

Kajian Teoritik Efisiensi Sistem Hidrolik Pada Alat Berat

Muhammad Rifqy¹, Prima Fatur Alfianto², Yudi Kurniawan^{3*}

¹Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Balikpapan

Jl. Soekarno Hatta No.KM. 8, Kel. Batu Ampar, Kec. Balikpapan Utara, Kota Balikpapan, Kalimantan Timur 76129

*E-mail: yudi.kurniawan@poltekba.ac.id

Abstrak

Sistem hidrolik merupakan sistem vital dalam operasional alat berat, terutama digunakan dalam mendukung pergerakan dan pengangkatan beban yang membutuhkan tenaga besar dan presisi tinggi. Efisiensi kinerja sistem hidrolik pada alat berat dianalisis dalam kajian teoritis ini berdasarkan prinsip dasar mekanika fluida. Fokus utama kajian diarahkan pada faktor-faktor yang memengaruhi efisiensi sistem seperti kehilangan tekanan (*pressure drop*), kebocoran fluida, laju aliran (*flow rate*), kualitas oli hidrolik, serta performa dari komponen pendukung pada sistem hidrolik. Selain itu, kajian teoritis digunakan sebagai dasar untuk memodelkan prinsip kerja dari sistem hidrolik. Dari hasil studi ditemukan bahwa efisiensi sistem hidrolik sangat dipengaruhi oleh perawatan berkala, kualitas fluida, dan pengaturan aliran fluida yang optimal. Pendekatan pemeliharaan prediktif dengan memanfaatkan *machine learning*, sensor direkomendasikan dalam kajian ini untuk meningkatkan efisiensi dan umur pakai sistem hidrolik. Karya ilmiah yang dihasilkan diharapkan dapat dijadikan sebagai acuan dalam pengembangan pada sistem hidrolik yang lebih efisien dan ramah energi di masa mendatang.

Kata kunci: Alat Berat, Efisiensi, *Machine Learning*, Sistem Hidrolik

1. Pendahuluan

Sistem hidrolik merupakan suatu komponen penggerak yang mengacu pada fluida hidrolik. Sistem hidrolik banyak digunakan pada unit unit alat berat, seperti *excavator* [1]. Sistem hidrolik pada alat berat menggunakan prinsip hukum pascal, memanfaatkan energi fluida bertekanan untuk diteruskan ke segala arah dalam ruang tertutup [2]. Prinsip hukum pascal digunakan sebagai dasar kerja dalam sistem hidrolik pada alat berat, dimana tekanan yang diberikan pada suatu fluida dalam ruang tertutup akan diteruskan ke segala arah dengan sama besar [2]. Sistem hidrolik memanfaatkan cairan bertekanan untuk menggerakkan suatu mekanisme [3]. Sistem hidrolik sangat mengandalkan tekanan atau *pressure*[4], sehingga komponen pendukung dan pengontrol aliran pada sistem hidrolik pada alat berat seperti tanki hidrolik, pompa hidrolik, filter oli hidrolik, *control valve*, *relief valve* dan aktuator sangat mempengaruhi keseluruhan kinerja dan efisiensi dari sistem[5].

Variabel yang sangat mempengaruhi performa dan efisiensi dari sistem adalah *pressure*, *flow rate*, *viscosity*, terutama kontaminasi[6]. Faktor yang sangat mempengaruhi performa dari sistem hidrolik adalah kontaminasi [7]. Selain itu, kegagalan sistem sering sekali disebabkan oleh komponen seperti *relief valve*, *hydraulics pump*, dan *control valve*. Kegagalan ini bisa saja terjadi karena umur komponen [8] Komponen itu sendiri tidak sesuai standar spesifikasi dan karena kontaminasi oli hidrolik [9]. Seperti yang sudah diteliti oleh Halim [9], mengenai pengujian *relief valve pressure* dan *cycle time* dari *valve*.

Pengujian serupa dilakukan oleh Aji [10], menguji tekanan pada komponen *swing hydraulic* pada mini *excavator* yang menunjukkan hubungan *pressure* pada sistem dan efisiensi kerja pada sistem hidrolik. Penelitian lain yang dilakukan oleh Darmawi dan Darsan [11] pada *wheel loader caterpillar 950*, penelitian tersebut menyatakan adanya *delay* pada operasi *cylinder lift* karena kontaminasi oli, yang menyebabkan penurunan performa dan efisiensi sistem.

