

Penjadwalan *Tugboat* Untuk Meminimasi *Delay* Waktu Tunggu Kapal Dengan Pendekatan *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) Pada Pelabuhan PT XYZ

1st Athayyah Mufidah Aliyyah
Industrial Engineering Faculty
Telkom University
Bandung, Indonesia
athayyah

mufidah@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Erlangga Bayu Setyawan
Industrial and System Engineering
Department
Telkom University
Bandung, Indonesia
erlanggabs@telkomuniversity.ac.id

3rd Prafajar Suksessano Muttaqin
Industrial and System Engineering
Department
Telkom University
Bandung, Indonesia
prafajars@telkomuniversity.ac.id

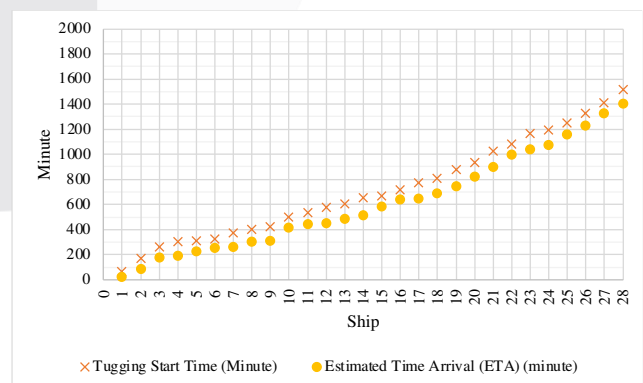
Abstrak— Pelabuhan yang menangani kapal peti kemas memainkan peran penting dalam memfasilitasi logistik global dan operasi rantai pasokan. Pelabuhan-pelabuhan ini menawarkan layanan penting untuk mengelola kapal peti kemas. Ketika sebuah kapal kontainer tiba di pelabuhan, biasanya kapal tersebut membutuhkan dukungan kapal tunda untuk membantu manuver-manuver penting. Manuver ini termasuk merapatkan kapal di dermaga, mereposisi atau menggeser kapal di dalam area pelabuhan, dan melepas sandar atau meninggalkan dermaga. Operasi kapal tunda sangat penting untuk memastikan pergerakan yang aman dan efisien dari kapal-kapal kontainer besar ini selama berada di pelabuhan. Penjadwalan kapal tunda yang efektif untuk melayani kapal sangat penting untuk memastikan pergerakan kapal peti kemas yang aman dan efisien di pelabuhan. Penelitian ini membahas masalah penjadwalan kapal tunda atau *Tugboat Scheduling Problem* (Tug-SP). Penelitian ini mengatasi masalah penjadwalan kapal tunda (Tug-SP) di Pelabuhan PT XYZ, Malaysia, menggunakan model *Mixed Integer Linear Programming* (MILP). Penyelesaian dilakukan dengan *Python* dan *solver* Gurobi. Hasil menunjukkan penjadwalan optimal yang mengurangi waktu deviasi proses tugging sebesar 21%, dari 102 menit menjadi 82 menit. Efisiensi ini meningkatkan kinerja layanan *tugboat*, mengurangi risiko keterlambatan, dan meminimalisir dampak pada proses bongkar muat. Penelitian ini berhasil mengoptimalkan operasional pelabuhan secara signifikan.

Kata Kunci— *Container Port, Tugboat Scheduling, Mixed Integer Linear Programming, Gurobi.*

I. PENDAHULUAN

Pelabuhan menjadi pusat distribusi barang yang menghubungkan kebutuhan produsen (pengirim) dengan konsumen (penerima) yang layanan intinya adalah penanganan kapal dan kargo. Pelabuhan berperan penting dalam memfasilitasi perdagangan, terutama perdagangan internasional di seluruh dunia. Perdagangan global telah mengalami perkembangan yang luar biasa sejak tahun 1950-an, dengan porsi yang semakin besar dari output ekonomi dunia. Pada tahun 2007, perdagangan internasional melebihi

