

OPTIMASI DISTRIBUSI 4-ESELON LOGISTIK OPERASI LAUT DENGAN PENDEKATAN ALGORITMA *HYBRID PARTICLE SWARM OPTIMIZATION*

Yohannes Enggar¹, Iwan Vanany² dan Supartono³

¹Postgraduate Student of Systems Analysis and Operations Research (ASRO), Indonesian Naval Technology College (STTAL), Moro Krembangan Surabaya 60178

Email: ¹yohannes_enggar@yahoo.com

²Professor on Department of Industrial Engineering, Sepuluh Nopember Institute Of Technology (ITS), Keputih, Sukolilo Surabaya 60111

Email: ²iwan.vanany@gmail.com

³Lecturer on Systems Analysis and Operations Research (ASRO), Indonesian Naval Technology College (STTAL), Moro Krembangan Surabaya 60178

Email: ³tonnret@yahoo.com

ABSTRACT

This study develops an optimization model 4 echelon distribution logistics sea operations that consist of multi main naval bases, multi forward naval bases, multi distributors, multi striking force ships and multi helicopters to the method of delivery, by replenishment at sea on the rendezvous points. This model considers the selection of the modes of transportation logistics ship types are used, multi commodity share shipments at each echelons to answer the lost capacity transport modes, the cost of transportation, loading and unloading costs, defective commodity costs and the cost of losing the material generated at each frequency of deliveries to reduce the total cost of distribution. The total cost of the distribution consists of the cost in the forward naval base, logistics ship as distributor and striking force ships. The model developed included in the category of mixed fleet transshipment and solved by the solution method based hybrid nonlinear inertia weight particle swarm optimization with multiple capacitated vehicle transshipment to generate optimal distribution costs simultaneously for all the decision variables. Conclusion derived from the results of the numerical example states that the total cost of distribution is smaller when using combination of modes of transport logistics ships larger capacity namely KRI ARN-903 and KRI ARN-903 with total efficiency of the distribution costs amounted to 46.07 % in one planning horizon.

ABSTRAK

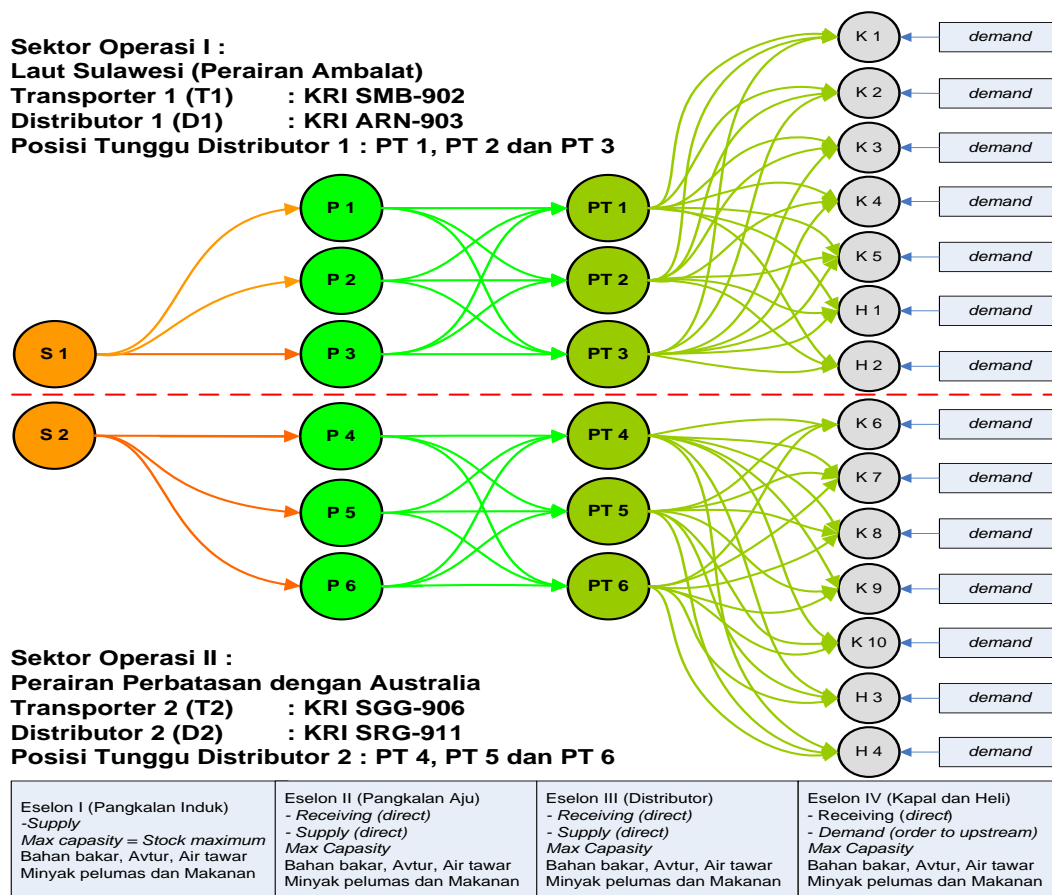
Penelitian ini mengembangkan model optimasi distribusi 4 eselon logistik operasi laut yang terdiri dari multi pangkalan induk, multi pangkalan aju, multi distributor, multi kapal *striking force* dan multi heli dengan metode pengirimannya melalui *replenishment at sea* pada titik *rendezvous*. Model ini mempertimbangkan pemilihan moda transportasi kapal logistik yang digunakan, pengiriman berbagi multi komoditas pada tiap eselon untuk menjawab *lost capacity* moda transportasi, biaya transportasi, biaya bongkar muat, biaya komoditas rusak dan biaya kehilangan material yang dihasilkan pada tiap frekuensi pengiriman untuk menurunkan total biaya distribusi. Biaya distribusi terdiri dari biaya pada pangkalan aju, kapal logistik sebagai distributor dan kapal *striking force*. Model yang dikembangkan termasuk dalam kategori *mixed fleet transshipment* dan diselesaikan menggunakan metode solusi berbasis *hybrid nonlinear inertia weight particle swarm optimization* dengan *multiple capacitated vehicle transshipment* untuk menghasilkan total biaya distribusi optimal secara simultan untuk semua variabel keputusan. Kesimpulan yang diperoleh dari hasil contoh numerik menyatakan bahwa total biaya distribusi lebih kecil bila menggunakan kombinasi moda transportasi jenis kapal logistik berkapasitas lebih besar yaitu KRI ARN-903 dan KRI ARN-903 dengan penghematan total biaya distribusi sebesar 46.07% dalam satu horizon perencanaan.

Kata kunci: *Replenishment At Sea*, Biaya Distribusi, 4 Eselon, Moda Transportasi, *Hybrid Particle Swarm Optimization*

1. PENDAHULUAN

Sistem distribusi 4 eselon logistik operasi laut bertujuan untuk meningkatkan efektifitas dan efisiensi distribusi multi komoditas yang terdiri dari bahan bakar, avtur, minyak pelumas, air tawar dan makanan mulai dari pangkalan induk sampai kapal *striking force* dan heli pada daerah operasi sesuai dengan jenis, jumlah, kualitas, waktu dan tempat yang metode pengirimannya melalui *replenishment at sea* selama horizon perencanaan.

Pada kondisi nyata proses distribusi multi komoditas operasi pengendalian laut terdispersi menjadi 4 level terdiri dari 2 pangkalan induk, 6 pangkalan aju, 2 kapal logistik sebagai transporter dan 2 kapal logistik sebagai distributor, serta 10 kapal *striking force* dan 4 heli. Sistem distribusi di Koarmatim menggunakan strategi distribusi *direct shipping*. Alur alokasi multi komoditas seperti pada Gambar 1, dimana terdapat 4 entitas dan 1 *end user* merupakan segmen distribusi dari *upstream echelons* ke *downstream echelons*.



Gambar 1. Segmentasi titik-titik distribusi 4 eselon logistik operasi laut

Sistem distribusi 4 eselon logistik operasi laut di Koarmatim memiliki segmentasi titik distribusi pada sektor operasi I Laut Sulawesi : node (S1) adalah Lantamal VI Makasar sebagai pangkalan induk yang merupakan eselon 1, node (P1, P2, P3) adalah Lantamal XIII Tarakan, Lanal Toli-Toli dan Lantamal VIII Menado sebagai pangkalan aju yang merupakan eselon 2, node (PT1, PT2 PT3) adalah posisi tunggu distributor 1 (eselon 3), KRI SMB-902 sebagai transporter 1 (T1). Untuk node (K1, K2, K3, K4 dan K5) adalah kapal *stricking force* jenis 1 PKR klas FTH, 1 PK klas PARCHIM, 1 KCR klas KRS, 1 FPB klas LYG dan 1 PKR klas DPN, sedangkan node (H1, H2) adalah heli intai N-412 merupakan eselon 4 dan sebagai proses akhir dari rantai distribusi 4 eselon.

Segmentasi titik distribusi di sektor operasi II perairan perbatasan dengan Australia : node (S2) adalah Lantamal IX Ambon yang merupakan pangkalan induk sebagai eselon 1, untuk node (P4, P5, dan P6) adalah Lantamal VII Kupang, Lanal Tual dan Lantamal XI Merauke sebagai pangkalan aju yang merupakan eselon 2, node (PT1, PT2 PT3) adalah posisi tunggu distributor 2 (eselon 3) dan KRI SGG-906 sebagai transporter 2 (T2). Node (K6, K7, K8, K9 dan K10) adalah kapal *stricking force* jenis 1 PKR klas AMY, 1 FPB klas HIU, 1 KCR klas MDU, 1 PK klas PARCHIM, 1 PKR klas FKO dan node (H3, H4) adalah heli intai N-412 merupakan eselon 4 dan sebagai proses akhir dari rantai distribusi 4 eselon.

Berdasarkan kondisi nyata sistem distribusi di Koarmatim yang menggunakan strategi distribusi pengiriman langsung dan segmentasi titik distribusi serta alur alokasi distribusi logistik seperti pada Gambar 1, sehingga dapat disimpulkan bahwa dukungan logistik dilakukan terpisah untuk dua operasi pengendalian laut yang digelar Koarmatim secara bersamaan di dua sektor operasi. Dengan kata lain, aliran multi komoditas antar eselon dan pemindahan multi komoditas dari satu eselon ke eselon dibawahnya dilakukan secara langsung (*direct shipping*). Kondisi ini menghasilkan biaya distribusi relatif lebih mahal dari strategi distribusi berbagi (Santoso et al., 2009). Karena tidak dapat dilakukan optimasi penentuan rute pengiriman dan jarak terpendek antar eselon serta urutan alokasi distribusi logistik sesuai *demand* multi komoditas dari kapal *stricking force* dan heli pada dua sektor operasi laut di Koarmatim.

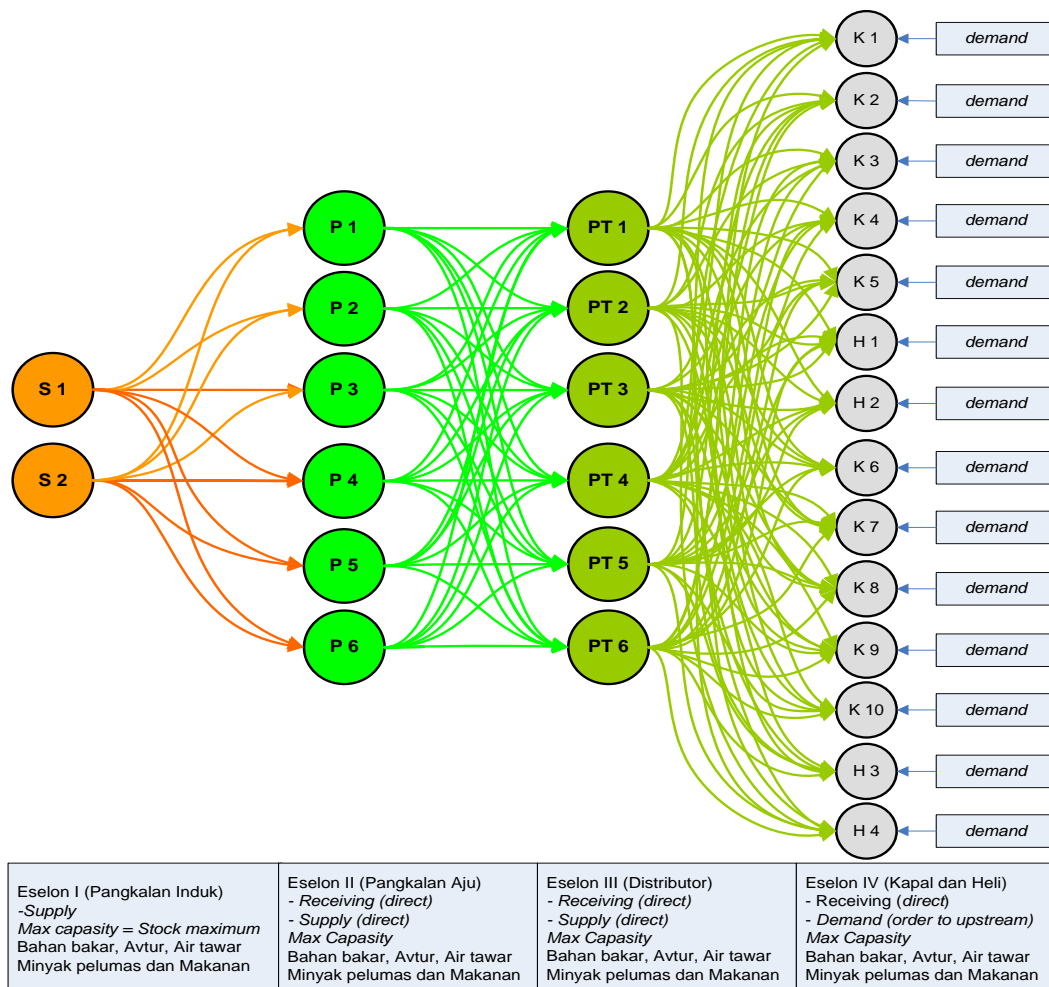
Kondisi tersebut menjadikan hambatan kapal *stricking force* dan heli untuk mempertahankan kehadiran di laut dalam satu horizon perencanaan operasi, dikarenakan terjadinya *lost capacity* moda transportasi kapal logistik seperti pada penelitian Gue (2003), Lenhardt (2006), Brown dan Carlyle (2008) dan Aris (2015), dimana terdapat *demand* multi komoditas yang tidak dapat terpenuhi hingga beberapa kapal *stricking force* harus meninggalkan sektor operasinya dengan kembali ke pangkalan aju yang terdekat untuk melaksanakan bekal ulang dalam waktu relatif lama.

Lokasi setiap eselon dalam jaringan sistem distribusi 4 eselon logistik operasi laut (pangkalan induk, pangkalan aju, kapal logistik sebagai distributor dan kapal *striking force*) yang berbeda mengakibatkan perlu ada koordinasi aliran multi komoditas antar eselon mulai dari *upstream* ke *downstream* termasuk proses pemindahan multi komoditas karena kondisi geografis mempengaruhi proyeksi kekuatan laut dari faktor waktu dan jarak yang memiliki dampak operasional bagi armada angkatan laut dan pangkalannya.

Penelitian ini mengusulkan strategi distribusi *share shipping* multi komoditas pada tiap eselon dalam jaringan sistem distribusi 4 eselon logistik operasi laut dengan pengintegrasian segmentasi titik-titik distribusi seperti pada Gambar 2 melalui perencanaan terkoordinasi fungsi logistik lintas eselon (Chopra dan Meindl, 2007) dalam sistem distribusi 4 eselon dengan memanfaatkan peranan pangkalan aju (P1, P2, P3, P4, P5, dan P6) sebagai gudang penyangga untuk meredam ketidakpastian *demand* multi komoditas dari kapal *striking force* dan heli pada dua sektor operasi laut dan sekaligus menjawab *lost capacity* moda transportasi jenis kapal logistik yang digunakan untuk mensuplai *demand* multi komoditas dengan kebijakan persediaan dan transportasi diputuskan simultan selama horizon perencanaan.

Koordinasi antar pangkalan induk, pangkalan aju, kapal logistik sebagai distributor dan kapal *striking force* merupakan kunci dari kesuksesan sistem distribusi 4 eselon logistik operasi laut. Pengaturan pemindahan multi komoditas yang lebih dikenal dengan kebijakan transportasi akan mempengaruhi kebijakan persediaan di pangkalan induk, pangkalan aju dan kapal logistik sebagai distributor dan kapal *striking force*. Pada sistem distribusi 4 eselon logistik operasi laut penetapan kebijakan persediaan dan transportasi dilakukan secara terintegrasi karena pengaturan kuantitas, persediaan dan pemilihan moda transportasi kapal logistik memainkan peran penting dalam kenaikan total biaya distribusi 4 eselon.

Meningkatnya *demand* multi komoditas oleh kapal *striking force* menghasilkan biaya distribusi yang terus meningkat seiring penyebaran multi komoditas untuk menjangkau lokasi kapal *striking force* dan heli pada titik-titik *rendezvous* di daerah operasi. Kebijakan pemilihan moda transportasi kapal logistik mempengaruhi biaya transportasi, biaya bongkar muat, biaya komoditas rusak dan biaya kehilangan material yang selama ini belum dipertimbangkan sebagai komponen total biaya distribusi dan menjadi faktor penunjang tingginya total biaya distribusi yang harus ditanggung oleh TNI AL pada setiap tahunnya.



