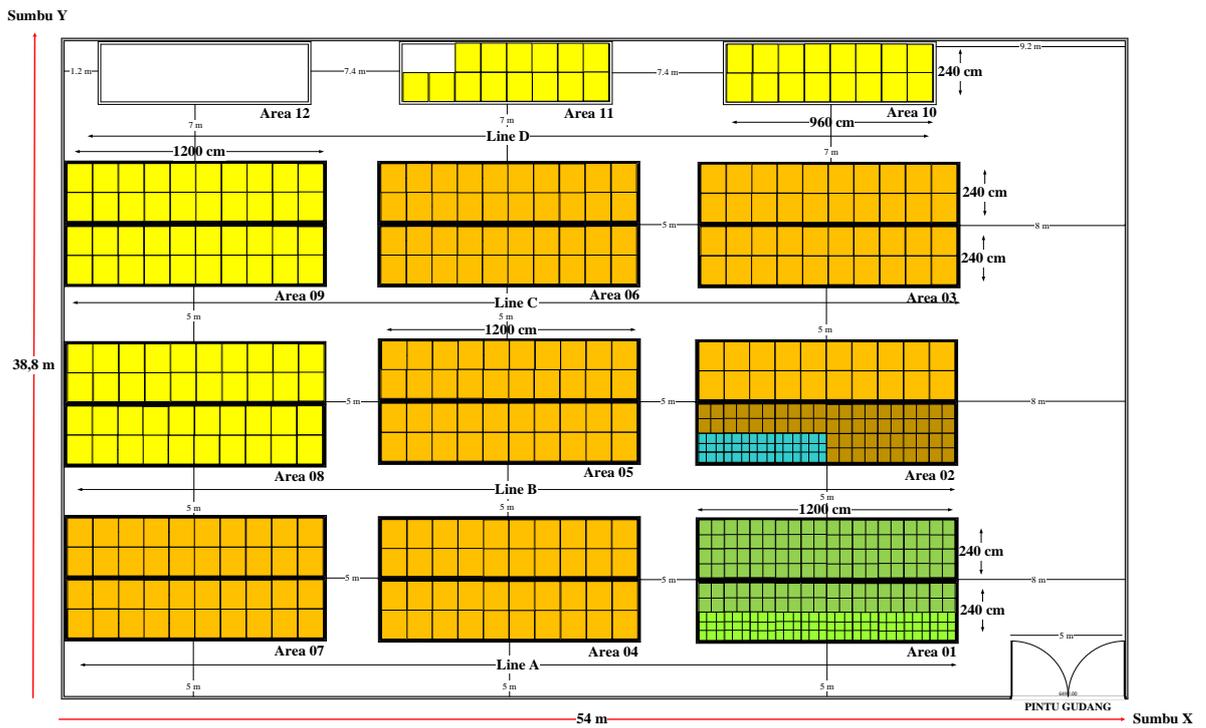
1. $v_1, b_3 = 90$ unit ($KU_{v,b,bawah}$)
 $v_1, b_2 = 90$ unit ($KU_{v,b,atas}$)
2. $v_2, b_3 = 140$ unit ($KU_{v,b,bawah}$)
 $v_2, b_2 = 120$ unit ($KU_{v,b,atas}$)
 Sisa 20 unit v_2, b_3
3. $v_2, b_3 = 20$ unit ($KU_{v,b,bawah}$)
 $v_2, b_1 = 20$ unit ($KU_{v,b,atas}$)
4. $v_1, b_1 = 90$ unit (Ditumpuk satu kriteria barang)
5. $v_2, b_1 = 80$ unit (Ditumpuk satu kriteria barang)
6. $v_3, b_3 = 240$ unit ($KU_{v,b,bawah}$)
 $v_3, b_2 = 220$ unit ($KU_{v,b,atas}$)
 Sisa 20 unit v_3, b_3
7. $v_3, b_3 = 20$ unit ($KU_{v,b,bawah}$)
 $v_3, b_1 = 200$ unit ($KU_{v,b,atas}$)
 Sisa 180 unit v_3, b_1
8. $v_3, b_1 = 180$ unit (Ditumpuk satu kriteria barang)



Gambar 9. Layout barang bawah dalam gudang



Gambar 10. Layout barang atas dalam gudang



Gambar 11. Layout gudang penumpukan barang algoritma 3

Adapun salah satu perhitungan terhadap penumpukan barang ($KU_{v,b,bawah}$) yaitu v_2, b_3 dan barang ($KU_{v,b,atas}$) yaitu v_2, b_1 .

- Jumlah Barang (unit)
 - $v_2, b_3 = 4$ unit
 - $v_2, b_1 = 4$ unit
 - Terdapat 5 tumpukan dari 20 unit v_2, b_3 dan 20 unit v_2, b_1
- Jarak Lokasi (meter)
 - Jarak area 02C56 *Line B* = 26.3 meter
 - Frekuensi jarak = 2 kali
 - Frekuensi *put away* dan *picking* = 5 kali
 - Total Jarak: $26.3 \times 2 = 52.6$ meter
- Energi Penumpukan Barang (Joule)
 - $v_2, b_3 = 85$ Joule
 - $v_2, b_1 = 21$ Joule
 - Total energi: $v_2, b_3 + v_2, b_1 = 106$ Joule
- Hasil Total Konsumsi Energi Penumpukan Barang
 - Total konsumsi energi barang = Jumlah barang (unit) \times Jarak lokasi (meter) \times Frekuensi *put away* dan *picking* \times Total energi (Joule) = 1.115.120 Joule

Total konsumsi energi penumpukan barang pada algoritma tiga yaitu 70.148.191 Joule.