50% dari Produk Domestik Bruto (PDB) global untuk pertama kalinya, sebuah peningkatan substansial dari kisaran konvensional 20% hingga 25% yang terjadi pada paruh awal abad ke-20. Pada abad ke-19, proporsi perdagangan dunia terhadap output ekonomi global bahkan lebih rendah, yaitu sekitar 10% [1]. Dengan pesatnya pertumbuhan perdagangan dan meningkatnya volume lalu lintas kapal, penggunaan kapal tunda di Pelabuhan dalam menjalankan proses bisnis telah menjadi kebutuhan yang krusial. Kapal tunda memainkan peran penting dalam memfasilitasi operasi pelabuhan yang aman dan efisien. *Tugboat* adalah kapal kecil yang membantu kapal besar yang akan sandar di pelabuhan atau lepas tambat di laut dengan cara menarik atau mendorong kapal tersebut ke pelabuhan agar kapal tidak merusak dermaga saat berlabuh di pelabuhan [2]. Kapal tunda dibutuhkan untuk membantu operasi sandar kapal dari atau ke jetty/dermaga dan memiliki pengaruh penting terhadap waktu putar kapal.



GAMBAR 1
DEVIASI ANTARA WAKTU AWAL PROSES DAN ETA KAPAL

Penjadwalan kapal tunda yang tidak optimal seperti waktu awal tiap proses tugging kapal yang memiliki ketidakpastian dan memiliki deviasi dengan *gap* yang agak jauh berbeda dengan ETA dapat menjadi penyebab waktu proses operasi penarikan menjadi terhambat. Dapat dilihat Pada Gambar 2,

terjadi keterlambatan antara waktu awal proses tugging dan ETA selama rata-rata 72 menit dari waktu paling lama kapal menunggu pada *anchorage area* yaitu 20 menit. Hal ini menjadi penting karena semakin waktu awal proses tugging mendekati waktu ETA, maka layanan tugging menjadi optimal karena tidak akan ada adanya waktu menunggu untuk kapal pada *anchorage area* yang akan berdampak juga pada keterlambatan dari proses tugging. Tujuan dari penelitian ini mengusulkan dan menganalisis penjadwalan tugboat dengan mempertimbangkan ketidakpastian waktu awal proses tugging Pelabuhan PT XYZ dan membuat penjadwalan yang bertujuan meminimasi waktu deviasi operasi tugboat (tugging) terhadap ETA operasi tugging pada Pelabuhan PT XYZ, kemudian menghitung pula total waktu service time (weighted) kapal yang paling optimal pada periode 1-2 Januari 2023 pada Pelabuhan PT XYZ, sehingga mendapatkan waktu awal proses yang optimal dan penyusunan jadwal dengan pendekatan *Model Mixed Integer Linear Programming (MILP)* dan menyelesaikan model tersebut dengan bantuan *Solver Optimasi Gurobi*

II. KAJIAN TEORI

A. Permasalahan Transportasi

Masalah transportasi adalah salah satu bagian dari operation research yang membahas tentang meminimumkan biaya transportasi dari suatu tempat ke tempat lain. Kasus transportasi timbul ketika seseorang mencoba menentukan cara pengiriman (pendistribusian) suatu jenis barang (item) dari beberapa sumber (lokasi penawaran) ke beberapa tujuan (lokasi permintaan). Setiap industri pasti menginginkan biaya yang minimum untuk proses transportasi sehingga diperlukan suatu strategi pemecahan masalah yang bisa memberikan solusi yang optimal. Melalui strategi dan perencanaan yang baik, biaya proses transportasi bisa lebih hemat. Mulai dari armada yang mesinnya masih memadai untuk mengangkut muatan pengiriman barang, hingga waktu tempuh sesuai dengan keadaan di jalan.

B. Tug-SP

Dalam masalah penjadwalan kapal tunda, Tug-SP menjadwalkan sejumlah kapal tunda untuk membantu sejumlah kapal tertentu. Tug-SP adalah masalah optimasi untuk mengalokasikan sumber daya kapal tunda yang terbatas di wilayah pelabuhan. Setelah sampai di tempat berlabuh, kapal akan ditarik dengan kapal tunda ke tempat berlabuh yang telah ditentukan, kapal tunda yang ditugaskan akan berangkat dari pangkalan untuk membantu kapal berlabuh di tempat berlabuh. Apabila operasi pembongkaran dan/atau pemuatan selesai, kapal akan ditarik kembali ke tempat berlabuh. Dalam kondisi yang jarang terjadi, layanan pemindahan tempat berlabuh diperlukan. Kebutuhan horsepower/tenaga kapal tunda harus dipenuhi. Keputusan penjadwalan merupakan tugas yang sulit, yang harus disertai dengan menugaskan kapal tunda ke kapal dan menentukan urutan layanan kapal [11].

