

PENJADWALAN JOB SHOP PADA SISTEM MANUFAKTUR BERKELANJUTAN: KAJIAN PUSTAKA

Vaniloran Elysa Andriani¹, Nur Indrianti²

^{1,2} Magister Teknik Industri

Jurusan Teknik Industri, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta,
Jalan Babarsari 2, Tambakbayan, Yogyakarta, 55281
email : shavaniloran@gmail.com ; n.indrianti@upnyk.ac.id

Abstrak

Akivitas industri manufaktur yang terus meningkat saat ini memberikan dampak bagi permasalahan lingkungan. Oleh karena itu, industri manufakur dituntut untuk menerapkan konsep sustainability. Di dalam konsep sustainability terdapat tiga indikator penting, yaitu aspek ekonomi, lingkungan dan sosial. Penerapan konsep sustainability di dalam industri, salah satunya dapat dilakukan pada aktivitas penjadwalan mesin. Artikel ini mengkaji model-model penjadwalan pada system manufaktur berkelanjutan, khususnya penjadwalan job shop, dengan mempertimbangkan ketiga kriteria sustainability. Hasil kajian menunjukkan bahwa model penjadwalan job shop yang memperhatikan aspek ekonomi dan lingkungan telah banyak dikembangkan. Kriteria yang sering digunakan adalah meminimalkan makespan dan konsumsi energi. Sedangkan penelitian tentang penjadwalan job shop berdasarkan aspek sosial masih terbatas dan belum ada yang membahas tentang kelelahan (fatigue) pekerja.

Kata kunci: sustainable manufacturing, penjadwalan, job shop, sustainability

1. PENDAHULUAN

Industri manufaktur memegang peranan penting bagi pertumbuhan ekonomi global. Tren populasi dunia yang terus meningkat menyebabkan permintaan meningkat pula. Aktivitas industri yang meningkat untuk memenuhi permintaan tersebut berdampak pada meningkatkan kesejahteraan masyarakat. Namun demikian, aktivitas industri memiliki dampak negatif terhadap lingkungan. Selain limbah yang dihasilkan, penggunaan energi di industri menyebabkan polusi dan menipisnya sumber daya tak terbarukan. Untuk mengatasi hal ini diperlukan pendekatan *sustainability* atau berkelanjutan.

Artikel ini adalah hasil kajian pustaka tentang model-model penjadwalan pada system manufaktur dengan memperhatikan konsep *sustainability* yang memiliki tiga pilar utama yaitu aspek ekonomi, lingkungan, dan sosial. Konsep *sustainable* di dalam sistem manufaktur meliputi aktivitas perencanaan produksi, penjadwalan produksi, dan *forward reverse supply chain* (Haapala et al., 2013). Penjadwalan produksi dengan kriteria *sustainable* akan meningkatkan level *sustainability* dalam sistem manufakturnya. Berdasarkan aliran prosesnya, penjadwalan dibagi menjadi dua jenis, yaitu penjadwalan *job shop* dan *flow shop*. Kajian pustaka dalam paper ini akan difokuskan pada penjadwalan pada system manufaktur *job shop* dan *flexible job shop* yang berkelanjutan.

2. PENJADWALAN *JOB SHOP* DENGAN KRITERIA *SUSTAINABILITY*

2.1 Penjadwalan Berdasarkan Aspek Ekonomi

Penjadwalan berdasarkan aspek ekonomi, meliputi indikator performasi keuangan, keandalan pengiriman, dan biaya manufaktur. Penelitian penjadwalan *job shop* berdasarkan aspek ekonomi telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya. Zang, et al (2012) menyelesaikan penjadwalan pada permasalahan *flexible job shop*, yaitu perluasan *penjadwalan job shop* dimana setiap pekerjaan/*job* dapat diselesaikan pada beberapa nomor mesin. Metode yang digunakan adalah model matematis *goal programming* dengan tujuan meminimalkan makespan dan konsumsi energi.

