

**Ranah Research**

E-ISSN: 2655-0865

Journal of Multidisciplinary Research and Development

082170743613

ranahresearch@gmail.com

<https://jurnal.ranahresearch.com>DOI: <https://doi.org/10.38035/rrj.v8i5><https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pemodelan Matematis dan Simulasi MATLAB Navigasi Dua Arah Robot Delivery Menggunakan Mirror Petri Net

Astuti Damayanti¹, Yudhi Gunardi²¹Program Studi Magister Teknik Elektro, Universitas Mercu Buana, Jakarta, Indonesia, 55424110007@student.mercubuana.ac.id²Program Studi Magister Teknik Elektro, Universitas Mercu Buana, Jakarta, Indonesia, yudhi.gunardi@mercubuana.ac.idCorresponding Author: 55424110007@student.mercubuana.ac.id¹

Abstract: Bidirectional navigation is required in robot delivery systems because the robot must reach a destination and return to its initial position after completing a task. Previous Petri Net studies have represented robot routes and location changes, but complete stepwise verification of outbound and return trips for multiple destinations remains limited. This study aims to develop a mathematical model and MATLAB simulation for bidirectional indoor robot delivery navigation using Petri Net and Mirror Petri Net. The model consists of 13 places, 12 transitions, one initial position, four branch points, eight destination rooms, and one token representing a robot. Eight outbound and eight return scenarios were simulated by checking enabled transitions, firing sequences, and marking changes. All eight destinations were reachable from the initial marking, and the initial position was reachable again from every destination. The outbound and return processes each required 28 firings, giving 56 firings for all round-trip tests. The model remained 1-bounded, conserved one token, made all 12 transitions accessible, and produced no unintended deadlock. The novelty lies in integrating stepwise bidirectional reachability, legal firing-sequence checking, and proper-termination verification in one MATLAB-based Mirror Petri Net framework.

Keyword: Robot Delivery, Mirror Petri Net, Bidirectional Navigation, Reachability, MATLAB Simulation.

Abstrak: Navigasi dua arah diperlukan pada sistem robot delivery karena robot harus mencapai ruang tujuan dan kembali ke posisi awal setelah menyelesaikan tugas. Penelitian Petri Net terdahulu telah merepresentasikan jalur dan perubahan posisi robot, tetapi verifikasi bertahap perjalanan berangkat dan kembali untuk banyak tujuan masih terbatas. Penelitian ini bertujuan membangun model matematis dan simulasi MATLAB untuk navigasi dua arah robot delivery indoor menggunakan Petri Net dan Mirror Petri Net. Model terdiri atas 13 place, 12 transition, satu posisi awal, empat titik percabangan, delapan ruang tujuan, dan satu token sebagai representasi robot. Delapan skenario berangkat dan delapan skenario kembali disimulasikan melalui pemeriksaan transition aktif, firing sequence, dan perubahan marking. Seluruh ruang dapat dicapai dari marking awal, dan posisi awal dapat dicapai kembali dari setiap ruang. Perjalanan berangkat dan kembali masing-masing memerlukan 28 firing atau 56

firing untuk seluruh pengujian pergi-pulang. Model memenuhi 1-boundedness, konservasi satu token, aksesibilitas 12 transition, dan tidak menghasilkan unintended deadlock. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi verifikasi reachability dua arah, legalitas firing sequence, dan proper termination secara bertahap dalam satu kerangka Mirror Petri Net berbasis MATLAB.

Kata Kunci: Robot Delivery, Mirror Petri Net, Navigasi Dua Arah, Reachability, Simulasi MATLAB.

PENDAHULUAN

Robot delivery semakin banyak dikembangkan untuk mendukung pengantaran obat, dokumen, makanan, perlengkapan, dan barang berukuran kecil pada rumah sakit, kampus, hotel, laboratorium, serta gedung perkantoran. Pada lingkungan indoor, robot tidak hanya membutuhkan pengendalian gerak, tetapi juga representasi jalur yang mampu menunjukkan posisi awal, titik percabangan, ruang tujuan, dan urutan perpindahan. Palacín et al. (2023) menunjukkan bahwa jalur robot delivery pada gedung bertingkat dapat direncanakan menggunakan pohon navigasi ketika peta dan tujuan telah diketahui. Kompleksitas tata ruang juga memengaruhi keandalan navigasi, terutama pada lingkungan rumah sakit yang memiliki banyak cabang dan aturan operasional yang ketat (Rondoni et al., 2024).