Kegagalan sistem hidrolik yang diakibatkan oleh kegagalan komponen dan kontaminasi oli merupakan kekurangan dari sistem hidrolik[12], oleh karena itu perlu optimasi sistem dengan mengikuti standar perawatan berkala yang

tersedia[13], *monitoring* temperatur dan tekanan sistem juga penting karena mempengaruhi kekentalan oli dan penggunaan sensor untuk mendeteksi keausan pada sistem[14]. Penggunaan teknologi modern berbasis sensor terbukti meningkatkan efisiensi pada alat berat [15]. Penelitian yang dilakukan oleh [16] terfokus pada desain aktuator hidrolik yang menunjukkan bagaimana respons aktuator terhadap variasi tekanan dan beban kerja. Pendekatan *machine-learning* terhadap aktuator meningkatkan pembacaan tekanan secara *real-time*.

Pendekatan menggunakan *machine-learning* yang memantau sistem hidrolik berbasis sensor sangat berpengaruh pada kinerja dan efisiensi sistem[17], karena metode berbasis data yang saat ini digunakan untuk memprediksi kerusakan pada sistem hidrolik masih belum memadai karena menghasilkan prediksi yang kurang akurat. Terdapat dua model *machine learning* yang digunakan, *random forest* (RF) dan *categorical boost* (*Catboost*) untuk memprediksi kebutuhan *maintenance* pada sistem hidrolik dan hasil model dievaluasi menggunakan berbagai metrik, seperti kepresisian, sensitivitas, F1-Score, dan keakuratan. Model RF berhasil dalam memprediksi kegagalan *attachment* sistem hidrolik secara akurat sebelum terjadinya kerusakan total pada sistem. Perlu adanya kajian lebih lanjut terkait teknologi terbaru *machine-learning* yang dapat meningkatkan kinerja dari sistem hidrolik [18].

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan metode *literature review* dengan metode:

2.1 Pengambilan Data

Dalam pemilihan data, tentu saja data yang diperoleh harus relevan. Metode pemilihan data ditunjukkan pada Tabel 1, sehingga data yang diperoleh relevan.

Tabel 1. Metode pemilihan data

Database	Google scholar, research gate, arxiv
Tipe artikel	Karya ilmiah yang sudah ditinjau oleh para ahli
Kata kunci	Alat berat, Efisiensi, <i>Machine learning</i> , Sistem hidrolik
Tahun jurnal	Dari tahun 2020 - 2025
Pemilihan jurnal	Jurnal yang dipilih berkaitan dengan alat berat, berkaitan dengan efisiensi sistem hidrolik

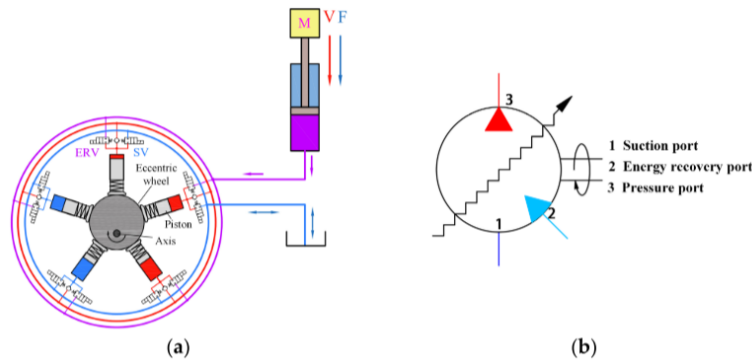
2.2 Efisiensi Sistem Hidrolik Pada *Excavator*

Pemulihan energi potensial pada *excavator* hidrolik sangat membantu meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi emisi udara, namun solusi untuk pemulihan energi potensial memerlukan lebih banyak proses konversi energi sebelum bisa dipulihkan, dan menambah kompleksitas serta mahal.