Liu, et al (2014) mengembangkan model optimasi penjadwalan *job shop* menggunakan *bi-objective problem* dengan algoritma NSGA-II dengan kriteria meminimalkan total konsumsi energi dan total keterlambatan tertimbang. Model penjadwalan dengan metode *linier programming* yang mempertimbangkan keterbatasan energi, konsumsi operasi, dan durasi konsumsi puncak diusulkan oleh Kemmoe, et al (2015). Sedangkan Liu, et al (2015) mengusulkan model penjadwalan matematis berdasarkan *non-dominated sorting genetic algorithm II* untuk meminimalkan emisi karbon dioksida dan makespan.

Di tahun 2016, Zhang dan Chiong mengembangkan *multi-objective genetic algorithm* untuk menyelesaikan kasus *bi-objective*. Tujuan penelitian ini adalah meminimalkan konsumsi energi dan makespan. Model ini mengasumsikan bahwa konsumsi energi sebuah mesin hanya terkait dengan kecepatan produksi padahal ada beberapa parameter permesinan penting yang memiliki pengaruh yang besar. Zhang, et al (2017) mengusulkan *two layers scheduling method* menggunakan *dynamic game theory*. Metode yang diusulkan diharapkan dapat meminimalkan makespan dan total beban kerja mesin serta konsumsi energi. *Dynamic game theory* didesain untuk meningkatkan efisiensi produksi dan mengurangi biaya pemrosesan.

Model penjadwalan produksi dan operasi pemeliharaan menggunakan kombinasi algoritma *simulated annealing* dan *genetic* diusulkan oleh Mokhtari dan Hasan (2017). Penjadwalan ini bertujuan untuk meminimalkan makespan dan biaya energi serta memaksimalkan total ketersediaan system. Sementara itu Piroozfard, et al (2018) mengembangkan model untuk menyelesaikan permasalahan *flexible job shop*. Model bersifat multi objektif dengan tujuan meminimalkan total jejak karbon dan total keterlambatan secara bersamaan. Permasalahan diformulasikan sebagai *multi-objective mixed integer programming model* dan diselesaikan menggunakan algoritma MOGA.

Pada industri jasa, pendekatan *sustainability* dengan mengadopsi penyelesaian permasalahan *job shop* telah dilakukan oleh Indriani & Suandevin (2020). Kriteria *sustainability* yang dibahas adalah aspek ekonomi berupa makespan. Metode yang digunakan adalah algoritma penjadwalan *non delay*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *priority rule* SPT memberikan hasil terbaik. Namun pada penelitian ini masih belum mempertimbangkan aspek lingkungan dan sosial terutama faktor kelelahan pekerja.

2.2 Penjadwalan Berdasarkan Aspek Lingkungan

Penjadwalan berdasarkan aspek lingkungan, meliputi indikator polusi dan emisi serta konsumsi sumber daya. Penelitian mengenai pengembangan metode operasional penjadwalan mesin untuk mengurangi dan mengoptimalkan konsumsi

energi dilakukan oleh Mouzon, et al. Metodologi ini didasarkan pada kesadaran bahwa sejumlah besar energi dikonsumsi oleh mesin *non-bottleneck* saat mereka menganggur. Hasil penelitian Mouzon, et al (2007) sebagai berikut:

- Ketika produksi ditunda, konsumsi energi bisa berkurang.
- Jika mesin tidak mengalami *bottleneck*, yaitu tingkat pemanfaatan mesin tidak tinggi dan mesin tidak selalu memproses pekerjaan, maka *dispatching rule* yang diusulkan berpotensi mengurangi penggunaan energi secara signifikan.
- Jika waktu antar kedatangan hingga pekerjaan berikutnya lebih lama dari durasi impas, operasi *switching off/on* hingga kedatangan berikutnya akan memberikan penghematan yang signifikan dalam konsumsi energi.

Selanjutnya, penelitian mengenai mekanisme hemat energi dimana mesin dapat dimatikan dan dinyalakan kembali jika waktu *idle* mesin cukup lama juga dilakukan oleh Li, et al (2011). Terdapat enam peralatan mesin dengan proses manufaktur yang berbeda yang diperhatikan dalam penelitian ini. Dari hasil percobaan ini, disimpulkan bahwa indikator uang dapat digunakan untuk mengevaluasi kesiapan dan ketersediaan mesin adalah: kekuatan puncak (kebutuhan daya maksimum selama periode *start-up*), durasi waktu *start-up* hingga semua komponen diaktifkan, konsumsi energi untuk *start up*, daya tetap (konsumsi energi selama proses), durasi mesin dimatikan hingga semua komponen dinonaktifkan, dan konsumsi energi untuk mematikan.