C. Mixed Integer Linear Programming

Mixed Integer Linear Programming (MILP) merupakan perluasan dari pemrograman linear dengan memperbolehkan

beberapa atau semua variabel keputusan untuk bersifat bilangan bulat (integer). *Mixed Integer Linear Programming (MILP)* merupakan masalah dengan:

1. Fungsi tujuan linier, $f^T x$, dengan f adalah vektor kolom dari konstanta, dan x adalah vektor kolom dari variabel yang tidak diketahui.
2. Batasan dan batasan linier, namun tidak ada batasan nonlinier.
3. Pembatasan pada beberapa komponen x agar memiliki nilai integer.

D. Tailored Algorithm

Tailored algorithm adalah algoritma yang dirancang khusus dengan memanfaatkan pengetahuan tentang domain masalah tertentu agar dapat memecahkan permasalahan di domain tersebut dengan efektif dan efisien. Ini berbeda dengan algoritma generik yang tidak memanfaatkan pengetahuan spesifik domain.

III. RESEARCH METHODS

A. Model Tugboat Scheduling Problem

Fungsi objektif dari permasalahan penjadwalan kapal tunda yang diadopsi dari model yang diusulkan oleh (Kang et al., 2020) [3] adalah meminimalkan waktu deviasi antara waktu awal proses dan ETA kapal yang ditentukan oleh Persamaan (1). Minimasi waktu pelayanan/proses akan dilakukan pada setiap segmen, dengan mempertimbangkan beberapa faktor, yaitu bobot kepentingan kapal pelanggan j (ϵ_j), waktu mulai tarikan kapal j oleh kapal tunda g pada posisi kth dari jadwal awal (t_{gj}^k), dan estimasi waktu kedatangan kapal j (A_j). Model dasar ditunjukkan pada persamaan (1) - (11).

$$\min \sum_g \sum_j \sum_k \epsilon_j \cdot (t_{gj}^k + c_{gj}^k - A_j \cdot x_{gj}^k) \quad (1)$$

$$\sum_g \sum_k x_{gj}^k = 1, \forall j \in J \quad (2)$$

$$\sum_j x_{gj}^k \leq 1, \forall g \in G, \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_j x_{gj}^{k-1} - \sum_j x_{gj}^k \geq 0, \forall g \in G, \forall k \in \{2, \dots, m\} \quad (4)$$

$$A_j + M \cdot (x_{gj}^k - 1) \leq t_{gj}^k \leq A_j + \tau_j, \forall g \in G, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (5)$$

$$C_j + M \cdot (x_{gj}^k - 1) \leq c_{gj}^k \leq C_j + \tau_j, \forall g \in G, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (6)$$

$$t_{gj}^k - \sum_j (t_{gj}^{k-1} + 2 \cdot c_{gj}^{k-1} + L_j) - \Delta C \geq M \cdot (x_{gj}^k - 1), \forall g \in G, \forall j \in J, \forall k \in \{2, \dots, m\} \quad (7)$$

$$\sum_g \sum_k (m_g - w_j) \cdot x_{gj}^k \geq 0, \forall j \in J \quad (8)$$

$$x_{gj}^k \in \{0, 1\}, \forall g \in G, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (9)$$

$$t_{gj}^k \geq 0, \forall g \in G, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (10)$$

$$c_{gj}^k \geq 0, \forall g \in G, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (11)$$

Persamaan (2) menetapkan bahwa setiap kapal harus dialokasikan secara eksklusif untuk satu kapal tunda selama periode waktu tertentu. Persamaan (3) menyiratkan bahwa kapasitas setiap kapal tunda dibatasi untuk melayani satu kapal secara bersamaan. Persamaan (4) Menetapkan