Perjalanan robot delivery tidak berhenti pada saat barang tiba di tujuan. Robot perlu kembali menuju posisi awal, stasiun pengisian daya, atau lokasi layanan berikutnya. Kebutuhan tersebut menimbulkan persoalan pemodelan dua arah. Jalur berangkat dan jalur kembali harus saling konsisten, tetapi arah hubungan antarposisi berubah. Jika kedua arah disusun tanpa model formal, kesalahan hubungan jalur, transition yang tidak sah, atau kondisi berhenti sebelum tujuan sulit diketahui sejak tahap perancangan.

Petri Net merupakan model grafis dan matematis untuk sistem kejadian diskrit yang mampu merepresentasikan urutan kejadian, pilihan jalur, perubahan keadaan, reachability, boundedness, dan deadlock (Murata, 1989). Pada navigasi robot, place dapat menyatakan posisi, transition menyatakan perpindahan, dan token menunjukkan posisi robot. Gunardi et al. (2018a) menggunakan marking sebagai dasar penentuan arah mobile robot, sedangkan da Mota et al. (2018) menggabungkan Petri Net dan identifikasi lokasi untuk navigasi indoor.

Untuk merepresentasikan arah kembali, Gunardi et al. (2018b) memperkenalkan Mirror Petri Net dengan fungsi input dan output mirror. Dasar matematisnya kemudian dikembangkan untuk menjelaskan perubahan marking pada perjalanan berlawanan (Gunardi et al., 2019). Namun, penelitian terdahulu lebih banyak menekankan konsep navigasi, RFID, atau representasi posisi. Penyajian simulasi bertahap untuk setiap ruang tujuan, pemeriksaan legalitas firing sequence, konservasi token, serta pembedaan proper termination dari unintended deadlock belum selalu dibahas secara terpadu.

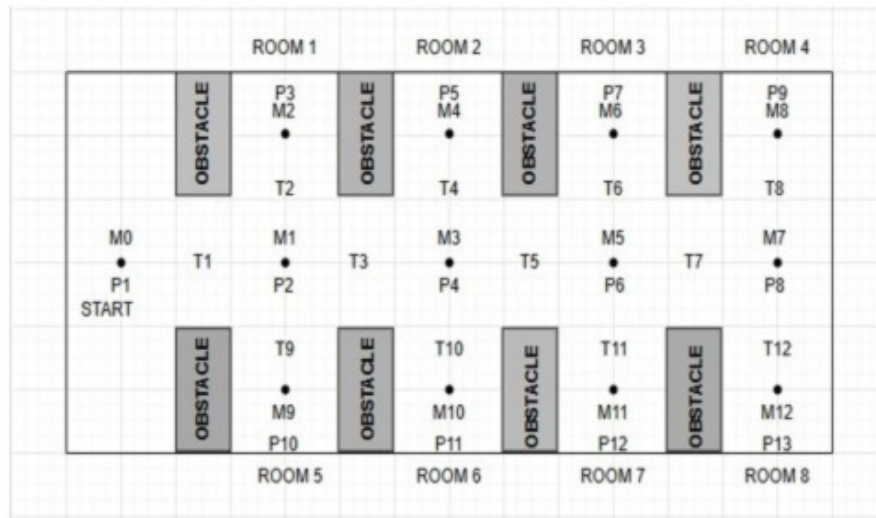
Research gap penelitian ini terletak pada kebutuhan model yang tidak hanya membalik urutan transition secara tertulis, tetapi juga memeriksa fungsi input-output mirror dan perubahan marking pada setiap langkah. State of the art penelitian ini adalah integrasi ordinary Petri Net untuk perjalanan berangkat, Mirror Petri Net untuk perjalanan kembali, dan verifikasi komputasional menggunakan MATLAB pada delapan ruang tujuan. Tujuan penelitian adalah membangun model navigasi dua arah, mensimulasikan seluruh firing sequence, dan memverifikasi reachability, 1-boundedness, konservasi token, aksesibilitas transition, serta proper termination.