3. Hasil dan pembahasan

3.1 Model Pompa Digital

Sistem hidrolik konvensional yang masih menggunakan *flow control valve* tidak dapat menggunakan kembali energi potensial dan bisa menyebabkan kehilangan tekanan akibat *throttling* oleh karena itu Yue [19] melakukan penelitian yang meningkatkan kinerja sistem hidrolik. Penelitian tersebut, mengenalkan sistem hidrolik *hybrid* pompa digital yang mampu memulihkan energi potensial serta menggunakan kembali energi secara langsung pada *excavator*.



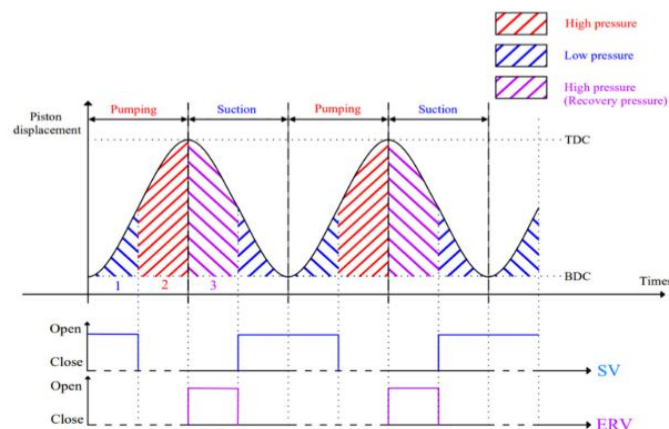
Gambar 1a dan 1b. Struktur Dan Cara Kerja Skematik Diagram dan Simbol Dari Pompa Digital

Dengan pemanfaatan pompa digital ini dapat meningkatkan efisiensi, mengurangi kehilangan tekanan (*pressure loss*), dan menyederhanakan desain sistem hidrolik yang masih menggunakan *directional* dan *flow control valve*. Komponen utama yang digunakan dalam menyederhanakan desain sistem hidrolik adalah: pompa digital yang dikontrol secara elektronik, *bidirectional valve*, dan akumulator.

3.1.1 Struktur Pompa Digital dan Cara Kerjanya

Gambar 1a. Menunjukkan skematik dari pompa digital dengan 5 piston, pompa dilengkapi dengan *eccentric wheel*, *flow distribution valve group*. Setiap *piston* dilengkapi dengan *suction valve* (SV), *energi recovery valve* (ERV), dan *check valve* sesuai pada Gambar 1b.

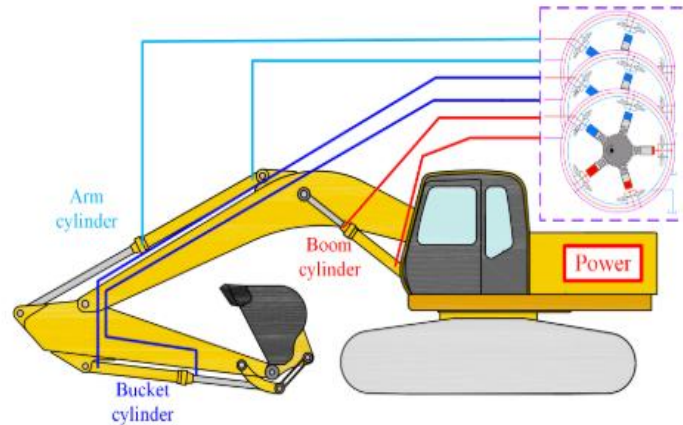
Timing diagram dan *variable displacement* pompa digital ditunjukkan pada Gambar 2. Setiap fase menunjukkan pergerakan sinusoidal pada pompa digital, durasi dibukanya *suction valve* diatur, sehingga dapat mengalir bebas ke *sealed volume chamber* dan tanki melalui *suction port*. Dengan membuka *energy recovery valve* pada *suction stroke*, fluida bertekanan akan mengalir dari *energy recovery valve* menuju ke *piston chamber*, *piston* akan terdorong karena tekanan tinggi dan membantu *eccentric wheel* untuk berputar yang akan memanfaatkan *suction stroke* pompa dan berfungsi layaknya motor digital.