representasi nyata dari urutan kronologis di mana setiap kapal tunda melakukan operasi penarik yang ditugaskan, mulai dari tugas awal hingga tugas akhir. Persamaan (5) Menentukan jadwal awal (t_{gj}^k) ketika kapal tunda k mulai menarik kapal j. Jika x_{gj}^k , sama dengan nol, yang mengindikasikan tidak ada penugasan, t_{gj}^k diatur ke nol. Namun, jika ditugaskan, t_{gj}^k harus dimulai setelah kapal j tiba di Aj, namun dalam jendela keterlambatan maksimum $Aj + \pi j$. Hal ini mengharuskan penarik mulai setelah kapal berlabuh dan membatasi waktu tunggu yang berlebihan hingga τj menit. Persamaan (6) menghitung durasi c_{gj}^k dari operasi penarik yang dilakukan oleh kapal tunda k untuk kapal j. Jika x_{gj}^k sama dengan nol, yang mengindikasikan tidak ada penugasan, maka c_{gj}^k diatur tepat ke nol. Namun, ketika x_{gj}^k tidak nol, c_{gj}^k harus berada di dalam rentang yang dibatasi dari Cj ke $Cj + \pi j$. Persamaan (7) menetapkan bahwa kapal tunda hanya bisa ditugaskan ke kapal j yang datang setelah menyelesaikan operasi penarikannya untuk kapal j yang pertama. Selain itu, kapal tunda harus kembali ke tempat berlabuh dan menjalani periode berlayar menganggur yang telah ditentukan ΔC , memperhitungkan penyiapan dan istirahat staf, sebelum memulai pekerjaan baru untuk kapal j. Kegagalan untuk mematuhi urutan ini akan mengakibatkan x_{gj}^k disetel ke nol, sehingga menghalangi penugasan, dan dengan demikian memberlakukan pembatasan putar balik. Persamaan (8) memberlakukan batasan tenaga kuda pada penugasan kapal tunda, memastikan bahwa tonase setiap kapal j tidak melebihi kapasitas tenaga kuda dari kapal tunda yang ditugaskan, g. Batasan selanjutnya, persamaan (9) sampai (11), menggambarkan rentang nilai yang diizinkan untuk variabel keputusan dalam kondisi operasional yang umum.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Constraint and Assumptions

Setelah merumuskan model, kami melanjutkan ke tahap evaluasi di mana pendekatan optimasi yang dikembangkan dibandingkan dengan skenario praktis yang dihadapi di pelabuhan. Model pemrograman linear bilangan bulat campuran (MILP) diimplementasikan dengan menggunakan solver Gurobi. Kinerja model dinilai dengan menerapkan kriteria pembatas dan premis-premis yang mendasarinya:

1. Otoritas pelabuhan telah menetapkan indikator kinerja utama (KPI) selama 20 menit untuk waktu tunggu kapal di anchorage area.
2. Tidak mempertimbangkan penjadwalan ulang operasi penundaan karena tidak terpenuhinya kebutuhan tenaga kuda yang telah ditetapkan atau insiden yang tidak terduga seperti keandalan peralatan dan kondisi cuaca atau laut.
3. Jadwal yang dapat diterima dan dapat diterapkan untuk operasi kapal tunda harus memenuhi kriteria spesifik tambahan, termasuk memastikan bahwa jumlah kapal tunda yang ditugaskan minimum tersedia untuk melayani sejumlah kapal tertentu, sementara juga memiliki kapasitas yang memadai untuk menangani berat gabungan atau total tonase kapal tersebut.

4. Studi ini mempertimbangkan kepentingan relatif pelanggan (kapal) berdasarkan 3 poin kriteria, yaitu tally tonase, keterlambatan, dan discharge rate.
5. Penelitian ini menggunakan data historis dari pelabuhan yang berlokasi di Malaysia.

B. Parameter and Scenario

Sebagai bagian dari proses validasi model, dataset operasi tunda skala kecil digunakan untuk tujuan pengujian. Solver Excel, digunakan untuk mengidentifikasi urutan tugas kapal tunda yang optimal tugas kapal tunda berdasarkan model pemrograman linier bilangan bulat (MILP). Input parametrik dan konfigurasi skenario yang diterapkan selama fase pengujian ini diuraikan dalam Tabel 1

TABEL 1
PARAMETER SETTING

No	Description	Unit
1	Number of tugboats available	Unit
2	Number of Ship	Unit
3	Tugboat capacity and characteristics (horsepower)	HP
4	The estimated times of arrival (ETA)	Minute
5	Tugging Start Time	Minute
6	Ship Waiting Time KPI	Minute