METODE

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif melalui pemodelan matematis dan simulasi komputer. Objek penelitian adalah lingkungan indoor statis yang memiliki satu

posisi awal, empat titik percabangan utama, dan delapan ruang tujuan. Satu robot direpresentasikan oleh satu token. Data penelitian berupa marking sebelum dan sesudah firing, status transition, firing sequence, jumlah token, marking akhir, status reachability, dan status terminasi.

Model perjalanan berangkat disusun sebagai ordinary Petri Net dengan 13 place, 12 transition, dan 24 arc. Place P1 menyatakan posisi awal; P2, P4, P6, dan P8 menyatakan titik percabangan; sedangkan P3, P5, P7, P9, P10, P11, P12, dan P13 menyatakan Ruang 1 sampai Ruang 8. Peta lingkungan yang menjadi dasar model ditunjukkan pada Gambar 1.



Sumber: Data olahan penulis (2026).

Gambar 1. Peta lingkungan robot delivery dengan delapan ruang tujuan

Model Petri Net perjalanan berangkat dinyatakan sebagai berikut:

$$PN = (P, T, I, O, M) \quad (1)$$

Pada (1), P merupakan himpunan place, T merupakan himpunan transition, I merupakan fungsi input, O merupakan fungsi output, dan M merupakan marking. Perubahan marking setelah transition t_j melakukan firing dihitung menggunakan:

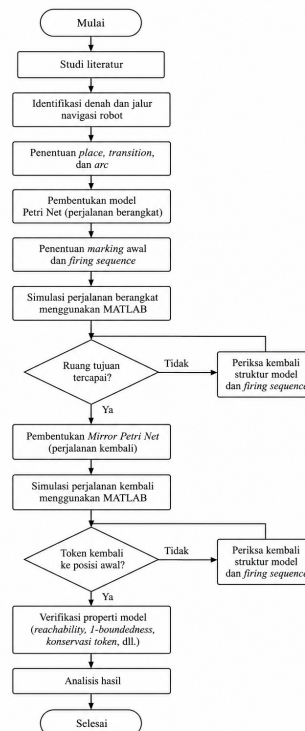
$$M'(p_i) = M(p_i) + O(p_i, t_j) - I(p_i, t_j) \quad (2)$$

Setelah robot mencapai ruang tujuan, perjalanan kembali dimodelkan menggunakan fungsi input dan output mirror:

$$PN^* = (P, T, I^*, O^*, M) \quad (3)$$

$$M'(p_i) = M(p_i) + O^*(p_i, t_j) - I^*(p_i, t_j) \quad (4)$$

Tanda bintang pada I^* dan O^* menunjukkan bahwa hubungan place-transition mengikuti arah perjalanan kembali. Setiap transition terlebih dahulu diperiksa berdasarkan marking dan fungsi input. Transition hanya melakukan firing apabila place input memiliki token. Prosedur simulasi meliputi penetapan marking awal, pemilihan ruang, pembacaan firing sequence, pemeriksaan enabled transition, pembaruan marking, penyimpanan hasil, pemeriksaan marking tujuan, pembentukan model mirror, dan pengembalian token menuju P1. Diagram alir penelitian disajikan pada Gambar 2.



Sumber: Data olahan penulis (2026).