Berdasarkan hasil pengolahan yang telah dilakukan, usulan algoritma 1 menghasilkan penggunaan energi *material handling forklift* yang paling rendah dengan jumlah kebutuhan *pallet* yaitu 391 unit. Dengan hasil rata-rata utilisasi paling rendah, dimana hasil tersebut relatif terhadap tidak terjadinya aktivitas yang padat saat proses pemilihan dan penempatan penumpukan barang, maka cukup baik untuk penghematan ketersediaan tempat kebutuhan barang untuk satu periode maupun *demand* periode selanjutnya. Algoritma 2, memiliki konsumsi energi lebih besar dibandingkan algoritma 1 dengan jumlah kebutuhan *pallet* yaitu 391 unit dengan memiliki tingkat rata-rata utilisasi yang masih dapat memenuhi kebutuhan barang selanjutnya, akan tetapi dengan syarat menggunakan penumpukan barang satu jenis volume atau berat yang sama sehingga aktivitas saat proses penempatan barang menghasilkan utilisasi lebih tinggi atau cukup tidak efisien yang menyebabkan tingginya ketersediaan tempat barang jika dibandingkan dengan algoritma 1. Algoritma 3 memiliki jumlah konsumsi energi terbanyak dengan jumlah kebutuhan *pallet* yaitu 390 unit. Hal ini menunjukkan hasil rata-rata utilisasi kapasitas ketersediaan barang sangat tinggi atau pemborosan ruangan untuk memenuhi kebutuhan barang hanya jika menggunakan persyaratan satu jenis volume dan berat terbesar. Perbandingan hasil ketiga algoritma ditunjukkan dalam Tabel 7.

Tabel 7. Perbandingan hasil ketiga algoritma

	Hasil Konsumsi Energi (Joule)	Utilisasi Ruang Gudang (%)			
		Rata-rata Panjang Gudang	Rata-rata Lebar Gudang	Rata-rata Tinggi Gudang	Rata-rata Ruang Gudang
Algoritma 1	38.880.767	8%	4%	12%	24%
Algoritma 2	56.272.982	18%	5%	13%	36%
Algoritma 3	75.148.191	21%	5%	14%	40%

4. Kesimpulan

Algoritma 1 terpilih sebagai penempatan penumpukan barang pada gudang yang menghasilkan energi terendah yang memberikan efisiensi energi sebesar 30.91% dibandingkan dengan algoritma 2 dan 44.57% dibandingkan algoritma 3. Usulan penelitian selanjutnya yang dapat dilakukan adalah membuat perhitungan dalam model matematis,

membuat bentuk aplikasi atau bahasa pemrograman dan mengoperasikan algoritma dengan mempertimbangkan lebih dari satu tumpukan dari macam-macam bentuk barang.

5. Daftar Pustaka

Abdou & El-Masry (2000) 'Three-dimensional random stacking of weakly heterogeneous palletization with demand requirements and stability measures', *International Journal of Production Research*, Vol. 38, No. 14, Hal 3149-3163.

Andriani (2000) *Material handling - pemindahan barang*. Universitas Brawijaya, Malang.

Derhami et al (2020) 'A simulation based optimization approach to design optimal layouts for block stacking warehouses', *International Journal of Production Economics*, Vol. 223, Hal 1-23.

Dukić et al. (2010) 'Order picking methods and technologies for greener warehousing', *Faculty of Mechanical Engineering*, Vol. 52, No. 1, Hal 23-31.

Frazelle et al. (2002) *Supply chain strategy the logistics of supply chain management*. McGraw-Hill. New York.

Hambali (2009) *Sistem alokasi penyimpanan barang pada gudang*. Institut Teknologi Surabaya. Surabaya.

Juliana & Handayani (2016) 'Peningkatan kapasitas gudang dengan perancangan *layout* menggunakan metode *Class-Based Storage*', *Jurnal Teknik Industri*, Vol. XI, No. 2, Hal 113-122.

Kenneth B. Ackerman, Ann M. Brewer (2017) *Warehousing: A key link in the supply chain*. University of Sydney, Chapter 14, pp 225-237.

Meldra & Purba (2018) 'Relayout tata letak gudang barang dengan menggunakan metode *Dedicated Storage*', *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, Vol 4, No.1, Hal 32-39.

Moengin et al (2018) 'Perancangan model simulasi tata letak gudang bahan baku dengan menggunakan metode *Shared Storage* pada PT. Braja Mukti Cakra', *Jurnal Teknik Industri*, Vol. 9, No. 2, Hal 98-111.

Morphology, n.d. (2014) *Warehouse management. a complete guide to improving efficiency and minimizing costs in the modern warehouse*. 2rd Edition.

Ross (2015) *Distribution planning and control managing in the era of supply chain management*. 3rd Edition.

Y. Martinus Tularso (2020) Pengembangan algoritma penempatan produk di gudang dengan mempertimbangkan volume, berat dan jumlah produk untuk meminimalkan konsumsi energi forklift. *Tugas Akhir Sarjana SI*, Fakultas Manajemen Rantai Pasok, Jurusan Manajemen Rantai Pasok, Institut Teknologi Harapan Bangsa.