C. Numerical Result

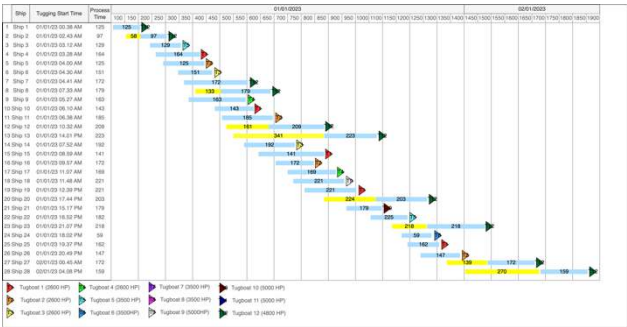
Dari waktu awal proses dan waktu proses optimal, dan juga tugboat pasangan paling sesuai yang dapat melayani kapal berdasarkan tonase kapal dan kemampuan tenaga/horsepower tugboat yang didapatkan dari hasil *Tailored Algorithm Tugging Chain* sebelumnya, sehingga didapatkan jadwal layanan tugboat sebagai berikut:

TABEL 2
TUGGING CHAIN DAN OBJECTIVE FUNCTION

Ship	Tugging Chain	Service Start Time	Objective Funtion
S1	T12	38	1039
S2	T12	163	
S3	T5	192	
S4	T1	208	
S5	T2	242	
S6	T3	270	
S7	T12	281	1856
S8	T12	453	
S9	T4	327	
S10	T1	430	
S11	T2	458	
S12	T12	632	
S13	T12	841	1081
S14	T3	532	
S15	T1	599	
S16	T2	657	
S17	T4	667	
S18	T9	708	
S19	T1	759	2643
S20	T12	1064	
S21	T10	917	
S22	T5	1012	
S23	T12	1267	

Ship	Tugging Chain	Service Start Time	Objective Funtion
S24	T6	1097	2515
S25	T1	1177	
S26	T2	1249	
S27	T12	1485	
S28	T12	1657	
Total			9134

Didapatkan penjadwalan tanpa adanya *overlap* antar layanan *tugboat* yang digunakan dan paling sesuai dengan tonase masing-masing kapal, atau dapat digambarkan *dengan Gantt Chart* sebagai berikut.



GAMBAR 2

Adapun garis kuning menggambarkan waktu delay dari waktu awal proses dari penjadwalan optimal yang sebelumnya didapatkan dengan Model MILP, namun setelah mengintegrasikannya dengan Algoritma *Tugging Chain* untuk memasangkan tugboat yang sesuai dengan kapal berdasarkan *availability* nya, kita dapat melihat bahwa terjadi penyesuaian waktu awal proses baru dengan mempertimbangkan adanya delay pada karena semua kapal harus tetap harus terlayani dengan harus menunggu kapal sebelumnya menyelesaikan proses *tugging*.

Setelah dilakukan penjadwalan untuk menentukan waktu awal proses *tugging* dan waktu proses paling optimal dan sesuai dengan *availability tugboat*, didapatkan hasil sebagai berikut.

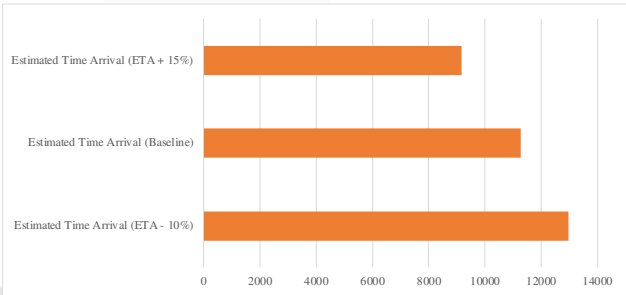
TABEL 3
WAKTU DEVIASI ANTAR WAKTU AWAL PROSES *TUGGING*
DENGAN ETA OPERASI USULAN

Ship	Estimated Time Arrival (ETA) (minute)	Tugging Start Process Time (Minute)	Gap
S1	18	38	20
S2	85	163	78
S3	172	192	20
S4	188	373	185
S5	222	242	20
S6	250	270	20
S7	261	281	20
S8	300	453	153
S9	307	327	20
S10	410	430	20
S11	438	458	20
S12	451	632	181
S13	480	841	361

Ship	Estimated Time Arrival (ETA) (minute)	Tugging Start Process Time (Minute)	Gap
S14	512	532	20
S15	579	599	20
S16	637	657	20
S17	647	667	20
S18	688	708	20
S19	739	759	20
S20	820	1064	244
S21	897	917	20
S22	992	1012	20
S23	1037	1267	230
S24	1072	1097	25
S25	1157	1177	20
S26	1229	1249	20
S27	1326	1485	159
S28	1398	1688	290