Gambar 2. Diagram alir pemodelan dan simulasi navigasi dua arah

Tabel 1. Firing sequence perjalanan berangkat dan kembali

No.	Tujuan	Berangkat	Kembali
1	Ruang 1 (P3)	T1, T2	T2*, T1*
2	Ruang 2 (P5)	T1, T3, T4	T4*, T3*, T1*
3	Ruang 3 (P7)	T1, T3, T5, T6	T6*, T5*, T3*, T1*
4	Ruang 4 (P9)	T1, T3, T5, T7, T8	T8*, T7*, T5*, T3*, T1*
5	Ruang 5 (P10)	T1, T9	T9*, T1*
6	Ruang 6 (P11)	T1, T3, T10	T10*, T3*, T1*
7	Ruang 7 (P12)	T1, T3, T5, T11	T11*, T5*, T3*, T1*
8	Ruang 8 (P13)	T1, T3, T5, T7, T12	T12*, T7*, T5*, T3*, T1*

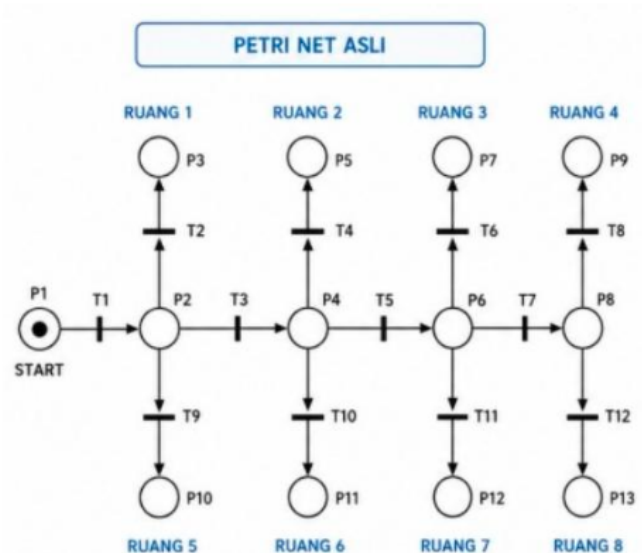
Sumber: Hasil simulasi penulis (2026)

Model dinyatakan berhasil apabila delapan ruang reachable dari M0, P1 dapat dicapai kembali dari setiap ruang, seluruh firing sequence legal, marking tetap biner, jumlah token selalu satu, seluruh transition dapat diakses, dan simulasi berhenti pada marking terminal yang direncanakan. Penggunaan istilah aksesibilitas transition dan proper termination dipilih agar tidak menghasilkan klaim liveness penuh pada model yang memang memiliki marking akhir.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pembentukan Model

Model yang dihasilkan terdiri atas 13 place dan 12 transition. Diagram Petri Net membentuk jalur utama P1-P2-P4-P6-P8 dengan cabang atas menuju P3, P5, P7, dan P9 serta cabang bawah menuju P10, P11, P12, dan P13. Struktur model ditunjukkan pada Gambar 3. Setiap transition memiliki satu place input dan satu place output, sehingga firing memindahkan satu token tanpa menambah atau menghilangkannya.



Sumber: Data olahan penulis (2026).