Pada penelitian May, et al (2015) dikembangkan kebijakan yang berbeda untuk mengontrol perilaku komponen mesin pada sistem penjadwalan *job shop*. Penelitian ini mengembangkan algoritma genetika yang mampu mencapai makespan semi-optimal dan konsumsi energi yang lebih rendah. Berikut kebijakan May et al., (2015) untuk memutuskan perilaku yang harus dipilih kaitannya dengan meminimalkan konsumsi energi:

- Mesin harus dimatikan dan dihidupkan jika:

$$P_{on-off} \cdot t_{on-off} < P_{idle} \cdot t_{idle} \quad (1)$$

$$P_{on-off} \cdot t_{on-off} < P_{standby-idle} \cdot t_{standby-idle} + P_{standby} \cdot t_{standby} \quad (2)$$

- Mesin harus dalam keadaan *standby* jika:

$$P_{standby-idle} \cdot t_{standby-idle} + P_{standby} \cdot t_{standby} < P_{on-off} \cdot t_{on-off} \quad (3)$$

$$P_{standby-idle} \cdot t_{standby-idle} + P_{standby} \cdot t_{standby} < P_{idle} \cdot t_{idle} \quad (4)$$

- Mesin harus tetap *idle* jika:

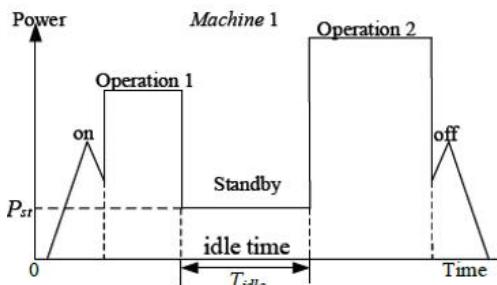
$$P_{idle} \cdot t_{idle} < P_{on-off} \cdot t_{on-off} \quad (5)$$

$$P_{idle} \cdot t_{idle} < P_{standby-idle} \cdot t_{standby-idle} + P_{standby} \cdot t_{standby} \quad (6)$$

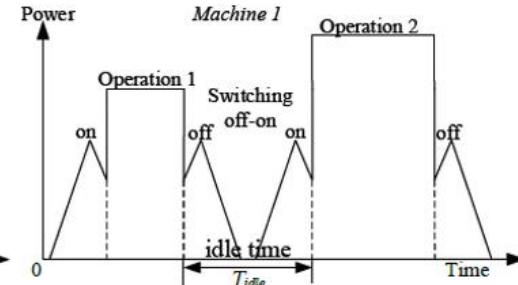
Dimana: P_{idle} adalah daya yang dibutuhkan pada status *idle* (kW); t_{idle} adalah waktu dalam status *idle* (s); P_{on-off} adalah daya yang dibutuhkan untuk *switching off/on* (kW); t_{on-off} adalah waktu dalam status *switching off/on* (s); $P_{standby-idle}$ adalah daya yang dibutuhkan untuk mengalihkan mesin antara kondisi *standby* dan *idle* (kW); $t_{standby-idle}$ adalah waktu yang dibutuhkan untuk mengalihkan kondisi mesin antara *standby* dan *idle* (s); $P_{standby}$ adalah daya yang dibutuhkan dalam status *standby* (kW); $t_{standby}$ adalah waktu dalam status *standby*.

Pada kasus penjadwalan *flexible job shop*, mesin tidak dapat menghindari keadaan *idle* selama proses produksi. Selama waktu *idle*, mesin juga akan mengkonsumsi energi. Oleh karena itu, Liu, et al (2019) melakukan penelitian ini dengan mengadopsi mekanisme mematikan mesin secara efektif sehingga dapat

mengurangi konsumsi energi dan makespan dalam produksi. Model yang dikembangkan menggunakan *mixed integer programming* dengan *improved genetic algorithm* dan NSGA-II serta *tabu search*. Gambar 1 dan 2 menunjukkan kurva daya mesin sewaktu *idle* berdasarkan penelitian (Q. Liu et al., 2019).