D. Analisis Sensiititas

Pada bagian ini, penulis membuat beberapa skenario untuk menguji sensitivitas waktu proses tugging yang dipengaruhi oleh waktu awal proses tugging dan dan waktu estimasi kedatangan kapal. Untuk skenario 1 sampai 4, waktu awal proses tugging dan dan waktu proses tugging dipengaruhi oleh ketidakpastian waktu kedatangan kapal. Skenario 1 dan 2 adalah apabila kapal datang lebih awal dari waktu ETA atau Estimated Time Arrival. Skenario 3 dan 4 adalah ketika kapal datang lebih lambat dari waktu ETA atau *Estimated Time Arrival*.



GAMBAR 3
GRAFIK PERUBAHAN *ESTIMATED SHIP ARRIVAL TIME*
MEMENGARUHI FUNGSI OBJEKTIF *WITH THREE SCENARIO*

V. KESIMPULAN

1. Ketidakpastian waktu awal proses tugging menjadi faktor utama dalam terjadinya keterlambatan waktu proses tugging, waktu rata-rata deviasi antara waktu awal proses tugging dengan ETA Pelabuhan PT XYZ pada periode 1 Januari 2023 oleh 12 armada tugboat/kapal tunda dapat dioptimasi sebesar 21% menjadi 81 menit dibandingkan dengan waktu proses awal yaitu sebesar 102 menit, dengan penurunan sebesar 21 menit.
2. Waktu awal proses untuk setiap kapal menjadi faktor penting dalam proses penjadwalan agar jadwal yang dihasilkan menjadi optimal, maka dari itu, waktu deviasi antar ETA dan waktu awal proses harus diminimasi agar tidak ada keterlambatan dalam proses tugging karena akibat lamanya delay kapal yang menunggu pada anchorage area.

3. Dari hasil analisis sensitivitas terhadap perubahan ETA, dapat diketahui bahwa perubahan ETA memengaruhi keseluruhan fungsi objektif sebagai parameter, yaitu deviasi antara start time dan ETA. Semakin cepat ETA, semakin besar pula fungsi objektif, sebaliknya, semakin lama ETA (mendekati waktu awal proses sesuai jadwal), maka waktu deviasi akan semakin kecil.
4. Penambahan *Tugboat* dengan *horsepower* 4800 dengan merk *Voith* mungkin dapat dipertimbangkan mengingat banyaknya kapal dengan tonase 30.000 DWT yang bersandar pada Pelabuhan XYZ, tetapi *Tugboat* dengan *horsepower* 4800 dengan merk *Voith* hanya berjumlah sebanyak 1, sehingga diharapkan penambahan tersebut dapat membantu meminimasi adanya *delay* karena ketidaktersediaan *tugboat* yang sesuai dengan Tonase kapal dengan berat lebih dari 30.000 DWT

