SYSTEMATIC REVIEW OF HYDRAULIC RAM PUMP OPTIMIZATION: AIR CHAMBER VOLUME, DRIVE PIPE RATIO, AND VALVE DESIGN FOR SUSTAINABLE IRRIGATION

Dwi Purnomo[1*], Dela Indah Setiarini[2], Lestari Putri Ramadhani[3], Kasimirus Kemara Herin[4], Oktaviana Kewa Solot[5], Gregorius Alva Ukarno[6]

[1,2,3,4,5,6]*Politeknik Pembangunan Pertanian Malang*
E-mail : sdelaindah@gmail.com

ABSTRACT

Global water scarcity is a major challenge to agricultural sustainability, particularly in rural areas that rely on simple irrigation. Hydraulic ram pumps have emerged as an energy-efficient and environmentally friendly technology, but research on their design optimization remains fragmented. There is a literature gap regarding the integration of air chamber volume/position, pipe length-to-diameter ratio, and valve design within a single analytical framework. Therefore, this systematic review is crucial for formulating evidence-based optimization strategies for improving hydraulic ram efficiency. This study aims to analyze the effects of air chamber volume and position on efficiency, flow rate, and pressure; evaluate the performance of hydraulic ram pumps in real-world applications on smallholder farms; and identify the most effective optimization strategies to improve system stability and efficiency. The study used a Systematic Literature Review (SLR) approach in accordance with PRISMA guidelines. Literature was searched in Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, IEEE Xplore, and DOAJ using keywords related to hydraulic rams. Inclusion criteria included empirical articles in English published between 2015 and 2025 that discussed technical parameters. Selection was conducted through screening of titles, abstracts, and full-text. Quality assessment used MMAT 2018, while data analysis was conducted using thematic-based Nvivo 14. Over 40 relevant studies were analyzed. Findings indicate that a larger air chamber volume improves flow continuity while reducing peak pressure, with an optimum efficiency reaching 79%. Chamber position (PCH height, WVH, HD) significantly affects flow rate. In field applications, efficiency ranged from 30–62%, lower than in the laboratory but still reliable for irrigation and rural domestic needs. The most effective optimization strategies included exhaust valve design and air tube arrangement, complemented by the L/D ratio of the pipe and diffuser. This SLR confirms that the success of a hydram depends on the combination of valve design, chamber volume/position, and pipe configuration. The findings provide a technical basis for the adoption of hydram pumps in sustainable irrigation programs, while also opening new research directions that integrate technical and social aspects.

Keywords : *Hydram Pump, Air Chamber, Efficiency, Design Optimization, Sustainable Irrigation*

ABSTRAK

Kelangkaan air global menjadi tantangan utama bagi keberlanjutan pertanian, khususnya di pedesaan yang bergantung pada irigasi sederhana. Pompa hidram muncul sebagai teknologi tepat guna yang hemat energi dan ramah lingkungan, namun penelitian tentang optimasi desainnya masih terfragmentasi. Terdapat kesenjangan literatur mengenai integrasi volume/posisi ruang udara, rasio panjang–diameter pipa, serta desain katup dalam satu kerangka analisis. Oleh karena itu, tinjauan sistematis ini penting untuk merumuskan strategi optimasi berbasis bukti bagi peningkatan efisiensi hidram. Kajian ini bertujuan menganalisis pengaruh volume dan posisi ruang udara terhadap efisiensi, debit, dan tekanan; mengevaluasi kinerja pompa hidram pada aplikasi nyata di lahan pertanian kecil; serta mengidentifikasi strategi optimasi paling efektif guna meningkatkan stabilitas dan efisiensi sistem. Penelitian menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) sesuai pedoman PRISMA. Literatur dicari pada Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, IEEE Xplore, serta DOAJ dengan kata kunci terkait *hydraulic ram*. Kriteria inklusi mencakup artikel empiris 2015–2025 berbahasa Inggris yang membahas parameter teknis. Seleksi dilakukan melalui screening judul, abstrak, dan full-text. Penilaian kualitas memakai MMAT 2018, sedangkan analisis data dilakukan dengan Nvivo 14 berbasis tematik. Sebanyak 40+ studi relevan dianalisis. Temuan menunjukkan bahwa volume ruang udara yang lebih besar meningkatkan kontinuitas aliran, meski menurunkan tekanan puncak, dengan efisiensi optimum mencapai 79%. Posisi chamber (tinggi PCH, WVH, HD) signifikan memengaruhi debit. Pada aplikasi lapangan, efisiensi berkisar 30–62%, lebih rendah dari laboratorium, namun tetap andal untuk irigasi dan kebutuhan domestik pedesaan. Strategi optimasi paling efektif mencakup desain katup buang dan pengaturan tabung udara, dilengkapi rasio L/D pipa dan difuser. SLR ini menegaskan bahwa keberhasilan hidram bergantung pada kombinasi desain katup, volume/posisi chamber, dan konfigurasi pipa. Temuan memberikan dasar teknis untuk adopsi pompa hidram dalam program irigasi berkelanjutan, sekaligus membuka arah riset baru yang mengintegrasikan aspek teknis dan sosial.