Gambar 1 Mode *standby* selama waktu *idle*
 (Sumber: Q. Liu, et al.,2019)



Gambar 2 Mode *switching off/on* selama waktu *idle*
 (Sumber: Q. Liu, et al.,2019)

Keputusan dalam menjalankan mode *standby* atau *switching off/on* tergantung dari konsumsi dari masing-masing mode ini. Jika daya mesin *standby* adalah P_{st} dan lamanya waktu *idle* adalah T_{idle} . Maka, konsumsi energi pada mesin 1 saat waktu *idle* adalah $P_{st} \cdot T_{idle}$. Pada Gambar 2, menunjukkan bahwa konsumsi energi saat *switch off* menurun dan mulai naik saat *switch on*. Konsumsi energi saat *switching off/on* dilambangkan dengan E_{off-on} . Jadi, ketika konsumsi energi *standby* lebih besar daripada konsumsi energi *switching*, maka mesin lebih memilih melakukan operasi *switch off* dan sebaliknya. Kondisi ini dapat dituliskan dengan persamaan berikut:

$$P_{st} \cdot T_{idle} > E_{off-on} \quad (7)$$

$$T_{idle} > \frac{E_{off-on}}{P_{st}} \quad (8)$$

2.3 Penjadwalan Berdasarkan Aspek Sosial

Penjadwalan berdasarkan aspek sosial, meliputi indikator masyarakat, konsumen, dan pekerja. Aspek sosial yang merupakan salah satu pilar *sustainability* baru dipertimbangkan pada penelitian Yin, et al (2016). Aspek sosial yang digunakan adalah tingkat kebisingan pada mesin spindel. Masalah diformulasikan sebagai *new low-carbon mathematical scheduling model* dengan tujuan meminimasi makespan, total konsumsi energi, dan tingkat kebisingan. Aspek sosial dalam penjadwalan juga dipertimbangkan oleh Zhu, et al (2020) dalam meneliti pengaruh *learning* pekerja terhadap waktu pemrosesan (makespan) dan konsumsi energi. Dalam penelitian ini algoritma memetika dikembangkan untuk menyelesaikan permasalahan dengan tujuan meminimalkan makespan, total emisi karbon (CE) dan total biaya pekerja.

3. KESIMPULAN

Hasil kajian pustaka menunjukkan bahwa penelitian mengenai penjadwalan *job shop* dengan memperhatikan aspek sosial masih terbatas dan belum ada yang memperhatikan faktor kelelahan. Pekerja yang merasa kelelahan akan meningkatkan probabilitas produk catat. Oleh karena itu, penting melibatkan faktor kelelahan pekerja dalam penjadwalan manufaktur berkelanjutan.