Gambar 3. Model Petri Net navigasi robot delivery

Hasil Simulasi Perjalanan Berangkat dan Kembali

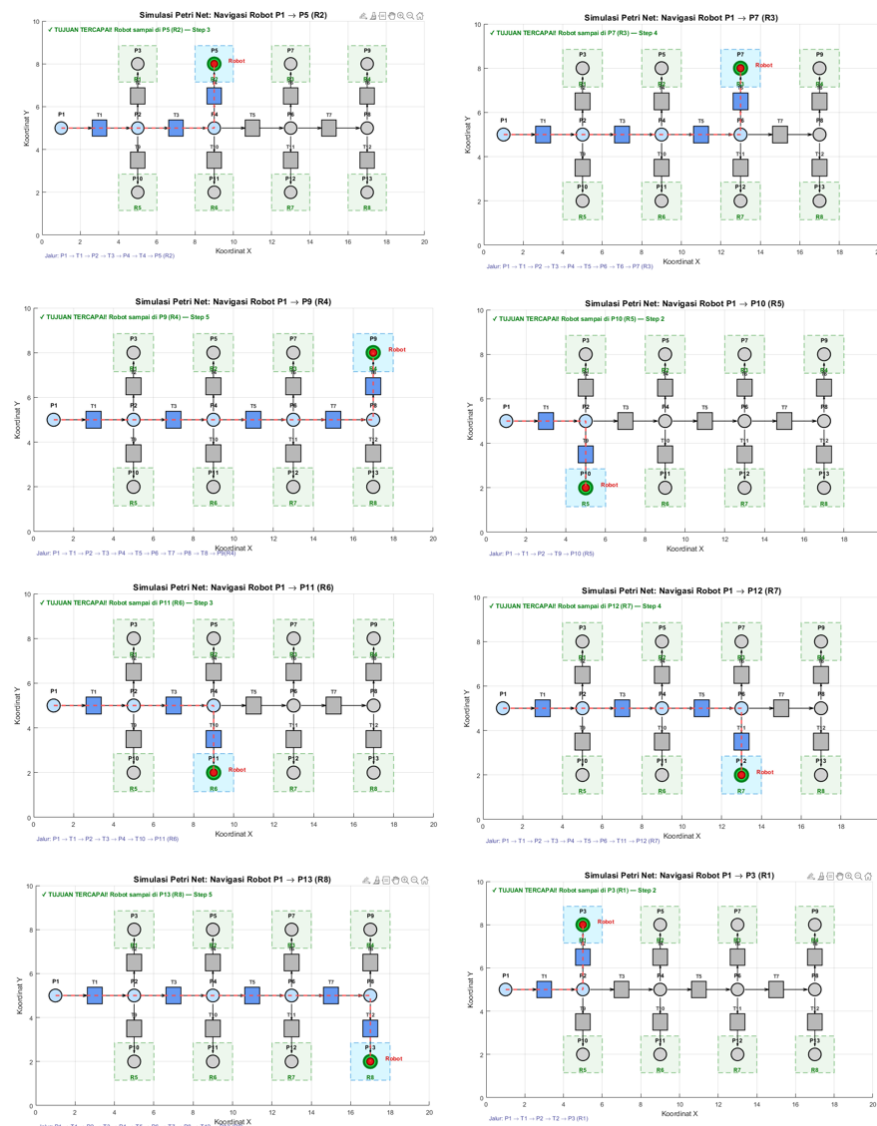
Tabel 2. Hasil simulasi delapan skenario dua arah

Skenario	Tujuan	Firing Berangkat	Firing Kembali	Status
1	P3	2	2	Berhasil
2	P5	3	3	Berhasil
3	P7	4	4	Berhasil
4	P9	5	5	Berhasil
5	P10	2	2	Berhasil
6	P11	3	3	Berhasil
7	P12	4	4	Berhasil
8	P13	5	5	Berhasil

Sumber: Hasil simulasi penulis (2026)

Seluruh ruang tujuan dapat dicapai dari P1 melalui firing sequence yang telah ditetapkan. Tidak terdapat transition yang dijalankan ketika disabled. Ruang 1 dan Ruang 5 memerlukan dua firing; Ruang 2 dan Ruang 6 memerlukan tiga firing; Ruang 3 dan Ruang 7 memerlukan empat firing; sedangkan Ruang 4 dan Ruang 8 memerlukan lima firing. Pola tersebut menunjukkan bahwa panjang firing sequence meningkat seiring bertambahnya titik percabangan yang dilalui.

Pada perjalanan kembali, marking ruang tujuan menjadi marking awal model mirror. Seluruh firing sequence mirror berhasil mengembalikan token ke P1. Total firing perjalanan berangkat adalah 28 dan perjalanan kembali juga 28, sehingga seluruh pengujian pergi-pulang menghasilkan 56 firing. Rata-rata satu arah adalah 3,5 firing, sedangkan rata-rata satu siklus pergi-pulang adalah 7 firing. Nilai tersebut menunjukkan panjang urutan kejadian, bukan waktu tempuh fisik karena model belum memasukkan parameter waktu dan kecepatan.



Sumber: Keluaran simulasi MATLAB penulis (2026).

Gambar 4. Visualisasi hasil simulasi MATLAB menuju delapan ruang tujuan

Analisis Reachability Dua Arah

Reachability diperiksa dengan menelusuri perubahan marking pada setiap transition. Seluruh marking tujuan M(P3), M(P5), M(P7), M(P9), M(P10), M(P11), M(P12), dan M(P13) dapat dicapai dari M0. Sebaliknya, M0 dapat dicapai kembali dari setiap marking tujuan melalui firing sequence mirror. Hasil ini menunjukkan bahwa model tidak hanya memenuhi persamaan keadaan, tetapi juga memiliki urutan firing yang dapat dijalankan secara legal. Temuan tersebut penting karena keberadaan solusi vektor firing belum selalu menjamin adanya firing sequence yang sah (Su et al., 2023).