Gambar 2. Strategi distribusi *share shipping* usulan penelitian ini

Paper ini membahas pemodelan dan optimasi distribusi 4 eselon logistik operasi pengendalian laut dengan mempertimbangkan multi pangkalan induk, multi pangkalan aju, multi distributor, multi kapal *stricking force* dan multi heli dengan metode pengirimannya melalui *replenishment at sea* (RAS) pada titik *rendezvous*. Model ini menganut strategi distribusi *share shipping* multi komoditas pada tiap eselon untuk menjawab *lost capacity* moda transportasi kapal logistik yang digunakan dengan memanfaatkan peranan pangkalan aju sebagai gudang penyangga untuk meredam ketidakpastian *demand* multi komoditas dari kapal *stricking force* dan heli pada daerah operasi.

Model pada paper ini mempertimbangkan moda transportasi jenis kapal logistik, pengiriman berbagi multi komoditas untuk mengoptimalkan *endurance* atau daya tahan operasi kapal *stricking force* dan heli, biaya transportasi, biaya bongkar muat, biaya komoditas rusak dan biaya kehilangan material yang dihasilkan tiap frekuensi pengiriman untuk meminimumkan total biaya distribusi selama satu horizon perencanaan operasi. Dalam paper ini, algoritma solusi yang merupakan algoritma *hybrid nonlinear inertia weight particle swarm optimization* dengan *multiple capacitated vehicle transshipment* digunakan untuk menyelesaikan optimasi distribusi 4 eselon logistik operasi laut dengan tujuan menemukan rute optimum dan pola optimum alokasi untuk meminimumkan total biaya distribusi. Performansi algoritma model dievaluasi dengan 2 (dua) varian algoritma *particle swarm optimization* (PSO) lainnya.

2. LITERATURE REVIEW

Dalam teori distribusi terdapat eselon yang merupakan segmentasi level dan pola alokasi suplai produk (Bahagia. S.N., 2008). Pada sistem distribusi 4 eselon terdapat dua pola pengiriman, pengiriman langsung dan pengiriman berbagi yang menghasilkan biaya distribusi lebih efisien dari pengiriman langsung (Santoso et al., 2009). Pada proses distribusi dihasilkan biaya distribusi terdiri dari biaya transportasi dan biaya yang menyangkut proses distribusi. Pada sebagian besar penelitian tentang optimasi distribusi logistik operasi militer melalui RAS seperti Gue (2003), Lenhardt (2006), Brown dan Carlyle (2008) serta Aris (2015) hanya meneliti masalah penentuan rute dan penjadwalan RAS untuk meminimumkan kekurangan *demand* multi komoditas satuan tugas laut menggunakan pola *direct shipping*. Model yang dikembangkan penelitian tersebut tidak mempertimbangkan biaya operasional moda transportasi kapal logistik selama proses distribusi, biaya bongkar muat dan peranan pangkalan aju sebagai gudang penyangga untuk meredam ketidakpastian *demand* multi komoditas dari kapal *stricking force* dan heli yang memiliki mobilitas tinggi dalam proyeksi kekuatan, sehingga akan mengakibatkan terjadinya *lost capacity* moda transportasi karena terdapat jumlah *demand* multi komoditas yang tidak dapat terpenuhi.

Pada penelitian tentang model biaya distribusi multi eselon yang menjadi komponen total biaya distribusi seperti Domoto et al., (2007), Santoso et al., (2009), Garside (2010) dan Sathish et al., (2010) model belum terintegrasi dengan bongkar muat selama proses distribusi yang menghasilkan biaya bongkar muat (Pujawan, 2010) dan belum melihat besarnya biaya komoditas rusak yang dihasilkan tiap frekuensi pengiriman seharusnya ikut dalam komponen biaya distribusi yang menjadi beban biaya selama horizon perencanaan. Pada penelitian tersebut belum mempertimbangkan pola alokasi distribusi *share shipping* tiap eselon seperti Rajeshwar et al., (2012), Shankar et al., (2013) dan Khalifehzadeh et al., (2015) yang bertujuan untuk meminimumkan total biaya distribusi dengan pemenuhan *demand* komoditas sebagai indikator kinerja sistem rantai pasok 4 eselon. Model yang dikembangkan Rajeshwar et al., (2012), Shankar et al., (2013) dan Khalifehzadeh et al., (2015) tidak mempertimbangkan kapasitas moda transportasi dan jarak antar eselon karena biaya transportasi merupakan biaya tetap. Dalam kondisi nyata biaya distribusi lebih mendekati jarak tempuh karena nilai yang menjadi dasar biaya jelas dan belum dipertimbangkan pengiriman dengan RAS.

Proses RAS logistik operasi pengendalian laut terdistribusi melalui kapal logistik ke kapal *stricking force* maupun dari kapal logistik ke heli menghasilkan kehilangan material (*lost material*) karena terjadi penyimpangan haluan kapal pada saat *loading unloading* akibat pengaruh kondisi dinamika laut yang tidak dapat di prediksi. Pada penelitian distribusi logistik melalui RAS seperti Gue (2003), Lenhardt (2006), Brown dan Carlyle (2008), dan Aris (2015) belum melihat besarnya biaya kehilangan material yang dihasilkan pada tiap frekuensi pengiriman, seharusnya ikut dalam komponen biaya distribusi yang menjadi beban biaya TNI AL. Besarnya biaya kehilangan material yang *linear* dengan jumlah frekuensi pengiriman menghasilkan biaya semu yang menjadi beban biaya dalam satu horizon perencanaan.

Optimasi distribusi 4 eselon logistik operasi laut untuk mempertahankan *endurance* dari kapal *stricking force* dan heli membutuhkan pendekatan metaheuristik dengan tujuan untuk menemukan rute optimum (Christiansen et al., 2011) dan pola optimum alokasi suplai produk (Rajeshwar et al., 2012) untuk meminimumkan total biaya distribusi 4 eselon (Santoso et al. 2009). Alokasi suplai produk dengan PSO meningkatkan efisiensi pada sistem rantai pasok 4 eselon menjadi optimal (Domoto et al., 2007). Optimasi rantai pasok oleh Sathish et al., (2010) tentang suplai produk optimal pada 4 tahap level distribusi menghasilkan biaya minimal pada setiap level distribusi dengan PSO. Algoritma PSO pengaturan rute jaringan distribusi dengan dasar *traveling salesman problem* (TSP) diskrit baru telah dikembangkan oleh Shi et al., (2007), Elizabeth F.G. et al., (2008), dan Xin-Li XU. et al., (2012) dengan memperoleh hasil alokasi pemilihan rute terpendek sebagai solusi optimal.

Pemilihan algoritma PSO yang digunakan untuk menyelesaikan optimasi distribusi 4 eselon logistik operasi laut sebagai alternatif dari *genetic algorithm*, karena PSO memiliki *robust* yang baik untuk memecahkan permasalahan multi variabel berdimensi besar (Kennedy dan Eberhart, 1995) PSO memiliki kelebihan antara lain sangat mudah diimplementasikan dan diintegrasikan dengan TSP (Elizabeth F.G. et al., 2008) tidak membutuhkan perhitungan turunan, simpel dan efisien apabila dibandingkan dengan *genetic algorithm* (Marinakos et al., 2010), PSO lebih cepat konvergen dalam menemukan solusi optimal (Shi et al., 2007, Sedighzadeh dan Masehian, 2009) semua partikel menuju ke global optimum melalui adaptasi yang diturunkan dari perilaku *swarm* yang menerapkan prosedur *updating* kecepatan dan posisi partikel secara simultan dan dinamis (Rajeshwar et al., 2012). PSO dapat mencari solusi global optimum pada sebuah fungsi tujuan (Santosa. B, 2011) dengan cara mengatur keseimbangan kemampuan eksplorasi lokal dan global yang di kontrol oleh faktor bobot inersia sebagai parameter penurunan kecepatan untuk menghindari stagnasi partikel di lokal optimum sehingga dihasilkan solusi global optimum (Shi dan Eberhart, 1998).

Pada penelitian di atas algoritma TSP dengan PSO oleh penelitian terdahulu sangat membantu dalam pengembangan model yang dilakukan oleh peneliti, namun demikian pada penelitian terdahulu tersebut belum mempertimbangkan pemilihan moda transportasi jenis kapal logistik dari biaya transportasi, biaya bongkar muat, biaya komoditas rusak dan biaya kehilangan material tiap frekuensi pengiriman, sementara hal tersebut merupakan variabel keputusan dominan untuk mendapatkan total biaya distribusi minimum.

Dari hasil survei literatur diatas menunjukkan bahwa belum pernah dilakukan studi penelitian untuk menghasilkan model optimasi distribusi 4 eselon logistik operasi laut yang menganut pola alokasi distribusi *share shipping* multi komoditas pada tiap eselon yang memanfaatkan pangkalan aju sebagai gudang penyangga untuk meredam ketidakpastian *demand* multi komoditas dengan metode pengirimannya melalui RAS dan sekaligus menjawab *lost capacity* moda transportasi kapal logistik pada penelitian terdahulu.

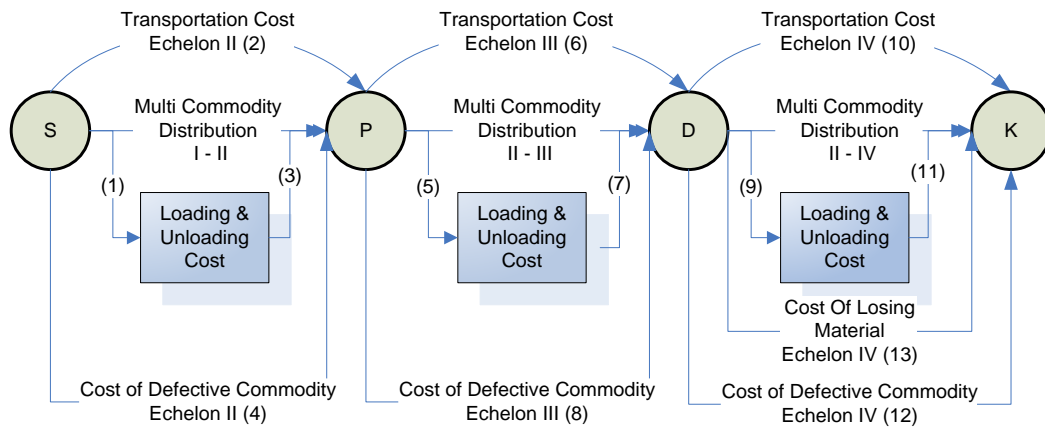
Paper ini mengembangkan integrasi algoritma PSO, TSP dengan *transshipment*. PSO sebagai *framework* untuk *heuristics hybridization* (Elizabeth F.G. et al., 2008). Integrasi 3 algoritma ini untuk menyelesaikan masalah optimasi kombinatorial *multiple capacitated vehicle routing problem* dan *allocation logistics distribution problem* (Machado dan Lopes, 2005 dan Chengming, 2011) yang dapat diklasifikasikan dalam algoritma hybrid PSO untuk *multiple capacitated vehicle transshipment*. Pada algoritma hybrid PSO mencakup algoritma *mixed fleet transshipment* yang berfungsi untuk pemilihan moda transportasi jenis kapal logistik dengan total biaya distribusi yang paling minimum selama satu horizon perencanaan.

3. DESKRIPSI SISTEM DAN ASUMSI

Dalam studi empiris yang dilakukan pada sistem distribusi 4 eselon logistik operasi laut di Koarmatim, terdapat sejumlah entitas dalam tiap eselon yang mencakup sebaran wilayah distribusi di Koarmatim. Pada eselon 1 terdapat 2 pangkalan induk adalah Lantamal VI Makasar dan Lantamal IX Ambon sebagai *logistic distribution center* yang mempunyai kemampuan dan kapasitas mampu memenuhi kebutuhan multi komoditas terdiri dari bahan bakar, avtur, minyak pelumas, air tawar, makanan kering dan makanan basah 6 pangkalan aju yang merupakan eselon 2 sebagai gudang penyangga untuk titik pemusatan pembekalan di laut. Pangkalan aju yang terdiri dari Lantamal XIII Tarakan, Lanal Toli-Toli dan Lantamal VIII Menado berada pada sektor operasi I Laut Sulawesi, serta Lantamal VII Kupang, Lanal Tual dan Lantamal XI Merauke berada di sektor II perairan perbatasan dengan Australia. Moda transportasi kapal logistik yang digunakan untuk distribusi multi komoditas dari eselon 1 ke eselon 2 adalah kapal logistik KRI SMB-902 dan KRI SGG-906. Untuk KRI SMB-902 memiliki total kapasitas lebih besar 12.03% setiap frekuensi kirim dari KRI SGG-906. Pada eselon 3 terdapat 2 distributor yaitu KRI ARN-903 dan KRI SRG-911. KRI ARN-903 memiliki total kapasitas lebih besar 47.33% setiap frekuensi kirim dari KRI SRG-911 dalam mengakomodir seluruh *demand* multi komoditas eselon 4 yang terdiri dari 10 kapal *striking force* dan 4 heli sebagai proses akhir dari rantai distribusi di sistem 4 eselon.

Meningkatnya jumlah frekuensi pengiriman multi komoditas dalam operasi pengendalian laut yang digelar Koarmatim di dua sektor operasi yaitu Laut Sulawesi dan perairan perbatasan dengan Australia *linear* dengan total biaya distribusi yang dihasilkan. Sampai dengan saat ini biaya distribusi hanya meliputi biaya pengiriman (transportasi) dan belum melihat besarnya biaya bongkar muat, biaya komoditas rusak dan biaya kehilangan material yang dihasilkan tiap frekuensi pengiriman. Kondisi ini menghasilkan *shadow cost* bagi TNI AL yang seharusnya ikut menjadi komponen total biaya distribusi. Dalam proses *loading unloading* multi komoditas tiap frekuensi pengiriman dengan kapal logistik menghasilkan *defective commodity* atau komoditas rusak karena distorsi proses bongkar muat, ini terjadi pada komoditas seperti makanan kering dan makanan basah.

Pengiriman multi komoditas dari eselon 3 ke eselon 4 pada sistem distribusi 4 eselon logistik operasi laut menggunakan kapal logistik sebagai distributor melalui RAS menghasilkan kehilangan material (*lost material*). Ini terjadi pada komoditas seperti bahan bakar, air tawar, avtur dan minyak pelumas karena terjadinya penyimpangan haluan kapal saat proses RAS pada titik-titik *rendezvous* yang merupakan titik-titik pertemuan antara kapal logistik (distributor) yang berfungsi sebagai *shuttle ship* dengan kapal *striking force* dan heli (eselon 4) pada dua sektor operasi laut.



Gambar 3. Alur total biaya distribusi 4 eselon logistik operasi laut

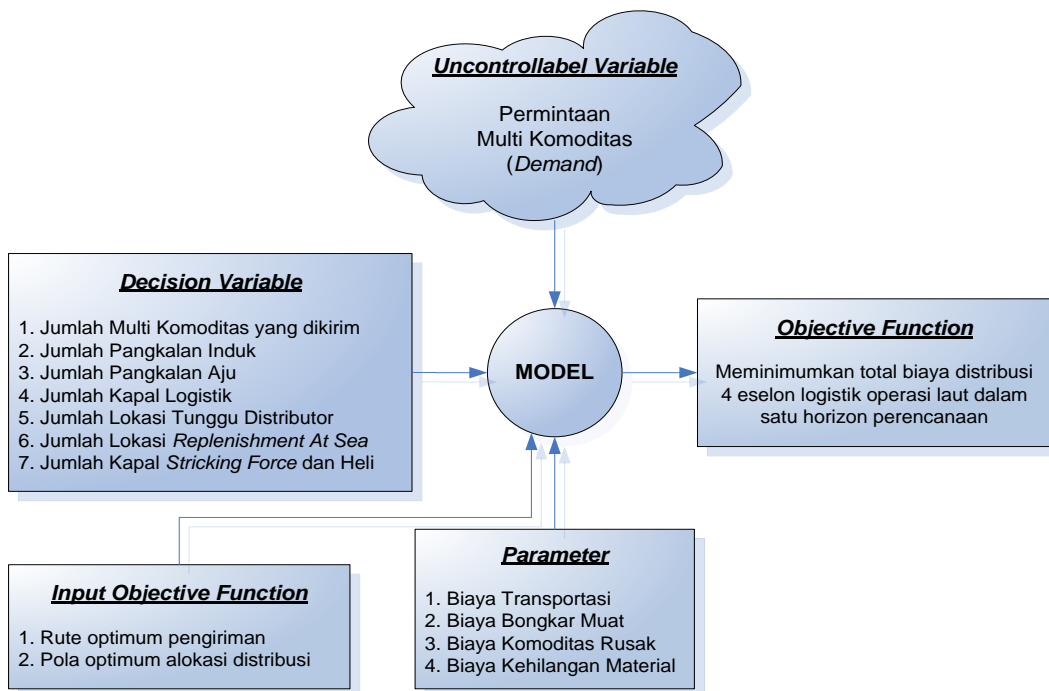
Pada Gambar 3 dapat dilihat alur total biaya distribusi di sistem 4 eselon. Dimana S merupakan pangkalan induk, P adalah pangkalan aju sebagai gudang penyangga dan D adalah kapal logistik sebagai distributor serta K adalah kapal *stricking force* dan heli. Dari kondisi nyata seperti Gambar 3, dibuatlah model total biaya distribusi dengan mempertimbangkan pemilihan moda transportasi kapal logistik, biaya transportasi, biaya bongkar muat, biaya komoditas rusak, biaya kehilangan material, jumlah kuantitas dikirimkan, kapasitas muat moda transportasi kapal logistik, konsumsi sendiri moda transportasi kapal logistik dan jarak tempuh pengiriman dengan pengiriman berbagi multi komoditas pada tiap eselon sehingga dapat menghasilkan *real cost distribution*.