Gambar 2. Diagram *Timing* dari Pompa Digital

3.1.2 Struktur dan Cara Kerja ERDS (*Energy Recovery Direct Reuse System*)

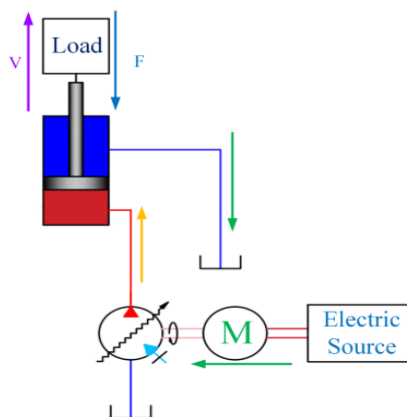
Dengan adanya akumulator hidrolik pemulihan energi pada pompa digital seperti yang sudah dijelaskan diatas, diaplikasikan pada *excavator hybrid* untuk menerapkan sistem dari ERD. Struktur dan cara kerja dari sistem akan dijelaskan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram dari Sistem ERDS

a. Pumping Mode Operation (PM)

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. diagram dan cara kerja ketika pompa digital digunakan untuk menggerakkan *cylinder boom*. Motor akan mengubah energi listrik menjadi mekanik untuk memutar pompa digital. Setelah pompa digital berputar, fluida yang ada di tanki akan dialirkan ke *head end cylinder boom*. Fluida yang ada pada *rod end* akan kembali ke tanki melalui *low pressure line*. ERV pada pompa digital ditutup sehingga sistem pemulihan energi tidak difungsikan. ERDS dikontrol oleh pompa pada mode ini, dengan mengatur kecepatan aliran dengan mengatur *output displacement coefficient* (ODC) pompa maka regulasi aliran aktuator akan tercapai. Sistem ini dapat mencapai keefisienan yang lebih tinggi karena digantinya pompa hidrolik dengan pompa digital.

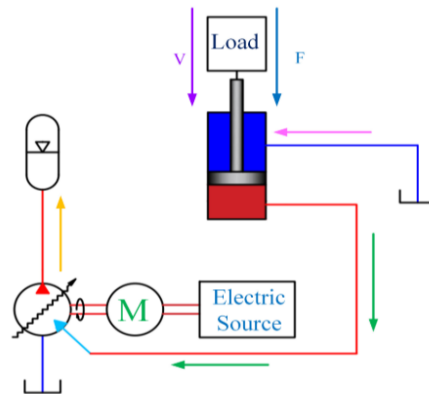


Gambar 4. Operasi dari Pumping Mode

b. Energy Recovery Mode

Cara kerja dari ERM (*energy recovery mode*) didemonstrasikan pada Gambar 5. dengan skematik dan cara kerja ERDS pada mode ERM. Pada saat silinder boom diturunkan, sistem pemulihan energi pada pompa digital diaktifkan. Fluida yang kembali akan di pompa menuju akumulator untuk melalui *pressure port* untuk disimpan. Mengubah potensial energi silinder boom menjadi energi fluida bertekanan pada akumulator. Dari proses diatas maka pemulihan energi tercapai, walaupun pompa digital memakai energi akan tetapi energi yang dipakai oleh pompa tidak sebanding dengan energi yang di pulihkan. Dengan syarat, pemakaian energi bisa diturunkan dengan mengoptimalkan struktur dan keakurasian dari pompa digital. Pada saat silinder boom diturunkan, kecepatan turun dari silinder dapat diatur dengan mengubah *energy recovery coefficient* (ERC). Volume fluida yang dipulihkan diatur secara proporsional tergantung dari ERM valve. Untuk

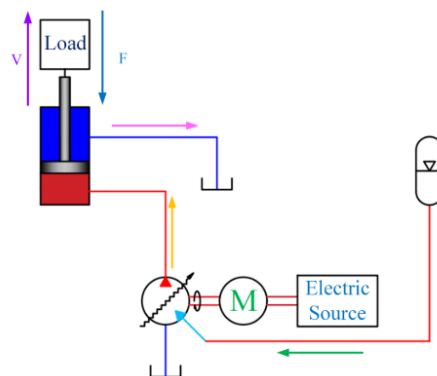
mencapai pemulihan energi secara maximum dan meminimalisir penggunaan energi listrik pada sistem, diperlukan keseimbangan antara ERC dan ODC pada pompa digital pada saat mengisi akumulator.