Tabel 3. Ringkasan hasil verifikasi model

Aspek	Hasil	Status
Reachability berangkat	8 dari 8 ruang tercapai	Terpenuhi
Reachability kembali	P1 tercapai dari 8 ruang	Terpenuhi
Legalitas firing sequence	Seluruh transition enabled sebelum firing	Terpenuhi
1-boundedness	Nilai marking 0 atau 1	Terpenuhi

Aspek	Hasil	Status
Konservasi token	Jumlah token selalu 1	Terpenuhi
Aksesibilitas transition	12 dari 12 transition	Terpenuhi
Unintended deadlock	Tidak ditemukan	Terpenuhi
Proper termination	Berhenti pada tujuan dan P1	Terpenuhi

Sumber: Hasil simulasi penulis (2026).

Analisis 1-Boundedness dan Konservasi Token

Nilai setiap elemen marking pada seluruh tahapan simulasi hanya nol atau satu. Tidak terdapat place yang menyimpan lebih dari satu token dan tidak ditemukan marking negatif. Dengan demikian, model memenuhi 1-boundedness atau safeness. Properti ini memastikan satu robot tidak direpresentasikan berada pada dua posisi pada saat yang sama.

Jumlah token tetap satu sebelum perjalanan, selama firing, pada ruang tujuan, selama perjalanan kembali, dan setelah mencapai P1. Firing hanya memindahkan token dari place input menuju place output. Konsistensi ini menunjukkan bahwa fungsi input dan output, baik pada model berangkat maupun model mirror, tidak menambah atau menghilangkan representasi robot.

Aksesibilitas Transition, Deadlock, dan Terminasi

Seluruh 12 transition muncul pada sedikitnya satu skenario yang valid. T1 digunakan pada seluruh perjalanan; transition cabang seperti T2, T4, T6, T8, T9, T10, T11, dan T12 digunakan sesuai ruang tujuan; sedangkan T3, T5, dan T7 menjadi bagian jalur utama menuju percabangan yang lebih jauh. Hasil ini menunjukkan aksesibilitas transition. Model tidak diklaim live secara penuh karena marking ruang tujuan dan P1 merupakan marking terminal yang memang direncanakan.

Tidak ditemukan kondisi berhenti sebelum tujuan atau sebelum P1 tercapai. Ketika perjalanan berangkat berhenti di ruang tujuan, kondisi tersebut merupakan proper termination, bukan deadlock. Model mirror kemudian diaktifkan dan token kembali ke P1. Pembedaan ini sejalan dengan kebutuhan verifikasi tugas robot agar penyelesaian tugas yang benar tidak disamakan dengan kegagalan sistem (López et al., 2019).

Pembahasan dan Kebaruan Penelitian

Hasil penelitian memperkuat penggunaan Petri Net sebagai representasi formal navigasi indoor. Gunardi et al. (2018a) menunjukkan bahwa marking dapat digunakan untuk menentukan arah mobile robot, sedangkan Gunardi et al. (2021) mengembangkan navigasi menuju banyak ruang dengan dukungan basis data dan RFID. Penelitian ini tidak menggantikan pendekatan tersebut, tetapi memperluas proses verifikasi dengan menampilkan perjalanan berangkat dan kembali untuk setiap ruang menggunakan satu struktur lokasi yang saling berkaitan.

Mirror Petri Net berhasil merepresentasikan arah kembali melalui fungsi I^* dan O^* , bukan sekadar pembalikan teks firing sequence. Perbedaan ini terlihat pada pemeriksaan enabled transition dan pembaruan marking pada setiap langkah. Simulasi MATLAB berfungsi sebagai lapisan validasi komputasional yang dapat menemukan kesalahan arc, transition yang tidak sah, marking negatif, perubahan jumlah token, dan kondisi berhenti yang tidak direncanakan sebelum implementasi pada robot fisik.