Model pada paper ini bertujuan menurunkan total biaya distribusi 4 eselon selama satu horizon perencanaan operasi laut yang dapat diterapkan di Komando Armada RI Kawasan Timur.

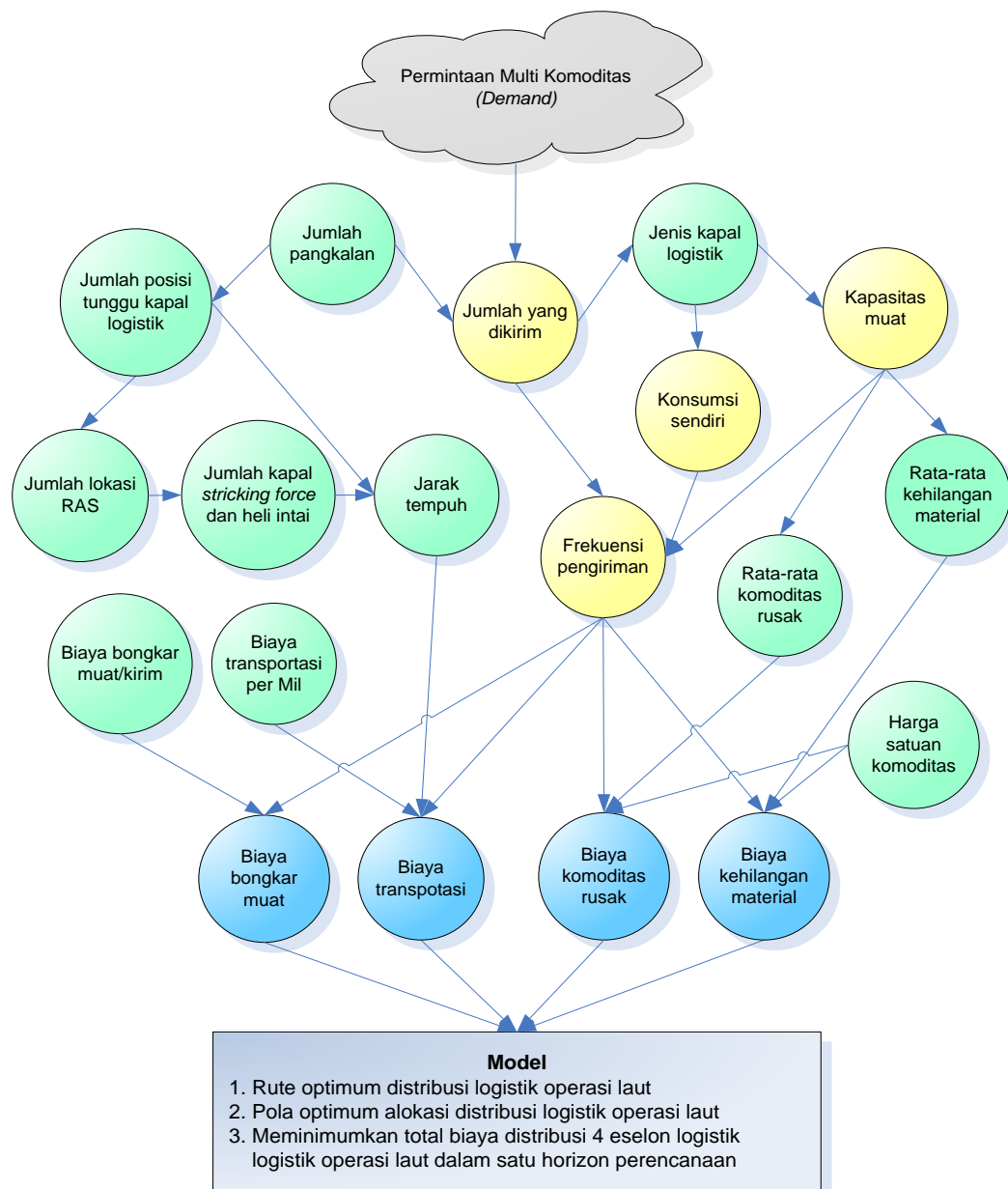
4. MATHEMATICAL MODELING

Langkah awal pemodelan dimulai dengan eksplorasi variabel karakterisasi sistem sebagai penekanan sebuah aspek dasar dalam sebuah sistem terdiri dari beberapa variabel berhubungan secara langsung dengan model optimasi distribusi 4 eselon logistik operasi laut sehingga diperoleh sebuah fungsi tujuan dan batasan model. Pada tahap awal dibangun diagram sistem *input output* yang digunakan untuk mengelompokkan jenis tiap variabel. Diagram sistem *input output* digunakan untuk memperoleh *decision variable*, *parameter*, *uncontrollable variable*, *input objective function* dan *objective function* model.

Pada tahap kedua langkah pemodelan dibuat *influence diagram* sistem distribusi 4 eselon yang digunakan untuk melihat hubungan setiap variabel pembentuk fungsi tujuan model optimasi distribusi 4 eselon logistik operasi laut.



Gambar 4. Diagram sistem *input output*



Gambar 5. Influence diagram total biaya distribusi

Pada Gambar 5 dapat dilihat tiap variabel pembentuk model optimasi distribusi 4 eselon logistik operasi laut dengan mempertimbangkan kebijakan pemilihan moda transportasi jenis kapal logistik, biaya transportasi, biaya bongkar muat dan biaya komoditas rusak serta biaya kehilangan material tiap frekuensi pengiriman.

4.1 Notasi Matematik

Notasi matematik yang digunakan dalam paper ini adalah sebagai berikut :

- K, H = Kapal *striking force* dan heli (Eselon 4)
(Indek di variabel adalah posisi subscript)
- D = Distributor atau kapal logistik (Eselon 3)
(Indek di variabel adalah posisi subscript)
- P = Pangkalan aju (Eselon 2)
(Indek di variabel adalah posisi subscript)
- S = Pangkalan induk (Eselon 1)
(Indek di variabel adalah posisi subscript)

- k = Kapasitas muat kapal logistik
(Indek di variabel adalah posisi subscript)
- d = Jarak tempuh antar eselon (Nautical Mil)
- Q = Jumlah yang dikirim dalam 1 periode pengiriman
- μ_1 = Kapasitas moda transportasi KRI SMB-902
- μ_2 = Kapasitas moda transportasi KRI SGG-906
- μ_3 = Kapasitas moda transportasi KRI ARN-903
- μ_4 = Kapasitas moda transportasi KRI SRG-911
- J_{Ops} = Jarak operasi dalam satu hari (Nautical mil)
- v = Kecepatan kapal logistik (Nautical Mil per Jam)
- P_b = Pemakaian bahan bakar (Liter per Jam)
- J_p = Jumlah personil moda transportasi kapal logistik
- I_M = Total indeks makanan (Kg per Hari)
- K_s = Konsumsi sendiri multi komoditas kapal logistik untuk komoditas bahan bakar, minyak pelumas dan air tawar (Liter per Hari) dan makanan (Kg per Hari).
- C_t = Biaya transportasi per Nautical Mil (Rp)
- CT = Biaya transportasi (Rp)
- C_l = Biaya logistik cair (Rp)
- C_p = Biaya logistik personil (Rp)

C_h = Biaya pemeliharaan kapal selama operasi (Rp)
 C_{ops} = Biaya operasional kapal logistik (Rp)
 C_{bm} = Biaya sekali bongkar muat per kirim (Rp)
 CB = Biaya bongkar muat (Rp)
 dr = Rata-rata komoditas rusak per kirim
 CP = Biaya komoditas rusak (Rp)
 lr = Rata-rata *lost material* per kirim
 CL = Biaya kehilangan material (Rp)
 C_k = Harga satuan komoditas/material (Rp)
 DC = Biaya distribusi mempertimbangkan moda transportasi kapal logistik, biaya transportasi, biaya bongkar muat, biaya komoditas rusak dan biaya kehilangan material (Rp)

4.2 Pengembangan Model

Pemilihan moda transportasi kapal logistik, biaya transportasi, biaya bongkar muat, biaya komoditas rusak dan biaya kehilangan material yang masuk dalam komponen total biaya distribusi dalam satu periode pengiriman menjadi faktor penunjang tingginya biaya distribusi yang harus ditanggung oleh TNI AL setiap tahunnya.

a. Konsumsi sendiri kapal logistik

Konsumsi sendiri (K_s) bahan bakar atau HSD merupakan hasil dari jarak tempuh (d) dibagi kecepatan (V) dikali pemakaian HSD per jam (P_b). Konsumsi sendiri (K_s) minyak pelumas adalah 2% dari (K_s) HSD. Konsumsi sendiri (K_s) air tawar adalah 5% (K_s) HSD ditambah jumlah personil (J_p) dikali 50 liter per hari dan Konsumsi sendiri (K_s) makanan kering serta makanan basah merupakan total indeks makanan (I_{MK}) dikalikan jumlah personil (J_p) dapat diformulasikan :

$$K_s = \left\{ \frac{J_{ops}}{V} P_b + 2\% \frac{J_{ops}}{V} P_b + \left(5\% \frac{J_{ops}}{V} P_b + J_p 50 \right) + I_M J_p \right\} \quad (1)$$

b. Biaya transportasi

Biaya transportasi (CT) merupakan hasil dari jumlah multi komoditas yang dikirim (Q) dibagi oleh kapasitas muat moda transportasi kapal logistik (μ) ditambah konsumsi sendiri (K_s) dikali jarak tempuh (d) dan biaya transportasi per Nautical Mil (C_t) diformulasikan :

$$CT = \left\{ \frac{Q}{\mu + K_s} d C_t \right\} \quad (2)$$

c. Biaya operasional kapal logistik

Biaya operasi (C_{ops}) merupakan komponen pembentuk biaya transportasi per Nautical Mil (C_t) dihasilkan dari penjumlahan biaya logistik cair (C_l) dan biaya logistik personil (C_p) serta biaya pemeliharaan kapal selama operasi (C_h) dapat diformulasikan :

$$C_{ops} = \{C_l + C_p + C_h\} \quad (3)$$

d. Biaya bongkar muat

Biaya bongkar muat (CB) merupakan hasil dari jumlah multi komoditas yang dikirim (Q) dibagi oleh kapasitas muat moda transportasi kapal logistik (μ) ditambah konsumsi sendiri (K_s) dikali biaya sekali bongkar muat (C_{bm}) yang diadopsi dari kondisi nyata pada saat bongkar muat antar tiap eselon di Koarmatim dapat diformulasikan :

$$CB = \left\{ \frac{Q}{\mu + K_s} C_{bm} \right\} \quad (4)$$

e. Biaya komoditas rusak

Biaya komoditas rusak (CP) merupakan hasil dari jumlah multi komoditas yang dikirimkan (Q) dibagi kapasitas muat moda transportasi kapal logistik (μ) ditambah konsumsi sendiri (K_s) dikali kapasitas muat moda transportasi (μ), dan konstanta rata-rata komoditas rusak per pengiriman (dr) serta harga satuan multi komoditas (C_k) dapat diformulasikan :

$$CP = \left\{ \frac{Q}{\mu + K_s} (\mu dr C_k) \right\} \quad (5)$$

f. Biaya kehilangan material

Biaya kehilangan material (CL) merupakan hasil jumlah multi komoditas yang dikirimkan (Q) dibagi kapasitas muat moda transportasi kapal logistik (μ) ditambah konsumsi sendiri (K_s) dikali kapasitas muat moda transportasi (μ), konstanta rata-rata kehilangan material per pengiriman (lr) dan harga satuan multi komoditas (C_k) dapat diformulasikan :

$$CL = \left\{ \frac{Q}{\mu + K_s} (\mu lr C_k) \right\} \quad (6)$$

g. Total biaya distribusi

Dari formulasi model biaya transportasi (2), biaya bongkar muat (4), biaya komoditas rusak (5) dan biaya kehilangan material (6) dihasilkan model optimasi distribusi logistik operasi laut (DC) dengan formulasi :

$$\begin{aligned}
 DC(Q, \mu) &= \{CT + CB - CP - CL\} \\
 &= \left\{ \left(\frac{Q}{\mu + K_s} (d C_t + C_{bm}) \right) - \left(\frac{Q}{\mu + K_s} (\mu (dr C_k + lr C_k)) \right) \right\} \quad (7)
 \end{aligned}$$

Model ini hanya berlaku untuk menghitung total biaya distribusi per eselon (satu) dengan mempertimbangkan moda transportasi jenis kapal logistik dan biaya transportasi, biaya bongkar muat, biaya komoditas rusak serta biaya kehilangan material.

4.3 Formulasi Model

Model optimasi distribusi 4 eselon logistik operasi laut dikembangkan untuk menentukan rute optimum dan pola optimum alokasi distribusi multi komoditas dari kapal *stricking force* dan heli untuk meminimumkan biaya total sistem selama horizon perencanaan yang mempertimbangkan kebijakan pemilihan moda transportasi jenis kapal logistik dan biaya transportasi, biaya bongkar muat, biaya komoditas rusak serta biaya kehilangan material yang dihasilkan setiap frekuensi pengiriman. Biaya total sistem selama horizon perencanaan operasi laut merupakan penjumlahan total biaya distribusi pada eselon 4, eselon 3, eselon 2 serta eselon 1 dapat diperinci sebagai berikut :

a. Biaya distribusi Eselon 4 ($DC_{K,H}^D$)

Biaya distribusi Eselon 4 dapat dituliskan :

$$DC_{K,H}^D(Q, \mu) = \sum_{D=1}^2 \sum_{K=1}^{10} \sum_{H=1}^4 \left\{ \frac{Q_{K,H}^D}{\mu_{K,H}^D + K_s} (d_{K,H}^D (C_l + C_p + C_h) + C_{bm}) \right\} - \sum_{D=1}^2 \sum_{K=1}^{10} \sum_{H=1}^4 \left\{ \frac{Q_{K,H}^D}{\mu_{K,H}^D + K_s} (\mu_{K,H}^D dr C_k) \right\} - \sum_{D=1}^2 \sum_{K=1}^{10} \sum_{H=1}^4 \left\{ \frac{Q_{K,H}^D}{\mu_{K,H}^D + K_s} (\mu_{K,H}^D lr C_k) \right\} \quad (8)$$

b. Biaya distribusi Eselon 3 (DC_D^P)

Biaya distribusi Eselon 3 dapat dituliskan :

$$DC_D^P(Q, \mu) = \sum_{P=1}^6 \sum_{D=1}^2 \left\{ \frac{Q_D^P}{\mu_D^P + K_s} (d_D^P (C_l + C_p + C_h) + C_{bm}) \right\} - \sum_{P=1}^6 \sum_{D=1}^2 \left\{ \frac{Q_D^P}{\mu_D^P + K_s} (\mu_D^P dr C_k) \right\} \quad (9)$$

c. Biaya distribusi Eselon 2 (DC_P^S)

Biaya distribusi Eselon 2 dapat dituliskan :

$$DC_P^S(Q, \mu) = \sum_{S=1}^2 \sum_{P=1}^6 \left\{ \frac{Q_P^S}{\mu_P^S + K_s} (d_P^S (C_l + C_p + C_h) + C_{bm}) \right\} - \sum_{S=1}^2 \sum_{P=1}^6 \left\{ \frac{Q_P^S}{\mu_P^S + K_s} (\mu_P^S dr C_k) \right\} \quad (10)$$

d. Biaya distribusi Eselon 1 (DC_S)

Total biaya distribusi pada pangkalan induk (*Logistic distribution center*) diasumsikan nol karena jarak dari *line packing* dengan gudang pada pangkalan induk berdekatan dan proses pemindahannya mengeluarkan biaya cukup kecil (*commodity handling*).