Gambar 5. *Energy Recovery Mode*

c. *Direct Reuse Mode Operation (DRM)*

Gambar *schematic* ERDS pada mode *direct reuse* menunjukkan penggunaan energi yang dipulihkan pada Gambar 6. ketika *cylinder boom* dinaikan, sistem akan masuk ke mode DRM dan fluida yang tersimpan pada akumulator masuk ke pompa digital. Pada mode ini motor dan akumulator membantu pompa digital untuk menyuplai fluida ke *head end cylinder boom*, maka konversi energi dari energi hidrolik dan elektrik diubah kembali menjadi energi potensial pada aktuator. Energi yang tersimpan pada akumulator menjadi kontributor utama dalam memutar pompa digital sedangkan motor hanya sebagai pembantu. Apabila ERC dan ODC sesuai, tenaga akumulator dalam mengeluarkan fluida akan seimbang dengan tenaga untuk menggerakkan aktuator. Motor hanya menyediakan energi yang digunakan oleh pompa digital dan menjaga putaran pompa digital tetap konstan. Apabila energi yang dipulihkan oleh akumulator tidak tercukupi maka motor yang akan mengisi dari konsumsi energi motor itu sendiri.



Gambar 6. *Direct Reuse Mode*

Penelitian serupa juga dilakukan oleh Zhang [20] membahas tentang pemulihan potensial energi menggunakan sistem EHDR (*Elektro Hydraulic Drive*) pada *cylinder excavator* elektrik, menggunakan baterai dan akumulator.

4. Kesimpulan

Sistem hidrolik pada excavator memiliki peran yang sangat penting dalam menentukan kinerja dan efisiensi alat berat, namun masih memiliki kelemahan utama berupa kehilangan energi dan penurunan performa akibat throttling, kontaminasi oli, serta kegagalan komponen. Penerapan teknologi pompa digital dengan sistem Energy Recovery Direct Reuse System (ERDS) terbukti mampu meningkatkan efisiensi energi dengan memulihkan energi potensial yang sebelumnya terbuang

dan memanfaatkannya kembali secara langsung melalui mode energy recovery dan direct reuse. Selain itu, integrasi pengendalian elektronik dan pendekatan berbasis sensor serta machine learning memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan keandalan, akurasi pemantauan kondisi sistem, serta prediksi kebutuhan perawatan. Dengan demikian, pengembangan sistem hidrolik modern yang mengombinasikan pemulihan energi, desain komponen yang lebih efisien, dan teknologi cerdas berbasis data merupakan solusi yang menjanjikan untuk meningkatkan efisiensi, mengurangi konsumsi energi, serta memperpanjang umur sistem hidrolik pada excavator.

Ucapan terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing, rekan sejawat, serta semua pihak yang telah memberikan bimbingan, masukan, dan dukungan dalam penyusunan karya ilmiah ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Balikpapan yang memfasilitasi dalam penyusunan kajian karya ilmiah ini hingga dapat terselesaikan dengan baik.

Kajian ini menunjukkan bahwa efisiensi sistem hidrolik pada alat berat sangat dipengaruhi oleh kualitas fluida, kondisi komponen, serta desain sistem yang digunakan. Penerapan pompa digital *hybrid* dengan sistem *Energy Recovery Direct Reuse System* (ERDS) mampu meningkatkan efisiensi energi, mengurangi kehilangan tekanan, serta memanfaatkan kembali energi potensial yang sebelumnya terbuang. Dengan dukungan pemeliharaan prediktif berbasis sensor dan machine learning, sistem hidrolik dapat dioptimalkan untuk mencapai kinerja yang lebih efisien, ramah energi, dan berkelanjutan.