Novelty penelitian ini adalah integrasi verifikasi bertahap untuk delapan perjalanan berangkat dan delapan perjalanan kembali dalam satu kerangka MATLAB berbasis Mirror Petri Net. Kebaruan tersebut mencakup pemeriksaan legalitas firing sequence, reachability dua arah, 1-boundedness, konservasi token, aksesibilitas seluruh transition, serta pembedaan

proper termination dan unintended deadlock. Temuan ini memberikan model formal yang lebih mudah ditelusuri untuk tahap awal pengembangan robot delivery indoor.

KESIMPULAN

Kesimpulan

Penelitian menghasilkan model matematis dan simulasi MATLAB navigasi dua arah robot delivery menggunakan Petri Net dan Mirror Petri Net. Model terdiri atas 13 place, 12 transition, satu posisi awal, empat titik percabangan, delapan ruang tujuan, dan satu token. Seluruh delapan ruang dapat dicapai dari marking awal melalui firing sequence yang legal, dan model mirror dapat mengembalikan token dari setiap ruang ke P1. Total pengujian menghasilkan 28 firing berangkat dan 28 firing kembali. Seluruh marking tetap bernilai nol atau satu, jumlah token tetap satu, semua transition dapat diakses, dan tidak ditemukan unintended deadlock. Dengan demikian, Mirror Petri Net mampu merepresentasikan navigasi pergi-pulang secara terstruktur, sedangkan MATLAB membantu memeriksa perubahan marking dan legalitas firing pada setiap langkah.

Keterbatasan

Penelitian dilakukan pada lingkungan indoor statis dengan jalur yang telah ditentukan dan hanya memodelkan satu robot. Simulasi belum melibatkan robot fisik, waktu tempuh, kecepatan, konsumsi energi, kapasitas baterai, ketidakpastian posisi, kesalahan sensor, hambatan dinamis, atau koordinasi multi-robot. Oleh sebab itu, hasil penelitian menunjukkan konsistensi logika model, tetapi belum menggambarkan performa operasional robot pada lingkungan nyata.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan menerapkan model pada robot delivery fisik dan mengintegrasikannya dengan RFID, kamera, LiDAR, encoder, atau sistem lokalisasi lainnya. Parameter waktu dapat ditambahkan melalui Timed Petri Net, sedangkan ketidakpastian dapat dianalisis menggunakan Stochastic Petri Net. Pengembangan lain dapat mencakup obstacle avoidance, jalur alternatif dengan Dijkstra atau A*, lingkungan bertingkat menggunakan Hierarchical Petri Net, analisis energi, serta koordinasi beberapa robot.

Kontribusi Author

Astuti Damayanti berkontribusi pada konseptualisasi penelitian, penyusunan model, pengembangan simulasi MATLAB, pengolahan hasil, dan penulisan naskah. Yudhi Gunardi berkontribusi pada pengembangan metode Mirror Petri Net, supervisi ilmiah, interpretasi hasil, dan penelaahan naskah. Seluruh penulis membaca dan menyetujui versi akhir artikel.

Acknowledgment

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Mercu Buana atas dukungan akademik selama pelaksanaan penelitian.

REFERENSI

- Aizat, M., Othman, K. A., Aras, M. S. M., & Hairi, M. H. (2023). A survey on navigation approaches for automated guided vehicles and autonomous mobile robots. *IEEE Access*, 11, 33940–33965.
- Azevedo, C., Matos, A., Lima, P. U., & Avendaño, J. (2021). Petri Net Toolbox for multi-robot planning under uncertainty. *Applied Sciences*, 11(24), 12087. <https://doi.org/10.3390/app112412087>
- Cassandras, C. G., & Lafortune, S. (2021). *Introduction to discrete event systems* (3rd ed.). Springer.