$DC_S(Q, \mu) =$ Diasumsikan nol karena berdekatan dengan *line packing* (11)

e. Objective function

Objective function pada model ini adalah meminimumkan total biaya distribusi 4 eselon dengan mempertimbangkan pemilihan moda transportasi kapal logistik, biaya transportasi, biaya bongkar muat, biaya komoditas rusak dan biaya kehilangan material yang dituliskan sebagai berikut :

$$Min DC(Q_S, Q_{6P}^{2S}, Q_{2D}^{6P}, Q_{10K,4H}^{2D}, \mu_{4k}) = DC_S \quad (12)$$

$$DC_P^S + DC_D^P + DC_{K,H}^D$$

f. Constraint

Sistem distribusi 4 eselon logistik operasi laut menerapkan *echelon inventory*, maka jumlah *demand* di sebuah eselon merupakan jumlah semua *demand* di eselon yang mengikutinya (Santoso et al., 2009), misal jumlah *demand* di distributor adalah jumlah *demand* di kapal *stricking force*. Total persediaan pada sebuah eselon dalam *echelon inventory* (Bahagia, S.N., 2008) merupakan jumlah persediaan di eselon tersebut dan semua persediaan pada eselon yang mengikutinya. Beberapa batasan yang digunakan model ini adalah :

$$\sum_{S=1}^2 Q_S \leq \mu_{max_S} \quad (13)$$

$$\sum_{P=1}^6 Q_P^S \leq \sum_{O=1}^2 Q_S \quad (14)$$

$$\sum_{D=1}^2 Q_D^P \leq \sum_{P=1}^6 Q_P^S \quad (15)$$

$$\sum_{K=1}^{10} Q_K^D + \sum_{H=1}^4 Q_H^D \leq \sum_{D=1}^2 Q_D^P \quad (16)$$

$$\sum_{P=1}^6 Q_P^S \leq \sum_{P=1}^6 \mu_{max_P} \quad (17)$$

$$\sum_{D=1}^2 Q_D^P \leq \sum_{D=1}^2 \mu_{max_D} \quad (18)$$

$$\sum_{K=1}^{10} Q_K^D \leq \sum_{K=1}^{10} \mu_{max_K} \quad (19)$$

$$\sum_{H=1}^4 Q_H^D \leq \sum_{H=1}^4 \mu_{max_H} \quad (20)$$

$$S \leq \text{Kapasitas maksimum persediaan multi komoditas pangkalan induk dalam satu siklus operasi} \quad (21)$$

$$P \leq \text{Kapasitas maksimum tampung pangkalan aju sebagai gudang penyangga} \quad (22)$$

$$D \leq \text{Kapasitas maksimum tampung moda transportasi kapal logistik sebagai distributor} \quad (23)$$

$$K, H = \text{Permintaan multi komoditas di kapal stricking force dan heli} \quad (24)$$

$$\mu_{1,2} \leq \text{Kapasitas angkut multi komoditas per frekuensi pengiriman} \quad (25)$$

$$\mu_{3,4} \leq \text{Kapasitas angkut multi komoditas per frekuensi pengiriman} \quad (26)$$

$$Q \geq 1 \text{ integer} \quad (27)$$

Pada *constraint* atau pembatas (13) sampai dengan (20) memastikan kondisi alokasi distribusi multi komoditas dalam koordinasi sistem distribusi 4 eselon logistik operasi laut dengan perencanaan terkoordinasi yang berarti kebijakan persediaan dan transportasi diputuskan secara terkoordinasi harus dipatuhi oleh semua eselon dalam sistem distribusi 4 eselon dan *constraint* (21) hingga (23) membatasi kapasitas simpan multi komoditas tiap eselon. *Constraint* (24) merupakan total *demand* multi komoditas eselon 4. *Constraint* (25) hingga (26) merupakan kapasitas muat moda transportasi kapal logistik sebagai transporter dan distributor, sedangkan *constraint* (27) memastikan variabel keputusan kuantitas (Q) merupakan bilangan bulat dan bernilai lebih besar dari nol.

5. ALGORITMA MODEL

Problem optimasi dengan variabel keputusan pemilihan moda transportasi dapat dikategorikan sebagai optimasi kombinatorial (Papadimitriou dan Steiglitz, 1982). Selain itu, pengaturan rute (*vehicle routing problem*) dalam pengiriman berbagi pada tiap eselon juga merupakan problem optimasi kombinatorial (Cordeau et al., 2002).

Dengan demikian problem model ini secara keseluruhan dapat dikategorikan sebagai problem optimasi kombinatorial dan masuk dalam kategori model *mixed fleet transshipment*. Solusi model dilakukan untuk memperoleh hasil optimal pada saat model diterapkan.

Pengujian model dilakukan dengan validasi dan verifikasi model optimasi distribusi 4 eselon logistik operasi laut dengan menggunakan bantuan *software* MATLAB pada algoritma *hybrid non linear inertia weight particle swarm optimization* untuk *multiple capacitated vehicle transshipment* dengan fungsi tujuan solusi minimum global.

5.1 Algoritma PSO Untuk TSP

Algoritma PSO sebagai algoritma solusi rute optimum dan alokasi optimum dengan pola alokasi distribusi *share shipping* multi komoditas semua eselon untuk mempertahankan *endurance* kapal *stricking force* dan heli intai dalam satu horizon perencanaan operasi laut.

- Langkah 1: Penentuan nilai parameter ukuran populasi = 40. Ukuran partikel = 20 dan swarm = 20. Inialisasi populasi secara random dalam ruang multi dimensi.
- Langkah 2: Bangkitkan posisi dan kecepatan partikel secara random dan urutkan posisi dari nilai terkecil sampai nilai terbesar.
- Langkah 3: Mendapatkan rute pengiriman multi komoditas dari E1 ke E 2.
- Langkah 4: Evaluasi nilai total jarak tiap rute yang dilewati partikel dari E 1 ke E 2 dan evaluasi nilai fitness tiap partikel berdasarkan posisi terbaiknya.
 - Hitung tiap rute pengiriman berdasarkan matriks jarak dari E 1 ke E 2.
 - Hitung alokasi multi komoditas sesuai kapasitas muat dan konsumsi harian tiap eselon sesuai urutan rute pengiriman dan jarak terpendek dari E 1 ke E 2.
 - Hitung total biaya distribusi setiap moda transportasi sesuai rute terpendek E 1 ke E 2 dan pola alokasi E 1 ke E 2.
- Langkah 5: Tentukan partikel yang memiliki jarak terkecil dengan fitness terbaik sebagai Gbest dan nilai awal sebagai Pbest.
 - Urutkan rute pengiriman dari E 1 ke E 2 sesuai nilai Pbest dan Gbest.
 - Urutkan alokasi multi komoditas dari E 1 ke E 2 sesuai nilai Pbest dan Gbest.
 - Urutkan total biaya distribusi setiap moda transportas jenis kapal logistik dari E 1 ke E 2 sesuai nilai Pbest dan Gbest.
- Langkah 6: Tentukan kecepatan awal partikel dengan kecepatan awal = 0.1.
- Langkah 7: Memperbarui kecepatan partikel dengan formulasi sebagai berikut :
 - Basic* PSO (B-PSO) merupakan formulasi *update* kecepatan tanpa bobot inersia (Kennedy and Ebethart, 1995).

$$V_i^{new} = \left\{ \begin{array}{l} V_i(t-1) + c_1 r_1 \\ (P_{best} - X_i(t-1)) \\ + c_2 r_2 (G_{best} - X_i(t-1)) \end{array} \right\} \quad (28)$$
 - Linearly decreasing inertia weight* PSO (LDIW-PSO) merupakan formulasi *update* kecepatan dengan bobot inersia untuk

batas max = 0.9 dan min = 0.4 (Shi and Eberhart, 1998) bobot inersia mengalikan formulasi *update* kecepatan dari iterasi sebelumnya yang menurun secara linier sepanjang eksekusi algoritma.

$$V_i^{new} = \left\{ \begin{array}{l} \theta V_i(t-1) + c_1 r_1 \\ (P_{best} - X_i(t-1)) \\ + c_2 r_2 (G_{best} - X_i(t-1)) \end{array} \right\} \quad (29)$$

$$\theta = \theta_{max} - \left\{ \frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{iter_{max}} \right\} \times iter \quad (30)$$

$$V_i^{new} = \left\{ \begin{array}{l} \theta_{iter} V_i(t-1) + c_1 r_1 \\ (P_{best} - X_i(t-1)) \\ + c_2 r_2 (G_{best} - X_i(t-1)) \end{array} \right\}$$

$$\theta_{iter} = \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{(iter_{max} - iter_{min})^n}{(iter_{max})^n} \right) \\ (\theta_{initial} - \theta_{final}) + \theta_{final} \end{array} \right\} \quad (32)$$

$$m = \left\{ \frac{(\theta_{initial} - \theta_{final})}{iter_{max}} \right\} \quad (33)$$

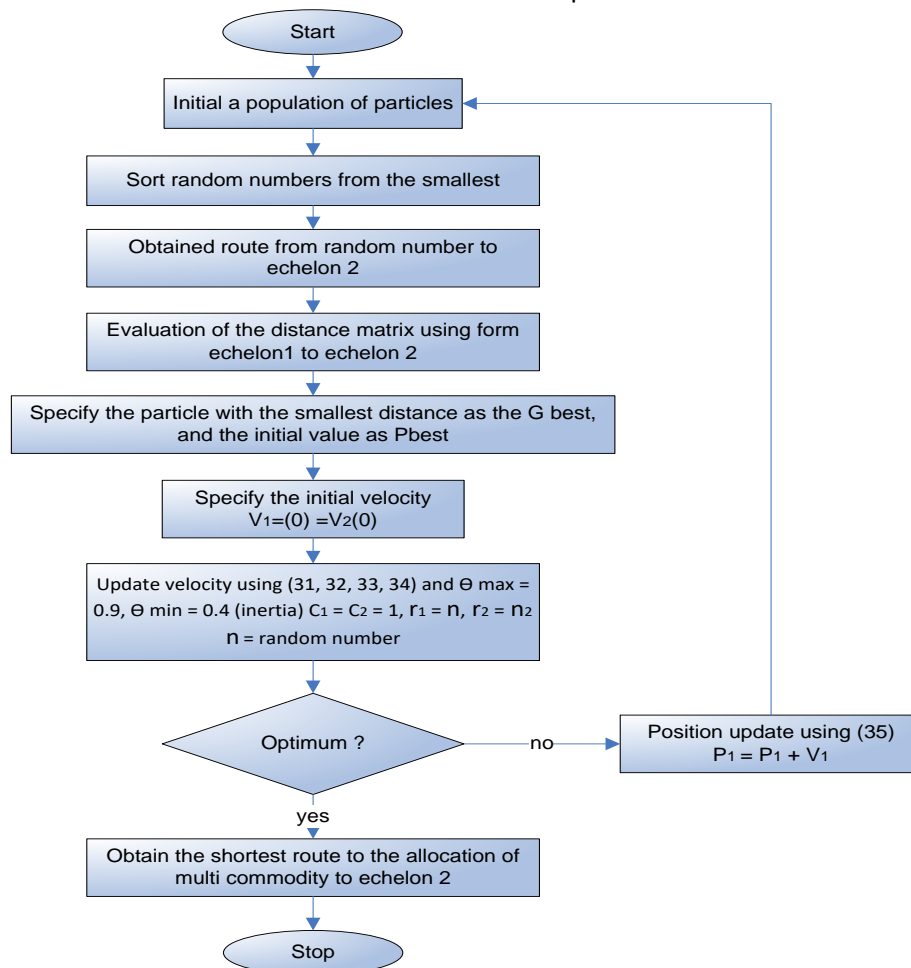
$$\theta_{final} = \{\theta_{initial} + (m \times iter_{max})\} \quad (34)$$

3) *Non linear inertia weight* PSO (NLIW-PSO) adalah formulasi update kecepatan partikel menggunakan bobot inersia yang diupdate secara dinamis (Rajeshwar et al., 2012), faktor inersia akan mengalikan formulasi kecepatan iterasi sebelumnya secara dinamis dengan variansi *nonlinear* inersia yang beradaptasi di sepanjang eksekusi algoritma, dapat menciptakan kecenderungan partikel terus bergerak ke arah sama dan konvergen.

h. Langkah 8: Memperbarui posisi partikel menggunakan formulasi update posisi partikel sebagai berikut :

$$X_i^{new} = X_i(t-1) + V_i^{new} \quad (35)$$

i. Langkah 9: Apakah solusi optimal, jika belum ulangi langkah diatas sampai *stopping criteria* tercapai. Mendapatkan rute optimum dan pola optimum alokasi dari E 1 ke E 2.

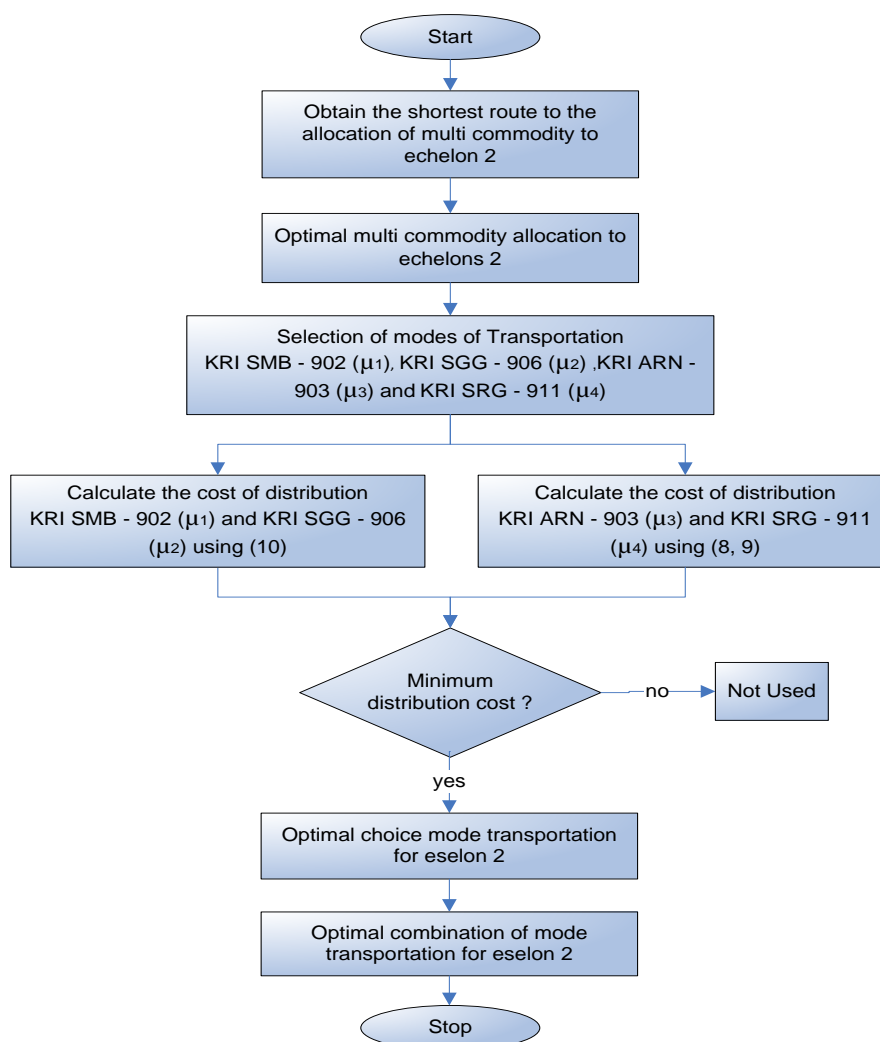


Gambar 6. Algoritma I penentuan rute dan alokasi multi komoditas dengan PSO untuk TSP

5.2 Algoritma *Mixed Fleet Transshipment*

Algoritma *mixed fleet transshipment* adalah algoritma solusi model untuk menyelesaikan fungsi tujuan minimum total biaya distribusi 4 eselon dengan pemilihan kombinatorial moda transportasi jenis kapal logistik yang menghasilkan total biaya distribusi 4 eselon paling minimum selama satu horizon perencanaan.

- a. Langkah 1: Mendapatkan solusi optimal untuk rute pengiriman dan pola alokasi distribusi multi komoditas untuk E 2 dari algoritma PSO untuk TSP seperti Gambar 6.
- b. Langkah 2: Solusi optimal untuk alokasi multi komoditas E 2.
- c. Langkah 3: Pemilihan kombinatorial moda transportasi kapal logistik dengan menghitung total biaya distribusi yang paling minimum dari E 1 ke E 2 dengan menggunakan moda transportasi jenis kapal logistik terdiri dari KRI SMB-902, KRI SGG-906, KRI ARN-903 dan KRI SRG-911.
- d. Langkah 4: Menghitung total biaya distribusi dari E 1 ke E 2 dengan moda transportasi kapal logistik terdiri dari KRI SMB-902, KRI SGG-906, KRI ARN-903 dan KRI SRG-911 untuk menentukan kombinasi optimal moda transportasi jenis kapal logistik dengan biaya distribusi yang minimum.
- e. Langkah 5: Periksa apakah solusi optimal untuk total biaya distribusi yang dihasilkan dari E 1 ke E 2.
- f. Langkah 6: Jika biaya distribusi minimum, maka diperoleh pemilihan kombinasi optimal moda transportasi jenis kapal logistik dengan biaya distribusi minimum untuk E 2.
- g. Langkah 7: Mendapatkan kombinasi optimal moda transportasi jenis kapal logistik yang menghasilkan total biaya distribusi optimal atau paling minimum untuk E 1 ke E 2. Solusi biaya distribusi E 2 ke E 3 dan E 3 ke E 4 dilakukan dengan langkah-langkah sesuai E 1 ke E 2 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7 sebagai berikut :



Gambar 7. Algoritma II pemilihan kombinasi moda transportasi kapal logistik dengan *transshipment*

6. CONTOH NUMERIK

Operasi laut sangatlah bergantung dukungan logistik pangkalan pada kapal *stricking force* dan heli untuk mempertahankan *endurance* dalam satu horizon perencanaan operasi.