Daftar Pustaka

1. Akbar, M., & Irohara, T. (2018). Scheduling for sustainable manufacturing : A review. *Journal of Cleaner Production*, 205, 866–883. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.100>
2. El Mouayni, I., Etienne, A., Lux, A., Siadat, A., & Dantan, J. Y. (2020). A simulation-based approach for time allowances assessment during production system design with consideration of worker's fatigue, learning and reliability. *Computers and Industrial Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.024>
3. Givi, Z. S., Jaber, M. Y., & Neumann, W. P. (2015). Modelling worker reliability with learning and fatigue. *Applied Mathematical Modelling*. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.03.038>
4. Haapala, K. R., Zhao, F., Camelio, J., Sutherland, J. W., Skerlos, S. J., Dornfeld, D. A., Jawahir, I. S., Clarens, A. F., & Rickli, J. L. (2013). A review of engineering research in sustainable manufacturing. In *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*. <https://doi.org/10.1115/1.4024040>
5. Indrianti, N., & Suandevin, V. (2020). Determination of Order Delivery Time in Event Organizer Industry Using a Non-Delay Scheduling Approach. *International Journal of Service Management and Sustainability*, 5, 1. <https://doi.org/10.24191/ijssms.v5i1.9868>
6. Jaber, M. Y., Givi, Z. S., & Neumann, W. P. (2013). Incorporating human fatigue and recovery into the learning-forgetting process. *Applied Mathematical Modelling*. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.02.028>
7. Jaber, M. Y., & Neumann, W. P. (2010). Modelling worker fatigue and recovery in dual-resource constrained systems. *Computers and Industrial Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.03.001>
8. Kemmoé, S., Lamy, D., & Tchernev, N. (2015). A job-shop with an energy threshold issue considering operations with consumption peaks. *IFAC-PapersOnLine*, 28(3), 788–793. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.179>
9. Li, W., Zein, A., Kara, S., & Herrmann, C. (2011). Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, 268–273. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-19692-8>
10. Liu, C., Dang, F., Li, W., Lian, J., Evans, S., & Yin, Y. (2015). Production planning of multi-stage multi-option seru production systems with sustainable measures. *Journal of Cleaner Production*, 105, 285–299. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.033>
11. Liu, Q., Pan, Q. K., Gao, L., & Li, X. (2019). Multi-objective flexible job shop scheduling problem considering machine switching off-on operation. *Procedia Manufacturing*, 39(2019), 1167–1176. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.353>
12. Liu, Y., Dong, H., Lohse, N., Petrovic, S., & Gindy, N. (2014). An investigation into minimising total energy consumption and total weighted tardiness in job shops. *Journal of Cleaner Production*, 65, 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.060>
13. Lu, T., Gupta, A., Jayal, A. D., Badurdeen, F., Feng, S. C., Dillon, O. W., & Jawahir, I. S. (2011). Advances in Sustainable Manufacturing. *Advances in Sustainable Manufacturing*, March 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-642->

20183-7

14. May, G., Stahl, B., Taisch, M., & Prabhu, V. (2015). Multi-objective genetic algorithm for energy-efficient job shop scheduling. *International Journal of Production Research*, 53(23), 7071–7089. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1005248>
15. Mokhtari, H., & Hasani, A. (2017). An energy-efficient multi-objective optimization for flexible job-shop scheduling problem. *Computers and Chemical Engineering*, 104, 339–352. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.05.004>
16. Mouayni, I. El, Demesure, G., Haouzi, H. B. El, Charpentier, P., & Siadat, A. (2019). Jobs scheduling within Industry 4.0 with consideration of worker's fatigue and reliability using Greedy Randomized Adaptive Search Procedure. *IFAC-PapersOnLine*, 52(19), 85–90. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.114>
17. Mouzon, G., Yildirim, M. B., & Twomey, J. (2007). Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment. *International Journal of Production Research*, 45(18–19), 4247–4271. <https://doi.org/10.1080/00207540701450013>
18. Piroozfard, H., Wong, K. Y., & Wong, W. P. (2018). Minimizing total carbon footprint and total late work criterion in flexible job shop scheduling by using an improved multi-objective genetic algorithm. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 267–283. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.001>
19. Yin, L., Li, X., Gao, L., Lu, C., & Zhang, Z. (2016). Sustainable Computing : Informatics and Systems. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2016.11.002>
20. Zhang, L., Li, X., Gao, L., Zhang, G., & Wen, X. (2012). Dynamic scheduling model in FMS by considering energy consumption and schedule efficiency. *Proceedings of the 2012 IEEE 16th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, CSCWD 2012*. <https://doi.org/10.1109/CSCWD.2012.6221898>
21. Zhang, R., & Chiong, R. (2016). Solving the energy-efficient job shop scheduling problem: A multi-objective genetic algorithm with enhanced local search for minimizing the total weighted tardiness and total energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3361–3375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.097>
22. Zhang, Y., Wang, J., & Liu, Y. (2017). Game theory based real-time multi-objective flexible job shop scheduling considering environmental impact. *Journal of Cleaner Production*, 167, 665–679. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.068>
23. Zhu, H., Deng, Q., Zhang, L., Hu, X., & Lin, W. (2020). Low carbon flexible job shop scheduling problem considering worker learning using a memetic algorithm. *Optimization and Engineering*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s11081-020-09494-y>