- da Mota, F. A. X., Rocha, M. X., Rodrigues, J. J. P. C., de Albuquerque, V. H. C., & Alexandria, A. R. (2018). Localization and navigation for autonomous mobile robots using Petri Nets in indoor environments. *IEEE Access*, 6, 31665–31676. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2846554>
- Figat, M., & Zieliński, C. (2020). Robotic system specification methodology based on hierarchical Petri Nets. *IEEE Access*, 8, 71617–71627. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2987099>
- Figat, M., & Zieliński, C. (2022). Parameterised robotic system meta-model expressed by hierarchical Petri nets. *Robotics and Autonomous Systems*, 150, 103987. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103987>
- Gu, C., Ma, Z., & Li, Z. (2024). Liveness and deadlock-freeness verification and enforcement in bounded Petri nets using basis reachability graphs. *Automatica*, 164, 111625. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2024.111625>
- Gunardi, Y., & Hanafi, D. (2022). Petri net modeling for mobile robot motion in sharp turning cases. *Proceedings of the International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISITIA56226.2022.9855287>
- Gunardi, Y., Hanafi, D., Sulle, B., Supegina, F., & Torik. (2019). Mathematics base for mobile robot navigation using mirror Petri net method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1230, 012026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1230/1/012026>
- Gunardi, Y., Hanafi, D., Supegina, F., & Adriansyah, A. (2018a). Mathematics base for navigation mobile robot using reachability Petri Net. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, 10(1-9), 65–69.
- Gunardi, Y., Hanafi, D., Supegina, F., & Torik. (2018b). Design of navigation mobile robot using Mirror Petri Net method and radio frequency identification. *Proceedings of the Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar*, 102–107. <https://doi.org/10.1109/EECCIS.2018.8692926>
- Gunardi, Y., Jumadri, J. N., & Hanafi, D. (2021). A smart guidance navigation robot using Petri net, database location, and radio frequency identification. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 10(4), 1874–1883. <https://doi.org/10.11591/eei.v10i4.3077>
- Halder, S., & Afsari, K. (2023). Robots in inspection and monitoring of buildings and infrastructure: A systematic review. *Applied Sciences*, 13(4), 2304. <https://doi.org/10.3390/app13042304>
- Huang, J., Junginger, S., Liu, H., & Thurow, K. (2023). Indoor positioning systems of mobile robots: A review. *Robotics*, 12(2), 47. <https://doi.org/10.3390/robotics12020047>
- López, J., Marcano, M., García, D., Pérez, J. F., & Zalama, E. (2020). Implementing autonomous driving behaviors using a message driven Petri net framework. *Sensors*, 20(2), 449. <https://doi.org/10.3390/s20020449>
- López, J., Santana-Alonso, A., & Díaz-Cacho Medina, M. (2019). Formal verification for task description languages: A Petri Net approach. *Sensors*, 19(22), 4965. <https://doi.org/10.3390/s19224965>
- Mota, F. A. X., Batista, J. G., & Alexandria, A. R. (2024). Proposal of simultaneous localization and mapping for mobile robots indoor environments using Petri nets and computer vision. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 135, 3991–4014.
- Murata, T. (1989). Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4), 541–580. <https://doi.org/10.1109/5.24143>
- Palacín, J., Rubies, E., Bitriá, R., & Clotet, E. (2023). Path planning of a mobile delivery robot operating in a multi-story building based on a predefined navigation tree. *Sensors*, 23(21), 8795. <https://doi.org/10.3390/s23218795>

- Panigrahi, P. K., & Bisoy, S. K. (2022). Localization strategies for autonomous mobile robots: A review. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 34(8), 6019–6039. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.02.015>
- Rondoni, C., di Luzio, F. S., Tamantini, C., Zollo, L., Cordella, F., & Bravi, M. (2024). Navigation benchmarking for autonomous mobile robots in hospital environment. *Scientific Reports*, 14, 18334. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69040-z>
- Su, Y., Qi, L., & Zhou, M. (2023). A backward algorithm to determine the existence of legal firing sequences in ordinary Petri Nets. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(6), 3190–3197.
- Tang, Y., Zakaria, M. A., & Younas, M. (2025). Path planning trends for autonomous mobile robot navigation: A review. *Sensors*, 25(4), 1206. <https://doi.org/10.3390/s25041206>