6.1 Input Data Optimasi Distribusi 4 Eselon

Seringkali jumlah komoditas yang dikirimkan bisa lebih kecil atau lebih besar dari kapasitas. Hal ini merupakan faktor penting untuk menentukan kombinasi optimal moda transportasi dalam sistem distribusi 4 eselon logistik laut.

Tabel 1. Konsumsi harian *stricking force*

NO	STRIKING FORCE	KONSUMSI HARIAN MULTI KOMODITAS					
		BAHAN BAKAR	AIR TAWAR	MINYAK PELUMAS	AVTUR	MAKANAN	
		Liter/Hari	Liter/Hari	Liter/Hari	Liter/Hari	KERING Kg/Hari	BASAH Kg/Hari
1	KRI FTH - 361	18.000	6.750	362	1.600	219	263
2	KRI NUK - 872	15.000	4.100	300	0	125	151
3	KRI KRS - 624	7.464	2.873	149	0	94	113
4	KRI LYG - 804	12.000	3.350	240	0	103	124
5	KRI DPN - 365	15.600	5.030	314	1.600	159	191
6	KRI AMY - 351	25.600	10.830	514	1.600	357	430
7	KRI HIU - 803	12.000	3.350	240	0	103	124
8	KRI MDU - 621	7.464	2.873	149	0	94	113
9	KRI STO - 877	15.000	4.100	300	0	125	151
10	KRI FKO - 368	15.600	5.030	314	1.600	159	191

Tabel 2. Total kapasitas pangkalan

NO	PANGKALAN TNI AL	KAPASITAS MULTI KOMODITAS					
		BAHAN BAKAR	AIR TAWAR	MINYAK PELUMAS	AVTUR	MAKANAN	
		Liter	Liter	Liter	Liter	Kg	Kg
1	MAKASAR	8.977.500	2.835.000	330.750	425.250	122.850	132.300
2	AMBON	8.505.000	2.551.500	283.500	283.500	103.950	122.850
3	TARAKAN	2.835.000	850.500	56.700	94.500	28.350	28.350
4	TOLI-TOLI	1.890.000	595.040	47.250	65.700	18.900	26.460
5	MANADO	3.685.500	945.000	94.500	132.300	38.016	44.629
6	KUPANG	3.307.500	1.020.600	94.500	122.850	30.240	37.800
7	TUAL	1.890.000	756.000	47.250	66.150	18.900	26.460
8	MERAUKE	2.561.400	661.500	81.588	94.500	28.350	32.130

Dari Tabel 4 dapat diketahui bahwa kapasitas multi komoditas dari kapal *stricking force* sangat bervariasi. Hal ini menjadi faktor penting dalam menentukan *endurance* multi komoditas kapal *stricking force* dan heli intai yang *on board* pada KRI FTH, KRI DPN, KRI AMY dan KRI FKO yang memiliki mobilitas tinggi dalam proyeksi kekuatan pada daerah operasi. Sehingga berdampak pada *demand* multi komoditas eselon 4.

Tabel 3. Total kapasitas kapal logistik

NO	KAPAL LOGISTIK	KAPASITAS MUAT MULTI KOMODITAS					
		BAHAN BAKAR	AIR TAWAR	MINYAK PELUMAS	AVTUR	MAKANAN	
		Liter	Liter	Liter	Liter	Kg	Kg
1	KRI ARN - 903	7.888.250	2.148.000	359.169	310.000	175.032	170.100
2	KRI SRG - 911	4.978.816	1.708.100	323.140	275.000	109.395	106.313
3	KRI SMB - 902	2.104.024	883.251	210.000	224.483	86.955	86.063
4	KRI SGG - 906	1.930.570	713.800	191.250	200.000	86.955	86.063

Tabel 4. Total kapasitas *stricking force*

NO	STRIKING FORCE	KAPASITAS MUAT MULTI KOMODITAS					
		BAHAN BAKAR	AIR TAWAR	MINYAK PELUMAS	AVTUR	MAKANAN	
		Liter	Liter	Liter	Liter	Kg	Kg
1	KRI FTH - 361	268.470	134.360	24.625	14.000	6.564	3.949
2	KRI NUK - 872	129.305	39.520	6.555	0	3.258	2.111
3	KRI KRS - 624	74.904	25.000	8.860	0	1.870	788
4	KRI LYG - 804	146.814	32.000	9.282	0	2.263	1.238
5	KRI DPN - 365	235.000	70.000	11.696	16.000	4.769	2.869
6	KRI AMY - 351	557.650	134.600	19.165	28.000	21.430	6.446
7	KRI HIU - 803	146.814	32.000	9.282	0	2.263	1.238
8	KRI MDU - 621	74.904	25.000	8.860	0	1.870	788
9	KRI STO - 877	129.305	39.520	6.555	0	3.258	2.111
10	KRI FKO - 368	235.000	70.000	11.696	16.000	4.769	2.869

Total *demand* multi komoditas eselon 4 yang terdiri dari 10 kapal *stricking force* dan 4 heli dalam satu siklus operasi selama 90 hari merupakan hasil dari waktu operasi dibagi *endurance* dikalikan kapasitas multi komoditas.

Tabel 5. *Endurance* kapal *stricking force*

NO	STRIKING FORCE	ENDURANCE MULTI KOMODITAS					
		BAHAN BAKAR	AIR TAWAR	MINYAK PELUMAS	AVTUR	MAKANAN	
		Hari	Hari	Hari	Hari	KERING Hari	BASAH Hari
1	KRI FTH - 361	12	18	58	9	26	13
2	KRI NUK - 872	7	9	19	0	22	12
3	KRI KRS - 624	8	8	50	0	17	6
4	KRI LYG - 804	10	9	33	0	19	9
5	KRI DPN - 365	12	13	32	10	26	13
6	KRI AMY - 351	17	11	32	18	51	13
7	KRI HIU - 803	10	9	33	0	26	9
8	KRI MDU - 621	8	8	50	0	17	6
9	KRI STO - 877	7	9	19	0	22	12
10	KRI FKO - 368	12	13	32	10	29	13

Tabel 6. Total *Demand* pada eselon 4

NO	STRIKING FORCE	DEMAND MULTI KOMODITAS					
		BAHAN BAKAR	AIR TAWAR	MINYAK PELUMAS	AVTUR	MAKANAN	
		Liter	Liter	Liter	Liter	Kg	Kg
1	KRI FTH - 361	2.025.000	675.000	62.954	144.000	23.166	27.874
2	KRI NUK - 872	1.687.500	410.000	38.320	0	13.266	15.962
3	KRI KRS - 624	839.700	287.320	24.666	0	9.900	11.912
4	KRI LYG - 804	1.350.000	335.000	34.694	0	10.890	13.103
5	KRI DPN - 365	1.755.000	503.000	44.943	144.000	16.830	10.125
6	KRI AMY - 351	2.880.000	1.083.000	73.589	144.000	37.818	45.503
7	KRI HIU - 803	1.350.000	335.000	34.694	0	10.890	13.103
8	KRI MDU - 621	839.700	287.320	24.666	0	9.900	11.912
9	KRI STO - 877	1.687.500	410.000	38.320	0	13.266	15.962
10	KRI FKO - 368	1.755.000	503.000	44.943	144.000	16.830	20.250

Tabel 7. Konsumsi harian kapal logistik

NO	KAPAL LOGISTIK	KONSUMSI HARIAN MULTI KOMODITAS					
		BAHAN BAKAR	AIR TAWAR	MINYAK PELUMAS	AVTUR	MAKANAN	
		Liter/Hari	Liter/Hari	Liter/Hari	Liter/Hari	Kg/Hari	Kg/Hari
1	KRI ARN - 903	12.000	6.600	280	0	224	270
2	KRI SRG - 911	10.000	4.250	240	0	140	169
3	KRI SMB - 902	3.500	2.675	70	0	94	113
4	KRI SGG - 906	3.500	2.675	70	0	94	113

Tabel 8. Konsumsi sendiri per nautical mil

NO	KAPAL LOGISTIK	KONSUMSI SENDIRI PER NAUTICAL MIL					
		BAHAN BAKAR	AIR TAWAR	MINYAK PELUMAS	AVTUR	MAKANAN	
		Liter	Liter	Liter	Liter	Kg	Kg
1	KRI ARN - 903	41.67	22.92	0.97	0	0.78	0.94
2	KRI SRG - 911	41.67	17.71	1.00	0	0.58	0.70
3	KRI SMB - 902	18.23	13.93	0.36	0	0.49	0.59
4	KRI SGG - 906	24.31	18.58	0.49	0	0.65	0.78

Biaya bongkar muat tiap moda transportasi kapal logistik tiap satu frekuensi pengiriman adalah KRI ARN-903 = Rp. 9.050.000, KRI SRG-911 = Rp. 8.250.000, KRI SMB-902 = Rp. 7.200.000 dan KRI SGG-906 = Rp. 6.850.000.

Konstanta rata-rata komoditas rusak tiap moda transportasi jenis kapal logistik adalah KRI ARN-903 = 0.00061, KRI SRG-911 = 0.00062, KRI SMB-902 = 0.00064 dan KRI SGG-906 = 0.00067 tiap frekuensi pengiriman.

Konstanta rata-rata kehilangan material tiap moda transportasi jenis kapal logistik adalah KRI ARN-903 = 0.00101, KRI SRG-911 = 0.00101, KRI SMB-902 = 0.00104 dan KRI SGG-906 = 0.00105 tiap frekuensi pengiriman. Biaya transportasi per nautical mil adalah penjumlahan biaya logistik cair, logistik personil dan harkaops.

Tabel 9. Biaya transportasi per nautical mil

NO	KAPAL LOGISTIK	BIAYA TRANSPORTASI KAPAL LOGISTIK			
		BIAYA LOGISTIK CAIR	BIAYA LOGISTIK PERSONIL	BIAYA HARKAP KAPAL	TOTAL BIAYA
		Per Mil	Per Mil	Per Mil	Per Mil
1	KRI ARN - 903	Rp 252,500	Rp 22,150	Rp 675	Rp 275,325
2	KRI SRG - 911	Rp 251,458	Rp 17,552	Rp 694	Rp 269,705
3	KRI SMB - 902	Rp 111,250	Rp 15,671	Rp 723	Rp 127,644
4	KRI SGG - 906	Rp 148,333	Rp 20,894	Rp 965	Rp 170,192

6.2 Pengujian Model

Pengujian model dilakukan dengan validasi dan verifikasi model pada kondisi nyata sistem distribusi 4 eselon logistik operasi pengendalian laut di Koarmatim dengan algoritma *hybrid non linear inertia weight particle swarm optimization* untuk *multiple capacitated vehicle transshipment* dengan bantuan *software MatLab* pada skala 20 iterasi dan variabel keputusan adalah 2 pangkalan induk sebagai E 1, 2 moda transportasi jenis kapal logistik sebagai transporter, 6 pangkalan aju sebagai E 2 dan 2 moda transportasi kapal logistik sebagai distributor merupakan E 3 serta 10 kapal *striking force* dan 4 heli sebagai E 4.

Input data optimasi distribusi 4 eselon logistik operasi laut seperti pada Tabel 1 sampai dengan Tabel 9 dan matriks jarak tempuh distribusi antar eselon seperti pada Tabel 10.

Diperoleh hasil optimal dengan integrasi 2 algoritma solusi model yaitu algoritma penentuan rute pengiriman dan pola alokasi multi komoditas dengan PSO untuk TSP dan algoritma pemilihan moda transportasi jenis kapal logistik dan biaya distribusi optimal dengan *transshipment*. Hasil algoritma solusi pada pengujian model terhadap kondisi nyata sistem distribusi 4 eselon logistik operasi laut seperti Tabel 11 sampai 17.

Tabel 18. Komponen biaya distribusi

NO	KOMPONEN BIAYA	KOMBINASI MODA TRANSPORTASI		EFISIENSI
		SMB-902 & ARN-903	SGG-906 & SRG-911	
		Kombinasi 1		
1	Biaya Transportasi	Rp 1,400,330,029	Rp 2,044,596,982	46.01%
2	Biaya Bongkar Muat	Rp 149,114,567	Rp 174,159,137	16.80%
3	Biaya Komoditas Rusak	Rp 241,582,284	Rp 249,764,121	3.39%
4	Biaya Kehilangan Material	Rp 118,836,867	Rp 120,601,451	1.48%
5	Biaya Distribusi 4 Eselon	Rp 1,189,025,445	Rp 1,848,390,548	55.45%
NO	KOMPONEN BIAYA	KOMBINASI MODA TRANSPORTASI		EFISIENSI
		SMB-902 & ARN-903	SGG-906 & ARN-903	
		Kombinasi 1		
1	Biaya Transportasi	Rp 1,400,330,029	Rp 1,631,294,442	16.49%
2	Biaya Bongkar Muat	Rp 149,114,567	Rp 155,319,712	4.16%
3	Biaya Komoditas Rusak	Rp 241,582,284	Rp 247,591,122	2.49%
4	Biaya Kehilangan Material	Rp 118,836,867	Rp 118,836,867	0.00%
5	Biaya Distribusi 4 Eselon	Rp 1,189,025,445	Rp 1,420,186,164	19.44%
NO	KOMPONEN BIAYA	KOMBINASI MODA TRANSPORTASI		EFISIENSI
		SMB-902 & ARN-903	SMB-902 & SRG-911	
		Kombinasi 1		
1	Biaya Transportasi	Rp 1,400,330,029	Rp 1,813,632,569	29.51%
2	Biaya Bongkar Muat	Rp 149,114,567	Rp 167,953,992	12.63%
3	Biaya Komoditas Rusak	Rp 241,582,284	Rp 243,755,283	0.90%
4	Biaya Kehilangan Material	Rp 118,836,867	Rp 120,601,451	1.48%
5	Biaya Distribusi 4 Eselon	Rp 1,189,025,445	Rp 1,617,229,828	36.01%

Pada Tabel 18 diketahui bahwa kombinasi optimal moda transportasi jenis kapal logistik pada kondisi nyata merupakan KRI SMB-902 sebagai transporter multi komoditas dari E 1 ke E 2 dan KRI ARN-903 sebagai distributor yang berfungsi *shuttle ship* multi komoditas dari E 2 ke E 3 dan dari E 3 ke E 4 dengan total biaya distribusi 4 eselon sebesar Rp. 1.189.025.445. Biaya tersebut lebih efisien jika dibandingkan dengan kombinasi lainnya di setiap iterasi.

Dari Tabel 19 dapat diketahui bahwa total biaya distribusi 4 eselon menggunakan algoritma *hybrid non linear inertia weight particle swarm optimization* dengan *multiple capacitated vehicle transshipment* dapat menghasilkan solusi optimal dengan total penghematan sebesar 9.61% (Rp. 114.322.839) dibandingkan algoritma LDIW-PSO dan 14.52% (Rp. 172.613.021) jika dibandingkan algoritma BASIC-PSO.

Tabel 19. Perbandingan hasil algoritma model dengan 2 varian PSO

NO	KOMPONEN BIAYA	NLW-PSO	LDIW-PSO	EFISIENSI	%
		SMB-902 & ARN-903	SMB-902 & ARN-903		
		Kombinasi 1			
1	Biaya Transportasi	Rp 1,400,330,029	Rp 1,514,652,868	Rp 114,322,839	8.16%
2	Biaya Bongkar Muat	Rp 149,114,567	Rp 149,114,567	Rp -	0.00%
3	Biaya Komoditas Rusak	Rp 241,582,284	Rp 241,582,284	Rp -	0.00%
4	Biaya Kehilangan Material	Rp 118,836,867	Rp 118,836,867	Rp -	0.00%
5	Biaya Distribusi 4 Eselon	Rp 1,189,025,445	Rp 1,303,348,283	Rp 114,322,839	9.61%
NO	KOMPONEN BIAYA	NLW-PSO	BASIC-PSO	EFISIENSI	%
		SMB-902 & ARN-903	SMB-902 & ARN-903		
		Kombinasi 1			
1	Biaya Transportasi	Rp 1,400,330,029	Rp 1,572,943,051	Rp 172,613,021	12.33%
2	Biaya Bongkar Muat	Rp 149,114,567	Rp 149,114,567	Rp -	0.00%
3	Biaya Komoditas Rusak	Rp 241,582,284	Rp 241,582,284	Rp -	0.00%
4	Biaya Kehilangan Material	Rp 118,836,867	Rp 118,836,867	Rp -	0.00%
5	Biaya Distribusi 4 Eselon	Rp 1,189,025,445	Rp 1,361,638,466	Rp 172,613,021	14.52%

Dari contoh numerik dihasilkan penghematan biaya distribusi 4 eselon dari kondisi nyata sebesar 35.75 % (Rp. 661.724.555) seperti Gambar 13.

7. ANALISIS MODEL

Analisa model dilakukan pada model optimasi distribusi 4 eselon logistik operasi laut dengan *scenario analysis* setiap variabel keputusan dan analisa sensitivitas untuk mengetahui responsif hasil solusi optimal dengan memodifikasi variabel keputusan sehingga menghasilkan perilaku model setelah beberapa skenario perubahan. *Scenario analysis* merupakan sebuah proses menganalisis kemungkinan kejadian pada masa depan dengan mempertimbangkan kemungkinan hasil sebagai alternatif, proses ini dilakukan untuk mengetahui kondisi optimal model saat dilakukan modifikasi pada variabel keputusan.