REFERENSI

- [1] T. Notteboom, A. Pallis, and J.-P. Rodrigue, *Port Economics, Management and Policy*, 1st ed. London: Taylor & Francis Group, 2022
- [2] INAMEQ, "Fungsi dan Jenis Kapal Tug Boat," Indonesia Marine Equipment.
- [3] L. Kang, Q. Meng, and K. C. Tan, "Tugboat scheduling under ship arrival and tugging process time uncertainty," *Transp Res E Logist Transp Rev*, vol. 144, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.tre.2020.102125
- [4] L. Kang, Q. Meng, and K. C. Tan, "Tugboat scheduling under ship arrival and tugging process time uncertainty," *Transp Res E Logist Transp Rev*, vol. 144, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.tre.2020.102125
- [5] M. Zhong, Y. Wu, C. Wu, and F. Wang, "Tugboat Scheduling Problem Considering Time Windows and Flexible Returning Way to Base," *J Shanghai Jiaotong Univ Sci*, 2023, doi: 10.1007/s12204-023-2657-0. <https://doi.org/10.18535/jjecs/v5i6.11>
- [6] S. Li, X. Lin, and X. Chen, "Scheduling Tugboats in a Seaport," 2020.
- [7] X. Wei, S. Jia, Q. Meng, and K. C. Tan, "Tugboat scheduling for container ports," *Transp Res E Logist Transp Rev*, vol. 142, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.tre.2020.102071.
- [8] H. Yu, "Tugboat scheduling problem in large container ports: A case study of the Singapore port," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Aug. 2021. doi: 10.1088/1742-6596/1983/1/012097
- [9] P. Yao, X. Duan, and J. Tang, "An improved gray wolf optimization to solve the multi-objective tugboat scheduling problem," *PLoS One*, vol. 19, no. 2 February, Feb. 2024, doi: 10.1371/journal.pone.0296966
- [10] L. Hao, J. G. Jin, and K. Zhao, "Joint scheduling of barges and tugboats for river-sea intermodal transport," *Transp Res E Logist Transp Rev*, vol. 173, May 2023, doi: 10.1016/j.tre.2023.103097
- [11] C. Sun, M. Li, L. Chen, and P. Chen, "Dynamic Tugboat Scheduling for Large Seaports with Multiple Terminals," *J Mar Sci Eng*, vol. 12, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.3390/jmse12010170
- [12] X. Wei, Q. Meng, A. Lim, and S. Jia, "Dynamic tugboat scheduling for container ports," *Maritime Policy and Management*, vol. 50, no. 4, 2023, doi: 10.1080/03088839.2021.1953175.
- [13] O. Abou Kasm, A. Diabat, and M. Bierlaire, "Vessel scheduling with pilotage and tugging considerations," *Transp Res E Logist Transp Rev*, vol. 148, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.tre.2021.102231
- [14] H. Yu, "Tugboat scheduling problem in large container ports: A case study of the Singapore port," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Aug. 2021. doi: 10.1088/1742-6596/1983/1/012097.
- [15] S. Jia, C.-L. Li, and Z. Xu, "Managing Navigation Channel Traffic and Anchorage Area Utilization of a Container Port," 2017
- [16] S. M. Lee, J. H. Lee, M. Il Roh, K. S. Kim, S. H. Ham, and H. W. Lee, "An optimization model of tugboat operation for conveying a large surface vessel," *J Comput Des Eng*, vol. 8, no. 2, pp. 654–675, Apr. 2021, doi: 10.1093/jcde/qwab006
- [17] Q. Xu, J. Mao, and Z. Jin, "Simulated annealing-based ant colony algorithm for tugboat scheduling optimization," *Math Probl Eng*, vol. 2012, 2012, doi: 10.1155/2012/246978
- [18] S. Jia, C.-L. Li, and Z. Xu, "Managing Navigation Channel Traffic and Anchorage Area Utilization of a Container Port," 2017
- [19] S. Jia, L. Wu, and Q. Meng, "Joint Scheduling of Vessel Traffic and Pilots in Seaport Waters," 2019
- [20] S. Li and S. Jia, "The Seaport Traffic Scheduling Problem: Formulations and a Column-row Generation Algorithm." [Online]. Available: <https://ssrn.com/abstract=3431604>
- [21] K. Li, Y. Zhuo, and X. Luo, "Optimization method of fuel saving and cost reduction of

- tugboat main engine based on genetic algorithm,” *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol. 13, pp. 605–614, Mar. 2022, doi: 10.1007/s13198-021-01549-2
- [22] S. Wang, I. Kaku, G. Chen, and M. Zhu, “Research on the modeling of Tugboat Assignment Problem in container terminal,” in *Advanced Materials Research*, 2012, pp. 1957–1961. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.433-440.1957
- [23] L. Kang, S. Gao, and Q. Meng, “Capacity analysis of ship-tugging operations in a large container port,” *Asian Transport Studies*, vol. 6, p. 100011, 2020, doi: 10.1016/j.eastsj.2020.100011
- [24] S. Jiang, “Integrated Scheduling Optimization of Two-Way Channel Ships Entering and Leaving Ports and Tugboat Distribution,” *Journal of Architectural Research and Development*, vol. 6, no. 6, 2022, [Online]. Available: <http://ojs.bbwpublisher.com/index.php/JARD>
- [25] Z. Liu, “Hybrid evolutionary strategy optimization for port tugboat operation scheduling,” in *3rd International Symposium on Intelligent Information Technology Application, IITA 2009*, 2009, pp. 511–515. doi: 10.1109/IITA.2009.490