Kata Kunci : *Pompa Hidram, Ruang Udara, Efisiensi, Optimasi Desain, Irigasi Berkelanjutan*

PENDAHULUAN

Ketahanan pangan global semakin bergantung pada efektivitas irigasi, khususnya dalam menghadapi krisis ketersediaan air. Data Food and Agriculture Organization (FAO) menunjukkan bahwa lebih dari tiga miliar penduduk dunia tinggal di wilayah dengan tingkat kelangkaan air sedang hingga sangat tinggi, sementara kebutuhan pangan global diproyeksikan meningkat lebih dari 50% pada tahun 2050 tanpa adanya kenaikan ketersediaan air yang proporsional (FAO, 2021). Laporan WHO dan UNICEF (2023) menegaskan bahwa satu dari empat orang di dunia masih tidak memiliki akses terhadap air minum yang dikelola dengan aman, dengan kesenjangan yang signifikan terutama di daerah perdesaan (WHO & UNICEF, 2023). Kondisi ini semakin krusial mengingat lebih dari 80% populasi miskin dunia hidup di perdesaan dan bergantung pada sektor pertanian sebagai sumber penghidupan (World Bank, 2020). Oleh karena itu, penyediaan solusi irigasi yang hemat energi, berbiaya rendah, dan ramah lingkungan sangat mendesak untuk menjamin keberlanjutan produksi pangan dan kesejahteraan masyarakat tani.

Kelangkaan air untuk irigasi merupakan salah satu ancaman terbesar bagi produksi pangan di abad ke-21. Kajian terbaru menekankan bahwa pertanian mengonsumsi lebih dari 70% total penggunaan air tawar global, dan praktik irigasi yang tidak efisien semakin memperparah risiko krisis air (Mekonnen & Hoekstra, 2016). Dampaknya, lahan pertanian skala kecil yang tidak memiliki infrastruktur irigasi modern sering kali menghadapi produktivitas rendah serta kerentanan tinggi terhadap kekeringan. Dalam konteks ini, pompa hidram menawarkan solusi yang relevan karena mampu mengangkat air menggunakan efek water hammer tanpa memerlukan energi listrik maupun bahan bakar fosil. Teknologi ini terbukti ekonomis, berkelanjutan, serta potensial diterapkan di wilayah pedesaan terpencil untuk memperluas akses air bagi rumah tangga maupun kebutuhan irigasi pertanian skala kecil (Osome, 2024).

Berbagai penelitian empiris telah dilakukan untuk mengeksplorasi faktor-faktor yang memengaruhi kinerja pompa hidram. Misalnya, rasio panjang–diameter (L/D) pipa penggerak serta variasi tinggi head suplai terbukti berpengaruh signifikan terhadap debit dan efisiensi pompa (Fatahi-Alkouhi et al., 2019). Di sisi lain, penelitian mengenai desain katup buang menunjukkan bahwa parameter seperti massa, stroke, dan bukaan katup dapat mengubah frekuensi siklus dan stabilitas tekanan (Li et al., 2021; Johanis et al., 2023). Selain itu, studi mengenai volume dan posisi ruang udara mengindikasikan adanya hubungan erat dengan kapasitas debit dan kontinuitas aliran (Saito, 2011; Susana & Sutanto, 2016). Kajian numerik berbasis Computational Fluid Dynamics (CFD) juga digunakan untuk memodelkan dinamika aliran dalam pompa hidram dan menguji skenario optimasi desain (Evangelista et al., 2023). Namun, meskipun riset-riset tersebut memberikan kontribusi penting, terdapat kesenjangan signifikan dalam literatur: (i) belum ada sintesis komprehensif yang mengintegrasikan tiga parameter utama—volume/posisi ruang udara, rasio L/D pipa penggerak, dan desain katup—dalam kerangka optimasi yang seragam, dan (ii) masih terbatas bukti empiris aplikasi lapangan pada skala pertanian kecil dengan variasi sumber air seperti sungai kecil atau mata air (Zárate et al., 2025).