7.1 Scenario Analysis

Dilakukan 12 *scenario* analisa model dengan merubah variabel keputusan yaitu jarak tempuh, kapasitas muat dan kuantitas untuk menguji model dalam kondisi yang berbeda.

a. Skenario 1 – 9: Merubah variabel keputusan model, yaitu variabel jarak yang terkait posisi tunggu moda transportasi jenis kapal logistik sebagai distributor (E 3) sesuai segmentasi titik distribusi pada Gambar 1 dan Gambar 8 peta kombinatorial posisi tunggu kapal logistik di sistem distribusi 4 eselon. Dalam skenario 1 – 9 kombinasi moda transportasi kapal logistik yang digunakan seperti pengujian model dalam kondisi nyata sistem distribusi 4 eselon dengan bertujuan untuk menentukan posisi tunggu optimal kapal logistik sebagai distributor di daerah operasi.

Tabel 10. Matriks jarak tempuh distribusi 4 eselon logistik operasi laut

MILEAGE OF THE 4-ECHELON DISTRIBUTION LOGISTICS SEA OPERATION IN NAUTICAL MILE																				
DISTANCE	HOME BASE		FORWARD NAVAL BASE						DISTRIBUTOR		STRIKING FORCE SHIP AND HELICOPTERS									
	ECHELON 1		ECHELON 2						ECHELON 3		ECHELON 4									
	MKS	AMB	TRK	TOLJ	MND	KPG	TUAL	MKE	ARN	SRG	FTH	NUK	KRS	LYG	DPN	AMY	HIU	MDU	STO	FKO
	S1	S2	P1	P2	P3	P4	P5	P6	D1	D2	K1+H1	K2	K3	K4	K5+H2	K6+H3	K7	K8	K9	K10+H4
S1	0	0	659	535	812	533	997	1528	533	777	602	582	616	681	767	462	759	829	998	1299
S2	0	0	1019	799	496	575	373	922	771	272	882	814	736	659	590	656	323	365	414	712
P1	659	1019	0	265	521	1158	1367	1994	232	1291	107	172	250	334	424	1091	1418	1488	1705	1939
P2	535	799	265	0	316	1032	1501	1739	37	1067	194	133	120	185	280	965	1111	1160	1207	1508
P3	812	496	521	316	0	1021	858	1425	273	765	399	330	252	177	128	1100	808	858	903	1199
P4	533	575	1158	1032	1021	0	787	1177	1034	531	1103	1083	1117	1173	1105	108	422	472	689	923
P5	997	373	1367	1501	858	787	0	627	1121	266	1235	1166	1088	1009	941	882	354	359	161	401
P6	1528	922	1994	1739	1425	1177	627	0	1691	753	1803	1734	1656	1577	1509	1358	775	705	529	254
D1	533	771	232	37	273	1034	1121	1691	0	1028	157	96	83	148	243	965	1072	1142	1167	1463
D2	777	272	1291	1067	765	531	266	753	1028	0	1142	1073	995	916	848	626	88	93	230	531

Tabel 11. Kombinasi urutan rute optimum pengiriman multi komoditas

ITERATION 20																				
SEQUENCE OF ALLOCATION ROUTES 4-ECHOLON DISTRIBUTION LOGISTICS SEA OPERATION																				
POPULATION	HOME BASE		FORWARD NAVAL BASE						DISTRIBUTOR		STRIKING FORCE SHIP AND HELICOPTERS									
	ECHELON 1		ECHELON 2						ECHELON 3		ECHELON 4									
	MKS	AMB	TRK	TOLI	MND	KPG	TUAL	MKE	ARN	SRG	FTH	NUK	KRS	LYG	DPN	AMY	HIU	MDU	STO	FKO
	S1	S2	P1	P2	P3	P4	P5	P6	D1	D2	K1+H1	K2	K3	K4	K5+H2	K6+H3	K7	K8	K9	K10+H4
PBEST	2	1	3	6	1	4	2	5	1	2	5	9	1	10	7	3	2	4	6	8
GBEST	1	2	6	5	1	4	3	2	2	1	7	4	5	1	6	8	2	3	10	9
RANDOM VARIABEL																				
PBEST	58.273	40.412	59.945	81.083	44.146	63.227	44.823	64.978	53.906	66.258	49.102	64.973	42.943	66.593	56.360	46.799	45.158	47.142	53.386	57.934
GBEST	-1.067	9.627	7.106	5.020	-13.772	2.658	-3.797	-7.025	1.419	-0.171	-2.635	-3.460	-3.189	-11.107	-2.995	0.610	-10.504	-10.043	4.624	4.518
INERTIA (W _{iter})	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
M	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{final}	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
VELOCITY																				
PBEST	4.094	3.486	4.169	4.962	4.866	3.552	4.253	4.200	4.864	4.803	3.603	5.305	2.892	4.135	3.547	3.897	4.793	3.470	4.488	4.756
GBEST	-0.156	-0.052	-0.172	0.777	-0.565	-0.204	-0.702	0.498	-0.451	-0.248	-0.609	0.317	-0.740	-0.014	-0.470	-0.072	0.315	-0.583	0.325	0.759
RANDOM NUMBER																				
	0.541	0.894	0.106	0.150	0.749	0.311	0.854	0.420	0.729	0.967	0.325	0.293	0.218	0.635	0.012	0.226	0.926	0.199	0.912	0.591
	0.460	0.358	0.641	0.334	0.860	0.975	0.135	0.343	0.861	0.338	0.096	0.415	0.042	0.503	0.741	0.976	0.652	0.306	0.355	0.950
	0.313	0.205	0.726	0.022	0.706	0.726	0.822	0.373	0.597	0.370	0.297	0.300	0.895	0.914	0.037	0.462	0.553	0.160	0.049	0.690
	0.121	0.739	0.084	0.570	0.952	0.714	0.586	0.235	0.097	0.406	0.885	0.644	0.565	0.490	0.052	0.735	0.276	0.839	0.738	0.035
POSITION																				
PBEST	62.367	43.898	64.115	86.045	49.011	66.779	49.076	69.179	58.770	71.061	52.706	70.278	45.834	70.729	59.908	50.695	49.951	50.612	57.874	62.690
GBEST	-1.224	9.575	6.934	5.797	-14.337	2.454	-4.498	-6.527	0.968	-0.419	-3.244	-3.143	-3.929	-11.121	-3.465	0.539	-10.188	-10.625	4.948	5.277

Tabel 12. Pola optimum alokasi distribusi 4 eselon untuk komoditas bahan bakar

GBEST POPULATION																				
OPTIMAL ALLOCATION OF THE 4-ECHELON DISTRIBUTION FEUL COMMODITIES																				
ITERATION 20	HOME BASE		FORWARD NAVAL BASE						DISTRIBUTOR		STRIKING FORCE SHIP AND HELICOPTERS									
	ECHELON 1		ECHELON 2						ECHELON 3		ECHELON 4									
	MKS	AMB	TRK	TOLI	MND	KPG	TUAL	MKE	ARN	SRG	FTH	NUK	KRS	LYG	DPN	AMY	HIU	MDU	STO	FKO
Allocation	S1	S2	P1	P2	P3	P4	P5	P6	D1	D2	K1+H1	K2	K3	K4	K5+H2	K6+H3	K7	K8	K9	K10+H4
S1			2,835,000	1,890,000		2,939,400														
S2					3,685,500	368,100	1,890,000	2,561,400												
P1									2,835,000											
P2									1,890,000											
P3										3,685,500										
P4									3,307,500											
P5									1,880,270	9,730										
P6									2,561,400											
D1											2,025,000	1,687,500	839,700	1,350,000	1,755,000	65,870	1,350,000	839,700		
D2																2,814,130			1,687,500	1,755,000
Demand	0	0	2,835,000	1,890,000	3,685,500	3,307,500	1,890,000	2,561,400	9,912,770	6,256,630	2,025,000	1,687,500	839,700	1,350,000	1,755,000	2,880,000	1,350,000	839,700	1,687,500	1,755,000
Total	7,664,400	8,505,000	2,835,000	1,890,000	3,685,500	3,307,500	1,890,000	2,561,400	9,912,770	6,256,630	2,025,000	1,687,500	839,700	1,350,000	1,755,000	2,880,000	1,350,000	839,700	1,687,500	1,755,000
Capacity	8,977,500	8,505,000	2,835,000	1,890,000	3,685,500	3,307,500	1,890,000	2,561,400	7,888,250	4,978,816	2,025,000	1,687,500	839,700	1,350,000	1,755,000	2,880,000	1,350,000	839,700	1,687,500	1,755,000

Tabel 13. Pola optimum alokasi distribusi 4 eselon untuk komoditas air tawar

GBEST POPULATION																				
OPTIMAL ALLOCATION OF THE 4-ECHELON DISTRIBUTION FRESH WATER COMMODITIES																				
ITERATION 20	HOME BASE		FORWARD NAVAL BASE						DISTRIBUTOR		STRIKING FORCE SHIP AND HELICOPTERS									
	ECHELON 1		ECHELON 2						ECHELON 3		ECHELON 4									
	MKS	AMB	TRK	TOLI	MND	KPG	TUAL	MKE	ARN	SRG	FTH	NUK	KRS	LYG	DPN	AMY	HIU	MDU	STO	FKO
Allocation	S1	S2	P1	P2	P3	P4	P5	P6	D1	D2	K1+H1	K2	K3	K4	K5+H2	K6+H3	K7	K8	K9	K10+H4
S1			850,500	595,040		831,600														
S2					945,000	189,000	756,000	661,500												
P1									850,500											
P2									595,040											
P3										945,000										
P4									1,020,600											
P5									223,603	532,397										
P6										661,500										
D1											675,000	410,000	287,320	192,103	503,000		335,000	287,320		
D2														142,897		1,083,000			410,000	503,000
Demand	0	0	850,500	595,040	945,000	1,020,600	756,000	661,500	2,689,743	2,138,897	675,000	410,000	287,320	335,000	503,000	1,083,000	335,000	287,320	410,000	503,000
Total	2,277,140	2,551,500	850,500	595,040	945,000	1,020,600	756,000	661,500	2,689,743	2,138,897	675,000	410,000	287,320	335,000	503,000	1,083,000	335,000	287,320	410,000	503,000
Capacity	2,835,000	2,551,500	850,500	595,040	945,000	1,020,600	756,000	661,500	2,148,000	1,708,100	675,000	410,000	287,320	335,000	503,000	1,083,000	335,000	287,320	410,000	503,000

Tabel 14. Pola optimum alokasi distribusi 4 eselon untuk komoditas minyak pelumas

GBEST POPULATION																				
OPTIMAL ALLOCATION OF THE 4-ECHELON DISTRIBUTION LUBRICATING OIL COMMODITIES																				
ITERATION 20	HOME BASE		FORWARD NAVAL BASE						DISTRIBUTOR		STRIKING FORCE SHIP AND HELICOPTERS									
	ECHELON 1		ECHELON 2						ECHELON 3		ECHELON 4									
	MKS	AMB	TRK	TOLI	MND	KPG	TUAL	MKE	ARN	SRG	FTH	NUK	KRS	LYG	DPN	AMY	HIU	MDU	STO	FKO
Allocation	S1	S2	P1	P2	P3	P4	P5	P6	D1	D2	K1+H1	K2	K3	K4	K5+H2	K6+H3	K7	K8	K9	K10+H4
S1			56,700	47,250		34,338														
S2					94,500	60,162	47,250	81,588												
P1									56,700											
P2									47,250											
P3										94,500										
P4										94,500										
P5										23,580	23,670									
P6										81,588										
D1											62,954	30,107	24,666		44,943		34,694	24,666		
D2												8,213		34,694		73,588			38,320	44,943
Demand	0	0	56,700	47,250	94,500	94,500	47,250	81,588	222,030	199,758	62,954	38,320	24,666	34,694	44,943	73,588	34,694	24,666	38,320	44,943
Total	138,288	283,500	56,700	47,250	94,500	94,500	47,250	81,588	222,030	199,758	62,954	38,320	24,666	34,694	44,943	73,588	34,694	24,666	38,320	44,943
Capacity	330,750	283,500	56,700	47,250	94,500	94,500	47,250	81,588	359,169	323,140	62,954	38,320	24,666	34,694	44,943	73,589	34,694	24,666	38,320	44,943

Tabel 15. Pola optimum alokasi distribusi 4 eselon untuk komoditas avtur

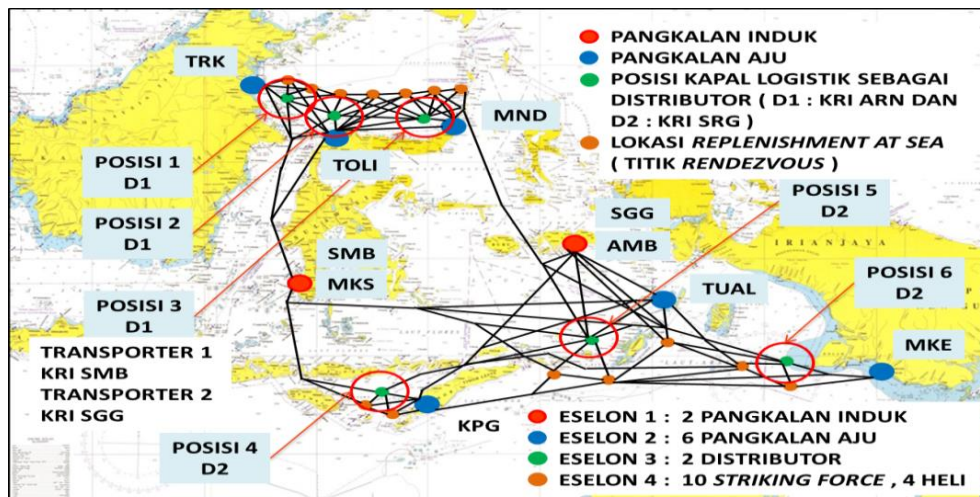
GBEST POPULATION																				
OPTIMAL ALLOCATION OF THE 4-ECHOLON DISTRIBUTION AVIATION FEUL COMMODITIES																				
ITERATION 20	HOME BASE		FORWARD NAVAL BASE						DISTRIBUTOR		STRIKING FORCE SHIP AND HELICOPTERS									
	ECHOLON 1		ECHOLON 2						ECHOLON 3		ECHOLON 4									
	MKS	AMB	TRK	TOLI	MND	KPG	TUAL	MKE	ARN	SRG	FTH	NUK	KRS	LYG	DPN	AMY	HIU	MDU	STO	FKO
Allocation	S1	S2	P1	P2	P3	P4	P5	P6	D1	D2	K1+H1	K2	K3	K4	K5+H2	K6+H3	K7	K8	K9	K10+H4
S1			94,500	65,700		122,850	9,450													
S2					132,300		56,700	94,500												
P1									94,500											
P2									65,700											
P3										132,300										
P4									122,850											
P5									22,181	43,969										
P6									94,500											
D1											144,000	0	0	0	144,000	17,231	0	0		
D2																126,769			0	144,000
Demand	0	0	94,500	65,700	132,300	122,850	66,150	94,500	305,231	270,769	144,000	0	0	0	144,000	144,000	0	0	0	144,000
Total	292,500	283,500	94,500	65,700	132,300	122,850	66,150	94,500	305,231	270,769	144,000	0	0	0	144,000	144,000	0	0	0	144,000
Capacity	425,250	283,500	94,500	65,700	132,300	122,850	66,150	94,500	310,000	275,000	144,000	0	0	0	144,000	144,000	0	0	0	144,000

Tabel 16. Pola optimum alokasi distribusi 4 eselon untuk komoditas makanan kering

GBEST POPULATION																				
OPTIMAL ALLOCATION OF THE 4-ECHOLON DISTRIBUTION DRY FOOD COMMODITIES																				
ITERATION 20	HOME BASE		FORWARD NAVAL BASE						DISTRIBUTOR		STRIKING FORCE SHIP AND HELICOPTERS									
	ECHOLON 1		ECHOLON 2						ECHOLON 3		ECHOLON 4									
	MKS	AMB	TRK	TOLI	MND	KPG	TUAL	MKE	ARN	SRG	FTH	NUK	KRS	LYG	DPN	AMY	HIU	MDU	STO	FKO
Allocation	S1	S2	P1	P2	P3	P4	P5	P6	D1	D2	K1+H1	K2	K3	K4	K5+H2	K6+H3	K7	K8	K9	K10+H4
S1			28,350	18,900		11,556														
S2					38,016	18,684	18,900	28,350												
P1									28,350											
P2									18,900											
P3										38,016										
P4									30,240											
P5									18,900											
P6									3,767	24,583										
D1											23,166	13,266	9,900	10,890	16,830	5,315	10,890	9,900		
D2																32,503			13,266	16,830
Demand	0	0	28,350	18,900	38,016	30,240	18,900	28,350	100,157	62,599	23,166	13,266	9,900	10,890	16,830	37,818	10,890	9,900	13,266	16,830
Total	58,806	103,950	28,350	18,900	38,016	30,240	18,900	28,350	100,157	62,599	23,166	13,266	9,900	10,890	16,830	37,818	10,890	9,900	13,266	16,830
Capacity	122,850	103,950	28,350	18,900	38,016	30,240	18,900	28,350	175,032	109,395	23,166	13,266	9,900	10,890	16,830	37,818	10,890	9,900	13,266	16,830