Daftar Pustaka

- [1] Azat Zatmika, "Sistem hidrolik pada alat berat."
- [2] Y. Bahadur Wirawan *et al.*, "Analisa kerusakan *hydraulic pump* tipe *rotary vane* pada *deck crane type mitsubishi 30.5T X 26M (R) HDC*," *Jurnal JUTEI*, vol. 5, no. 1, pp. 110–121, [Online]. Available: <https://jurnal.ugp.ac.id/index.php/JURTIE>
- [3] N. Y. Jasim, M. Fathalilou, and L. J. Habeeb, "*Theoretical study on the hydraulic system performance at different operational conditions.*" [Online]. Available: <https://ssrn.com/abstract=5146544>
- [4] E. Syahputra, W. Prabudi, B. Maqdis, and F. Suhada, "Penggunaan sistem hidrolik untuk meningkatkan efisiensi energi dan performa operasional," *Jurnal Mekanova : Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol. 10, no. 2, pp. 1–5, 2024.
- [5] M. Akbar and D. Supryatna, "Studi literature sistem hidrolik pada mesin industri," vol. 2, no. 12, pp. 86–96, 2024, [Online]. Available: <https://ejournal.warunayama.org/kohehi>
- [6] S. B. Kumar, M. S. Hossem, and A. Sayed, "*A comprehensive review of hydraulic systems in aerospace and construction engineering,*" *Control Systems and Optimization Letters*, vol. 2, no. 3, pp. 266–273, Nov. 2024, doi: 10.59247/csol.v2i3.127.
- [7] N. Novak, A. Trajkovski, M. Kalin, and F. Majdič, "*Degradation of hydraulic system due to wear particles or medium test dust,*" *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 13, Jul. 2023, doi: 10.3390/app13137777.
- [8] A. Jannifar, "Analisa partikel kontaminasi minyak hidrolik *excavator hitachi* pengusaha galian c di aceh utara," 2016.
- [9] A. Halim, M. Fadli, and M. Mangkona, "Kinerja sistem hidrolik pada unit *excavator 320D2 caterpillar*," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 15, no. 2, pp. 1165–1174, Aug. 2024, doi: 10.21776/jrm.v15i2.1756.

- [10] A. P. Aji, I. Felixtianus Eko, and W. Winarto, "Pembuatan komponen *swing* hidrolik pada alat peraga mini *Excavator*," 2023. [Online]. Available: <http://etd.repository.ugm.ac.id/>
- [11] faizar khur Darmawi and herri Darsan, "Analisa kerusakan dan perbaikan *hydraulic lift cylinder* pada *wheel loader caterpillar 950*," Oct. 2022.
- [12] A. Taheri, R. Pettersson, P. Gustafsson, J. Pajarinen, and R. Ghabcheloo, "Towards energy efficient control for commercial heavy-duty mobile cranes: modeling hydraulic pressures using machine learning," Jul. 2023, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2307.16681>
- [13] Joniken Lesmana and Zhakendry Zhakendry, "Analisa pengaruh kontaminasi oli dalam sirkulasi oli *hydraulic power unit* pada *train loading station* (TLS 101) di Tambang Air Laya Tanjung Enim," *Jurnal Ilmiah Teknik dan Sains*, vol. 2, no. 3, pp. 157–162, Apr. 2025, doi: 10.62278/jits.v2i3.59.
- [14] "Analisa kerusakan dan perbaikan *hydraulic lift cylinder* pada *wheel loader caterpillar 950*".
- [15] E. Syahputra, W. Prabudi, B. Maqdis, and F. Suhada, "Penggunaan sistem hidrolik untuk meningkatkan efisiensi energi dan performa operasional," *Jurnal Mekanova : Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol. 10, no. 2, pp. 1–5, 2024.
- [16] Z. Nisar and H. Munawar, "System identification and controller design for hydraulic actuator," Aug. 2021, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2108.11756>
- [17] D. A. Duque-Sarmiento and D. A. Baño-Morales, "Assessment of hydraulic oil properties during operation of a mini loader," *Lubricants*, vol. 12, no. 9, Sep. 2024, doi: 10.3390/lubricants12090320.
- [18] A. Al-Khulaqi, N. Palanichamy, S. Cheng Haw, and C. Raja, "Evaluating machine learning and deep learning algorithms for predictive maintenance of hydraulic systems," vol. 15, no. 1, 2025.
- [19] D. Yue, H. Gao, Z. Liu, L. Wei, Y. Liu, and X. Zuo, "Potential energy recovery and direct reuse system of hydraulic hybrid excavators based on the digital pump," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 13, Jul. 2023, doi: 10.3390/en16135229.
- [20] L. Li, T. Zhang, K. Wu, L. Lu, L. Lin, and H. Xu, "Design and research on electro-hydraulic drive and energy recovery system of the electric excavator boom," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 13, Jul. 2022, doi: 10.3390/en15134757.