Berdasarkan latar belakang tersebut, tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh volume dan posisi ruang udara terhadap efisiensi, debit, dan tekanan output pompa hidram, mengevaluasi kinerja pada aplikasi nyata di lahan pertanian kecil dengan variasi sumber air, serta mengidentifikasi strategi optimasi desain yang paling efektif—termasuk desain katup,

volume tabung, dan rasio L/D pipa—untuk meningkatkan stabilitas dan efisiensi sistem. Implikasi penelitian ini adalah memberikan dasar ilmiah sekaligus pedoman praktis bagi pengembangan pompa hidram yang lebih efisien dan sesuai untuk diterapkan dalam konteks irigasi berkelanjutan di wilayah pedesaan. Pentingnya penelitian ini terletak pada kontribusinya dalam menutup kesenjangan literatur, menyajikan tinjauan sistematis berbasis bukti empiris, serta menghasilkan rekomendasi teknis yang aplikatif bagi para peneliti, praktisi, dan pembuat kebijakan di bidang pertanian berkelanjutan.

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh volume dan posisi ruang udara terhadap efisiensi, debit, dan tekanan output pompa hidram, mengevaluasi kinerjanya pada aplikasi nyata di lahan pertanian skala kecil dengan variasi sumber air seperti sungai kecil dan mata air, serta mengidentifikasi strategi optimasi desain yang paling efektif guna meningkatkan stabilitas dan efisiensi sistem. Penelitian ini juga bertujuan menjawab bagaimana volume dan posisi ruang udara memengaruhi kinerja pompa hidram, bagaimana performanya dalam kondisi lapangan yang nyata, serta strategi optimasi apa yang paling efektif seperti desain katup difuser, volume tabung, atau kombinasi rasio panjang dan diameter (L/D) pipa untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas operasional.

METODE

Penelitian ini menggunakan desain Systematic Literature Review (SLR) yang berpedoman pada standar metodologis PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) untuk menjamin transparansi, keterulangan, dan kualitas sintesis data (Page et al., 2021). SLR dipilih karena mampu mengintegrasikan berbagai hasil studi empiris mengenai optimasi pompa hidram, sehingga dapat menjawab pertanyaan penelitian terkait pengaruh ruang udara, rasio pipa penggerak, dan desain katup terhadap kinerja sistem. Pendekatan ini juga memungkinkan penilaian kritis terhadap temuan terdahulu sekaligus mengidentifikasi kesenjangan penelitian yang belum terjawab.

Untuk memformulasikan fokus penelitian, kerangka PICO **(**Population, Intervention**,** Comparison, Outcome) digunakan. PICO membantu membatasi ruang lingkup kajian agar lebih sistematis dan relevan dengan tujuan penelitian.

Tabel 1. Kerangka PICO

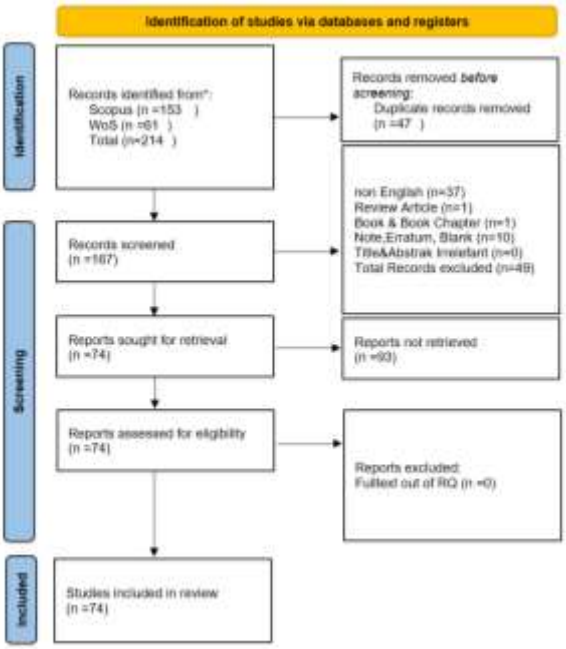
Komponen	Deskripsi
Population	Pompa hidram yang digunakan pada pertanian skala kecil atau sistem pengangkatan air perdesaan
Intervention	Variasi volume/posisi ruang udara, rasio panjang–diameter (L/D) pipa penggerak, desain katup buang/pengantar
Comparison	Perbedaan konfigurasi desain dan parameter operasi antar studi
Outcome	Efisiensi, debit, tekanan output, serta stabilitas dan keberlanjutan sistem