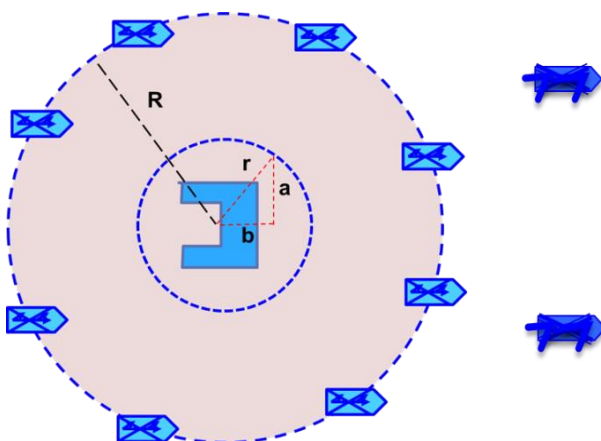
Tabel 17. Pola optimum alokasi distribusi 4 eselon untuk komoditas makanan basah

GBEST POPULATION																				
OPTIMAL ALLOCATION OF THE 4-ECHELON DISTRIBUTION WET FOOD COMMODITIES																				
ITERATION 20	HOME BASE		FORWARD NAVAL BASE						DISTRIBUTOR		STRIKING FORCE SHIP AND HELICOPTERS									
	ECHELON 1		ECHELON 2						ECHELON 3		ECHELON 4									
	MKS	AMB	TRK	TOLI	MND	KPG	TUAL	MKE	ARN	SRG	FTH	NUK	KRS	LYG	DPN	AMY	HIU	MDU	STO	FKO
Allocation	S1	S2	P1	P2	P3	P4	P5	P6	D1	D2	K1+H1	K2	K3	K4	K5+H2	K6+H3	K7	K8	K9	K10+H4
S1			28,350	21,521	44,629	37,800														
S2				4,939			26,460	32,130												
P1									28,350											
P2									9,731	16,729										
P3									44,629											
P4									37,800											
P5										26,460										
P6										32,130										
D1											27,873	15,962	11,912	13,103	20,250	6,396	13,103	11,912		
D2																39,107			15,962	20,250
Demand	0	0	28,350	26,460	44,629	37,800	26,460	32,130	120,510	75,319	27,873	15,962	11,912	13,103	20,250	45,503	13,103	11,912	15,962	20,250
Total	132,300	63,529	28,350	26,460	44,629	37,800	26,460	32,130	120,510	75,319	27,873	15,962	11,912	13,103	20,250	45,503	13,103	11,912	15,962	20,250
Capacity	132,300	122,850	28,350	26,460	44,629	37,800	26,460	32,130	170,100	106,313	27,874	15,962	11,912	13,103	20,250	45,503	13,103	11,912	15,962	20,250



Gambar 8. Peta kombinatorial posisi tunggu distributor

- b. Skenario 10: Setelah memperoleh posisi tunggu optimal moda transportasi jenis kapal logistik sebagai distributor. Posisi tersebut sebagai acuan pengembangan skenario 10 dengan merubah variabel keputusan model yaitu variabel kapasitas muat terkait tugas, peran dan komposisi kapal logistik sebagai transporter dan distributor untuk menentukan kombinasi optimal dari 12 kombinatorial moda transportasi jenis kapal logistik.
- c. Skenario 11–12: Merubah variabel keputusan model yaitu variabel kuantitas (*demand* multi komoditas) dengan formasi seperti Gambar 9 yang merupakan pengembangan skenario operasi laut untuk mempertahankan garis perhubungan laut sendiri dan memutuskan garis perhubungan laut lawan sesuai skenario revisi postur TNI AL 2016. Dalam skenario 11 jumlah entitas pada sistem distribusi 4 eselon seperti pengujian model dalam kondisi nyata dengan siklus operasi selama 45 hari. Untuk skenario 12 dengan jumlah entitas seperti pengujian model dalam kondisi nyata. Hanya jumlah entitas di eselon 4 menjadi 20 kapal *striking force* dan 8 heli sebagai eselon 4 dalam pengembangan skenario operasi laut yang dilaksanakan selama 90 hari.



Gambar 9. Formasi kapal *striking force*

7.2 Evaluasi Algoritma Model

Evaluasi algoritma model dilakukan dengan tujuan untuk mengevaluasi performansi algoritma model dengan melakukan uji statistik mencari nilai *relative percentage deviation* (RPD) hasil algoritma solusi model untuk total biaya distribusi 4 eselon dengan pemilihan kombinasi moda transportasi kapal logistik sebagai transporter dan distributor melalui 12 skenario perubahan variabel keputusan model dengan pendekatan tiga varian algoritma model *hybrid PSO* dengan *multiple capacitated vehicle transshipment* menggunakan formulasi nilai RPD sebagai berikut :

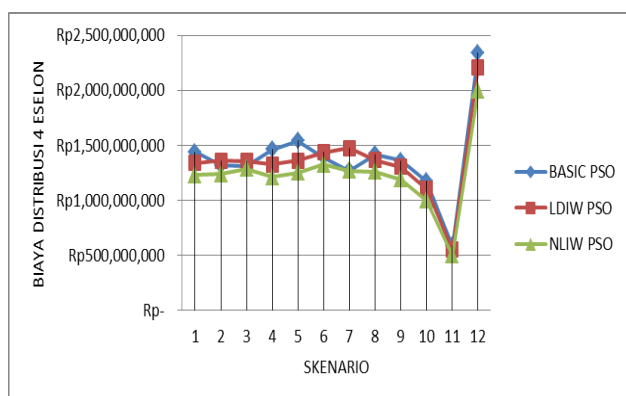
$$RPD = \left\{ \frac{Algoritma - Minimum}{Minimum} \right\} \times 100 \quad (36)$$

Berdasarkan Tabel 21 dapat diketahui bahwa total biaya distribusi 4 eselon dengan algoritma Hybrid NLIW-PSO dengan *multiple capacitated vehicle transshipment* lebih efisien di tiap *scenario analysis* model dibandingkan 2 varian algoritma PSO lainnya, yaitu algoritma BASIC-PSO dan LDIW-PSO sehingga bobot inersia yang diupdate secara dinamis saat *update generation particle* dan *swarm* di sepanjang eksekusi algoritma dapat meningkatkan kemampuan eksplorasi lokal dan global untuk menghindari stagnasi partikel di lokal optimum seperti Gambar 10.

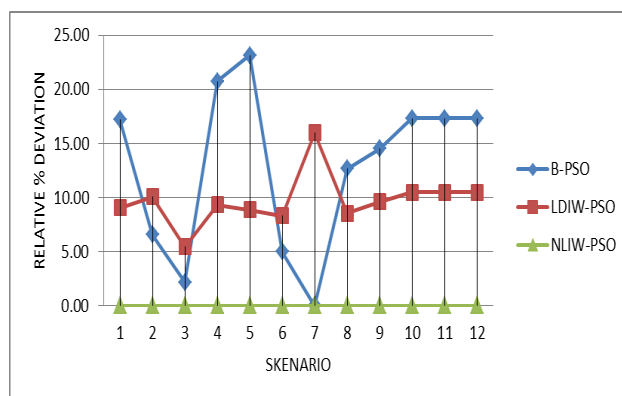
Algoritma hybrid NLIW-PSO dengan *multiple capacitated vehicle transshipment* dan model optimasi distribusi 4 eselon logistik operasi laut menghasilkan kondisi optimum, sehingga model optimasi distribusi 4 eselon logistik operasi laut memoderasi solusi optimal dengan performansi algoritma model yang menghasilkan solusi kualitas lebih baik untuk masalah yang dipertimbangkan paper ini. Karena kinerja algoritma ini menerapkan prosedur *update* kecepatan untuk menghasilkan posisi dengan variasi *nonlinear* bobot inersia yang beradaptasi secara dinamis untuk mengupdate posisi partikel dalam ruang multi dimensi.

Tabel 20. Perbandingan hasil algoritma model dengan 2 varian PSO

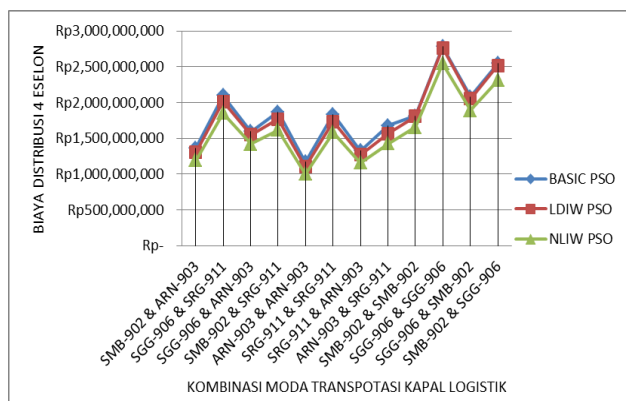
SKENARIO	TOTAL BIAYA DISTRIBUSI 4 ESELON			RELATIVE % DEVIATION			KOMBINASI OPTIMAL
	BASIC PSO	LDIW PSO	NLIW PSO	B-PSO	LDIW-PSO	NLIW-PSO	
1	Rp 1,438,124,502	Rp 1,338,179,125	Rp 1,227,328,708	17.18	9.03	0.00	SMB-902 & ARN-903
2	Rp 1,317,131,804	Rp 1,360,849,671	Rp 1,236,371,565	6.53	10.07	0.00	SMB-902 & ARN-904
3	Rp 1,314,613,667	Rp 1,356,936,598	Rp 1,286,844,507	2.16	5.45	0.00	SMB-902 & ARN-905
4	Rp 1,463,221,726	Rp 1,325,262,706	Rp 1,212,049,394	20.72	9.34	0.00	SMB-902 & ARN-906
5	Rp 1,539,707,762	Rp 1,361,116,801	Rp 1,250,352,658	23.14	8.86	0.00	SMB-902 & ARN-907
6	Rp 1,391,099,704	Rp 1,435,430,632	Rp 1,325,147,771	4.98	8.32	0.00	SMB-902 & ARN-908
7	Rp 1,270,107,005	Rp 1,472,790,111	Rp 1,269,981,142	0.01	15.97	0.00	SMB-902 & ARN-909
8	Rp 1,418,715,064	Rp 1,366,639,389	Rp 1,259,395,515	12.65	8.52	0.00	SMB-902 & ARN-910
9	Rp 1,361,638,466	Rp 1,303,348,283	Rp 1,189,025,445	14.52	9.61	0.00	SMB-902 & ARN-911
10	Rp 1,170,868,284	Rp 1,102,566,081	Rp 998,098,993	17.31	10.47	0.00	ARN-903 & ARN-903
11	Rp 585,434,142	Rp 551,283,041	Rp 499,049,496	17.31	10.47	0.00	ARN-903 & ARN-904
12	Rp 2,341,736,567	Rp 2,205,132,162	Rp 1,996,197,985	17.31	10.47	0.00	ARN-903 & ARN-905



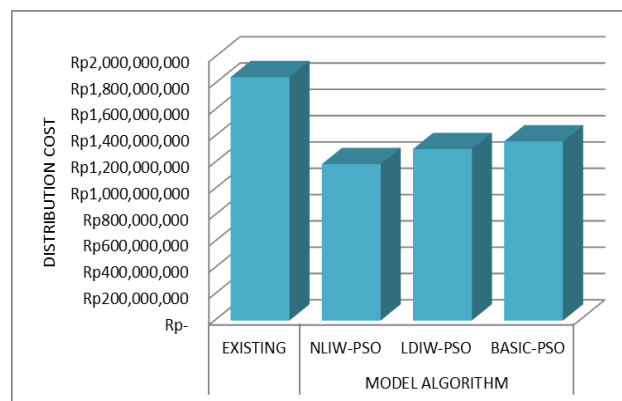
Gambar 10. Grafik biaya distribusi



Gambar 11. Grafik performansi algoritma



Gambar 12. Grafik kombinasi optimal



Gambar 13. Grafik perbandingan biaya distribusi

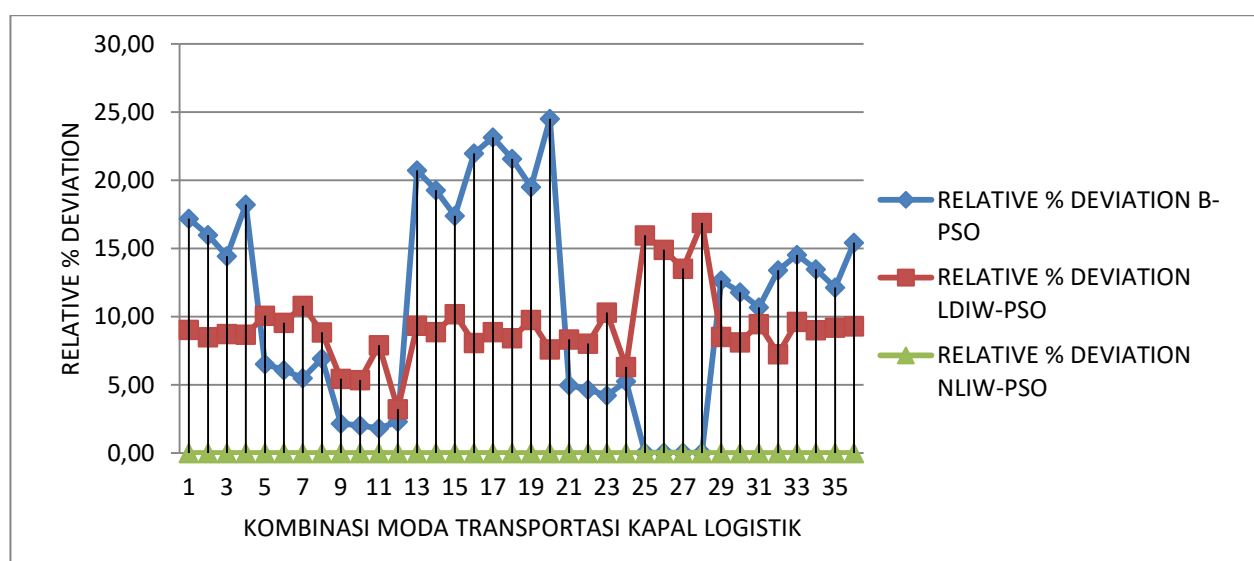
Dari Gambar 11 diketahui bahwa nilai RPD algoritma Hybrid NLIW-PSO memiliki performansi terbaik di tiap skenario, dibandingkan dengan dua varian algoritma PSO lainnya. Sehingga algoritma Hybrid NLIW-PSO dengan *multiple capacitated vehicle transshipment* menghasilkan solusi optimal dengan total biaya distribusi paling minimum hasil 12 skenario analysis model.

Dari hasil 12 skenario analysis model dengan perubahan variabel keputusan jarak, kapasitas dan kuantitas dengan pendekatan 3 varian algoritma hybrid PSO dengan *multiple capacitated vechile transshipment*, dihasilkan kombinasi posisi tunggu optimal moda transportasi kapal logistik sebagai

distributor pada sistem distribusi 4 eselon logistik operasi laut pada dua daerah *trouble spot* yang merupakan segmentasi titik-titik distribusi adalah posisi tunggu PT2 D1 distributor KRI ARN-903 dan posisi tunggu PT5 D2 distributor KRI SRG-911, sehingga dapat disimpulkan bahwa kombinasi KRI ARN-903 dan KRI ARN-903 merupakan kombinasi optimal moda transportasi kapal logistik sebagai alternatif usulan kebijakan dalam perencanaan logistik operasi laut untuk menurunkan total biaya distribusi di masa mendatang. Dari contoh numerik dihasilkan penghematan total biaya distribusi 4 eselon dari kondisi sebelumnya sebesar 46.07% (Rp. 852.651.007).

Tabel 21. Kombinatorial posisi tunggu kapal logistik sebagai distributor

NO	SKENARIO	TOTAL BIAYA DISTRIBUSI 4 ESELON			POSISI TUNGGU DISTRIBUTOR	KOMBINASI KAPAL LOGISTIK
		BASIC PSO	LDIW PSO	NLIW PSO		
1	1	Rp 1,438,124,502	Rp 1,338,179,125	Rp 1,227,328,708	PT 1 D1 dan PT 5 D2	SMB-902 & ARN-903
2		Rp 2,207,858,528	Rp 2,065,317,821	Rp 1,903,669,008		SGG-906 & SRG-911
3		Rp 1,669,026,568	Rp 1,585,652,897	Rp 1,458,489,428		SGG-906 & ARN-903
4		Rp 1,976,956,462	Rp 1,817,844,049	Rp 1,672,508,288		SMB-902 & SRG-911
5	2	Rp 1,317,131,804	Rp 1,360,849,671	Rp 1,236,371,565	PT 3 D1 dan PT 5 D2	SMB-902 & ARN-903
6		Rp 2,033,244,426	Rp 2,099,831,577	Rp 1,916,719,467		SGG-906 & SRG-911
7		Rp 1,548,033,870	Rp 1,625,849,022	Rp 1,467,532,285		SGG-906 & ARN-903
8		Rp 1,802,342,361	Rp 1,834,832,226	Rp 1,685,558,747		SMB-902 & SRG-911
9	3	Rp 1,314,613,667	Rp 1,356,936,598	Rp 1,286,844,507	PT 2 D1 dan PT 4 D2	SMB-902 & ARN-903
10		Rp 2,029,610,305	Rp 2,095,830,541	Rp 1,989,560,948		SGG-906 & SRG-911
11		Rp 1,545,515,733	Rp 1,637,999,109	Rp 1,518,005,227		SGG-906 & ARN-903
12		Rp 1,798,708,239	Rp 1,814,768,030	Rp 1,758,400,228		SMB-902 & SRG-911
13	4	Rp 1,463,221,726	Rp 1,325,262,706	Rp 1,212,049,394	PT 2 D1 dan PT 6 D2	SMB-902 & ARN-903
14		Rp 2,244,078,310	Rp 2,048,473,223	Rp 1,881,618,225		SGG-906 & SRG-911
15		Rp 1,694,123,791	Rp 1,590,262,058	Rp 1,443,210,114		SGG-906 & ARN-903
16		Rp 2,013,176,244	Rp 1,783,473,872	Rp 1,650,457,505		SMB-902 & SRG-911
17	5	Rp 1,539,707,762	Rp 1,361,116,801	Rp 1,250,352,658	PT 1 D1 dan PT 6 D2	SMB-902 & ARN-903
18		Rp 2,354,461,339	Rp 2,100,217,093	Rp 1,936,896,685		SGG-906 & SRG-911
19		Rp 1,770,609,828	Rp 1,626,116,152	Rp 1,481,513,378		SGG-906 & ARN-903
20		Rp 2,123,559,273	Rp 1,835,217,742	Rp 1,705,735,965		SMB-902 & SRG-911
21	6	Rp 1,391,099,704	Rp 1,435,430,632	Rp 1,325,147,771	PT 1 D1 dan PT 4 D2	SMB-902 & ARN-903
22		Rp 2,139,993,334	Rp 2,209,111,469	Rp 2,044,839,408		SGG-906 & SRG-911
23		Rp 1,622,001,769	Rp 1,716,493,143	Rp 1,556,308,491		SGG-906 & ARN-903
24		Rp 1,909,091,268	Rp 1,928,048,958	Rp 1,813,678,688		SMB-902 & SRG-911
25	7	Rp 1,270,107,005	Rp 1,472,790,111	Rp 1,269,981,142	PT 3 D1 dan PT 4 D2	SMB-902 & ARN-903
26		Rp 1,965,379,232	Rp 2,257,887,201	Rp 1,965,192,665		SGG-906 & SRG-911
27		Rp 1,501,009,071	Rp 1,703,692,176	Rp 1,500,835,158		SGG-906 & ARN-903
28		Rp 1,734,477,167	Rp 2,026,985,135	Rp 1,734,338,650		SMB-902 & SRG-911
29	8	Rp 1,418,715,064	Rp 1,366,639,389	Rp 1,259,395,515	PT 3 D1 dan PT 6 D2	SMB-902 & ARN-903
30		Rp 2,179,847,237	Rp 2,108,187,176	Rp 1,949,947,144		SGG-906 & SRG-911
31		Rp 1,649,617,129	Rp 1,631,638,740	Rp 1,490,556,235		SGG-906 & ARN-903
32		Rp 1,948,945,172	Rp 1,843,187,824	Rp 1,718,786,424		SMB-902 & SRG-911
33	9	Rp 1,361,638,466	Rp 1,303,348,283	Rp 1,189,025,445	PT 2 D1 dan PT 5 D2	SMB-902 & ARN-903
34		Rp 2,097,475,499	Rp 2,015,050,688	Rp 1,848,390,548		SGG-906 & SRG-911
35		Rp 1,592,540,531	Rp 1,550,822,056	Rp 1,420,186,164		SGG-906 & ARN-903
36		Rp 1,866,573,434	Rp 1,767,576,915	Rp 1,617,229,828		SMB-902 & SRG-911



Gambar 14. Grafik RPD Kombinatorial posisi tunggu distributor

Tabel 22. Kombinatorial moda transportasi pada posisi tunggu optimal

NO	SKENARIO	TOTAL BIAYA DISTRIBUSI 4 ESELON			RELATIVE % DEVIATION			KOMBINASI OPTIMAL
		BASIC PSO	LDIW PSO	NLIW PSO	B-PSO	LDIW-PSO	NLIW-PSO	
1	10	Rp 1,361,638,466	Rp 1,303,348,283	Rp 1,189,025,445	14.52	9.61	0.00	SMB-902 & ARN-903
2	10	Rp 2,097,475,499	Rp 2,015,050,688	Rp 1,848,390,548	13.48	9.02	0.00	SGG-906 & SRG-911
3	10	Rp 1,592,540,531	Rp 1,550,822,056	Rp 1,420,186,164	12.14	9.20	0.00	SGG-906 & ARN-903
4	10	Rp 1,866,573,434	Rp 1,767,576,915	Rp 1,617,229,828	15.42	9.30	0.00	SMB-902 & SRG-911
5	10	Rp 1,170,868,284	Rp 1,102,566,081	Rp 998,098,993	17.31	10.47	0.00	ARN-903 & ARN-903
6	10	Rp 1,832,587,608	Rp 1,734,015,315	Rp 1,583,250,623	15.75	9.52	0.00	SRG-911 & SRG-911
7	10	Rp 1,327,652,640	Rp 1,269,786,683	Rp 1,155,046,240	14.94	9.93	0.00	SRG-911 & ARN-903
8	10	Rp 1,675,803,251	Rp 1,566,794,713	Rp 1,426,303,376	17.49	9.85	0.00	ARN-903 & SRG-911
9	10	Rp 1,902,776,454	Rp 1,805,434,617	Rp 1,656,551,887	14.86	8.99	0.00	SMB-902 & SMB-902
10	10	Rp 2,911,280,352	Rp 2,765,872,657	Rp 2,543,473,993	14.46	8.74	0.00	SGG-906 & SGG-906
11	10	Rp 2,133,678,520	Rp 2,052,908,390	Rp 1,887,712,607	13.03	8.75	0.00	SGG-906 & SMB-902
12	10	Rp 2,680,378,286	Rp 2,518,398,884	Rp 2,312,313,273	15.92	8.91	0.00	SMB-902 & SGG-906

7.3 Analisa Sensitivitas

Analisa sensitivitas merupakan suatu proses mengevaluasi responsif dari solusi optimal dengan perubahan variabel keputusan yang digunakan menghasilkan perilaku model. Analisa sensitivitas memperlihatkan bagaimana solusi optimal dapat merespon perubahan yang terjadi.

- Variabel keputusan yang paling berpengaruh terhadap fungsi tujuan adalah jarak tempuh, karena jarak bisa merepresentasikan biaya dan faktor utama pembentuk biaya. Jarak berbanding lurus dengan biaya. Semakin jauh jarak tempuh, maka biaya juga naik seiring bertambahnya jarak terhadap biaya.
- Variabel keputusan yang juga berpengaruh terhadap fungsi tujuan merupakan variabel kapasitas. Kapasitas bisa merepresentasikan biaya, tetapi bukan faktor utama pembentuk biaya. Kapasitas berbanding terbalik dengan biaya. Semakin besar kapasitas, maka biaya semakin kecil.
- Variabel keputusan yang juga berpengaruh terhadap fungsi tujuan merupakan variabel kuantitas. Kuantitas bisa merepresentasikan biaya, tetapi bukan faktor utama pembentuk biaya. Kuantitas berbanding lurus dengan biaya. Semakin besar kuantitas, maka biaya semakin besar.

7.4 Analisa Kemampooterapan Model

Model optimasi distribusi 4 eselon logistik operasi laut dapat diterapkan dalam kondisi sebagai berikut :

- Sistem distribusi 4 eselon logistik operasi laut harus memiliki minimal 2 pangkalan induk yang merupakan *logistic distribution center* atau pangkalan distribusi level 1 (E 1).
- Sistem distribusi 4 eselon logistik operasi laut harus memiliki minimal 6 pangkalan aju sebagai gudang penyangga (E 2), 2 moda transportasi kapal logistik sebagai distributor (E 3), 10 kapal *stricking force* dan 4 heli yang merupakan E 4.

- Proses distribusi melalui *replenishment at sea* dan pemilihan minimal 2 moda transportasi kapal logistik sebagai transporter (E 1 ke E 2) dan distributor (E 2 ke E 3 dan E 3 ke E 4).
- Biaya transportasi dihitung per nautical mil perjalanan antar eselon, bukan *fixed cost*.
- Biaya bongkar muat dihitung setiap frekuensi pengiriman dengan *fixed cost*, dan bukan per kuantitas komoditas.
- Seluruh moda transportasi jenis kapal logistik mampu mengakomodir kebutuhan pengiriman multi komoditas.
- Sistem distribusi yang digunakan *share shipping* atau *multi source receiving and fleet*.
- Persediaan dan kapasitas pada E 1, E 2, E 3 dan E 4 mampu mengakomodir permintaan kapal *stricking force* dan heliintai.
- Waktu yang terjadi dalam pengiriman multi komoditas antar eselon tidak diperhitungkan dalam biaya.

8. KESIMPULAN

Model optimasi distribusi 4 eselon logistik operasi laut dapat diklasifikasikan sebagai model optimasi kombinatorial. Hal ini berarti model ini adalah model *mixed fleet transshipment and share shipping*. Sehingga dikembangkan algoritma solusi berbasis *hybrid nonlinear inertia weight particle swarm optimization* dengan *multiple capacitated vehicle transshipment*.

Dengan mempertimbangkan pemilihan moda transportasi jenis kapal logistik, biaya transportasi, biaya bongkar muat, dan biaya komoditas rusak serta biaya kehilangan material yang linear dengan jumlah pengiriman dalam sistem distribusi 4 eselon logistik operasi laut, dihasilkan penghematan total biaya distribusi sebesar 46.07% bila menggunakan moda transportasi jenis kapal logistik berkapasitas lebih besar, yaitu kombinasi moda transportasi kapal logistik sebagai transporter KRI ARN-903 dari eselon 1 ke eselon 2 dan sebagai distributor KRI ARN-903 dari eselon 2 ke eselon 3 dan eselon 3 ke eselon 4 dalam satu horizon perencanaan operasi pengendalian laut.

Oleh karena itu untuk penelitian berikutnya dapat mempertimbangkan variabel *product expired date* yang tersimpan pada tiap eselon dan variabel waktu *loading unloading* saat *replenishment at sea* untuk mendapatkan penjadwalan optimal di sistem distribusi 4 eselon logistik operasi laut yang dapat mempengaruhi permintaan, pola alokasi distribusi dan biaya distribusi selama hoizon perencanaan, juga perlu dikembangkan algoritma solusi yang dapat menurunkan waktu komputasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Aris T.R., Budisantoso, W., dan Ahmadi, (2015). "Model Penjadwalan Pembekalan di Laut pada Unit Tugas Pukul dalam Operasi Laut dengan menggunakan Algoritma Genetika". STTAL. Surabaya.
- Bahagia, N. Senator., (2008). *Sistem Inventori*. ITB Bandung.
- Brown G., and Carlyle W.M., (2008). "Optimizing the US Navy's Combat Logistics Force". *Naval Research Logistics*, 55, pp. 800–810.
- Chengming, Qi., (2011). "Application of Improved Discrete Particle Swarm Optimisation Logistics Distribution Routing Problem Original Research. *Procedia Engineering*, Vol15, PP 3673–3677.
- Chopra, S., and Meindl, P., (2007). *Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operations*. Prentice Hall, New Jersey.
- Christiansen M, Fagerholt K, Flatberg T., and Haugen O., (2011). "Maritime Inventory Routing with Multiple Products: A Case from the Cement Industry". *European Journal of Operation Research*, 208, pp 86–94.
- Cordeau, J. F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J. Y., and Semet, F., 2002. "A Guide to Vehicle Routing Heuristics." *Journal of the Operational Society*, Vol. 53, pp. 512–522.
- Eberhart, R. C., and Kennedy, J. (1995). "A new Optimizer using Particle Swarm Theory". In *Proceedings Sixth Symposium on Micro Machine and Human Science*, pp. 39–43. Piscataway, NJ: IEEE Service Center.
- Elizabeth F.G. Goldbrag, Marco C. Goldbrag, and Givalbaldo R. de Souza., (2008) "Particle Swarm Optimization Algorithm for the Traveling Salesman Problem". *Intech Research Journal*, pp 179–202.
- Eri Domoto, Koji Okuhara, Nobuyuki Ueno, and Hiroaki Ishii., (2007). "Target Inventory Strategy in Multistages Supply Chain by Particle Swarm Optimization". *Asia Pasific Management* 12, Vol 2 pp 117–122.
- Garside, K. Annisa., (2010). "Model Simultan dan Decoupled untuk Penyelesaian Problem Integrasi Produksi Persediaan, Distribusi, Persediaan". *Jurnal Teknik Industri UK Petra* Vol.10 No 1,11–25.
- Gue, Kevin. R., (2003). "A Dynamic Distribution Model for Combat Logistic". *Computer and Operation Research*, Vol. 30, pp 367–381.
- Kennedy, J., and Eberhart, R.C., (1995). "Particle swarm optimization", In *Proceedings IEEE International Conference on Neural Networks*, Vol. 4, pp. 1942–1948, Perth, Western Australia November 1995, IEEE. Service Center.
- Kennedy, J., and Eberhart, R. C. (2001). *Swarm intelligence*. Morgan Kaufmann Publishers.
- Khalifehzadeh, S., Seifbarghy, M., and Naderi, B, (2015). "A Four Echelon Supply Chain Network Design with Shortage : Mathematical Modeling and Solution Methods". *International Journal of Manufacturing Systems* 35, pp 164–175.
- Latha Shankar B, Basavarajappa S, Chen, J.C.H., Rajeshwar , S. Kadadevaramath, (2013). "Location and Allocation Decisions for Multi Echelon Supply Chain Network: A Multi Objective Evolutionary Approach". *International Journal of Expert Systems with Applications*, Vol. 40, pp 551–562.
- Lenhardt, T.A., (2006). "Evaluation of A USMC Combat Service Support Logistics Concept". *Mathematical and Computer Modelling*, Vol 44, pp 368–376.
- Machado, T.R., and Lopes, H.S., (2005). "A Hybrid Particle Swarm Optimization Model for the Traveling Salesman Problem", *Natural Computing Algorithms*, Ribeiro, H.; Albrecht, R.F. and Dobnikar, A. (Eds.), pp. 255–258, ISBN: 3211249346.
- Marinakis, Y., and Marinaki, M., (2010). "A Hybrid Multiswarm Particle Swarm Optimization Algorithm for the Probabilistic Traveling Salesman Problem". *Computers and Operations Research*, Vol 37(3), pp 432–442.
- Marinarkis Y., Marinaki M., and Dounias G., (2010). "A Hybrid Particle Swarm Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, pp. 463–472.
- Murthy, D. N. P., (1990). *Mathematical Modelling*. Pergamon Press, Oxford.
- Papadimitriou, C.H., and Steiglitz, (1982). Combinatorial Optimization. *Algorithms and Complexity*. Prentice Hall, New Jersey.
- Pujawan, I.Nyoman, dan E.R. Mahendrawati (2010). *Supply Chain Management*. Guna Widya.
- Rajeshwar, S. K., Chen, J. C. H., Latha Shankar, B., and Rameshkumar, K., (2012). "Application of Particle Swarm Intelligence Algorithms in Supply Chain Network Architecture Optimization". *International Journal of Expert Systems with Applications*, Vol 39, 10160–10176.
- Santoso, A., Senator Nur Bahagia, Suprayogi, dan Dwiwahyu Sasongko, (2009) Integrasi Kebijakan Persediaan-Transportasi (Pengiriman Langsung dan Berbagi) di Sistem Rantai Pasok 4 Eselon. *Jurnal Teknik Industri ITB*, Vol 11, No.1,pp 15–32.
- Santosa Budi. (2011). *Metoda Metaheuristik*, Konsep dan Implementasi. Guna Widya.
- Sathish, G., Selladurai. V., and Narmadha. S., (2010). "Efficient Inventory Optimization of multi product, Multiple Suppliers with Lead Time using PSO". *Computer Science and Information security*.Vol 7. No 1. pp 180–189.
- Sedighzadeh and Masehian, (2009). "Particle Swarm Optimization Methods, Taxonomy and Applications", *Computer Theory and Engineering*, Vol. 1, No. 5.
- Shi, Y.H and Eberhart, R. C. (1998). "A Modified Particle Swarm Optimizer". *IEEE International Confrence Evolutionary Computation, Anchorage, Alaska*.
- Shi, Y.H., Liang, Y.C.; Lee, H.P., Lu, C. and Wang, Q.X., (2007). "Particle Swarm Optimization Based Algorithms for TSP and Generalized TSP", *IEEE Information Processing Letters*, Vol. 103, pp. 169–176.
- Wanzeler Luiz. A.,(2008). "An Adaptive Particle Swarm Approach Applied to Optimization of a Simplified Supply Chain". *University of Parana-Brazil*.
- Xin Li Xu., Xu Cheng, Zhong Chen Yang, Xu Hua Yang and Wan Liang Wang, (2012). "Improved Particle Swarm Optimization for Traveling Salesman Problem", *Proceedings 27th European Conference on Modelling and Simulation*.