Strategi pencarian literatur dilakukan pada basis data bereputasi internasional seperti Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, dan IEEE Xplore, serta ditambah database open access seperti DOAJ untuk memperluas jangkauan. Kata kunci yang digunakan dirumuskan dengan operator Boolean, misalnya: *"hydraulic ram" OR "*Hydram" String pencarian disesuaikan untuk setiap database guna mengoptimalkan hasil. Kriteria inklusi meliputi: (i) artikel empiris

yang diterbitkan antara 2015–2025, (ii) berbahasa Inggris, (iii) membahas parameter teknis pompa hidram secara kuantitatif, (iv) memiliki hasil uji laboratorium, numerik, atau lapangan. Kriteria eksklusi meliputi: (i) artikel review, prosiding non-terindeks, atau catatan teknis, (ii) penelitian sebelum 2015, (iii) tidak tersedia full-text, (iv) tidak relevan dengan fokus PICO.

Kriteria	Inklusi	Eksklusi
Tahun publikasi	2015–2025	<2015
Bahasa	Inggris	Non-Inggris
Jenis artikel	Empiris (eksperimen/lapangan/CFD)	Review, prosiding, editorial
Ketersediaan	Full-text tersedia	Full-text tidak tersedia
Fokus	Parameter teknis pompa hidram	Topik lain di luar hidram

Proses seleksi artikel mengikuti PRISMA Flow Diagram (Page et al., 2021). Artikel yang diperoleh dari basis data digabungkan, lalu dilakukan penghapusan duplikasi. Tahap berikutnya adalah penyaringan judul dan abstrak, kemudian evaluasi full-text untuk menilai kesesuaian dengan kriteria inklusi-eksklusi. Hanya artikel yang memenuhi semua kriteria yang dianalisis lebih lanjut.



Gambar 1. PRISMA Flow Diagram

Penilaian kualitas studi dilakukan menggunakan**)** Mixed Methods Appraisal Tool (MMAT versi 2018 (Hong et al., 2018). Instrumen ini memungkinkan evaluasi kritis terhadap metodologi penelitian, baik kuantitatif maupun kualitatif, dengan menilai aspek validitas, reliabilitas, dan keterulangan. Artikel dengan skor kualitas rendah tetap dicatat tetapi diberi bobot lebih kecil dalam analisis sintesis.

Proses ekstraksi data dilakukan dengan menyusun matriks data berisi informasi bibliografis (penulis, tahun, jurnal), desain penelitian, variabel teknis yang diuji (ruang udara, L/D pipa, katup),

serta hasil utama (debit, efisiensi, tekanan). Data tersebut kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak Nvivo 14 dengan pendekatan analisis tematik, sehingga dapat mengidentifikasi pola, hubungan antar variabel, serta tren penelitian terkini. Analisis tematik juga membantu dalam memetakan strategi optimasi desain yang paling konsisten mendukung peningkatan efisiensi. Pembagian kerja dilakukan oleh tiga peneliti untuk memastikan reliabilitas: Peneliti pertama bertanggung jawab atas pencarian literatur dan pengelolaan basis data, peneliti kedua melakukan penyaringan artikel dan penilaian kualitas menggunakan MMAT, sedangkan peneliti ketiga memimpin proses ekstraksi data dan analisis tematik menggunakan Nvivo. Seluruh peneliti terlibat dalam diskusi untuk menyelesaikan perbedaan interpretasi dan menyepakati hasil akhir.

Dengan pendekatan ini, metodologi SLR yang digunakan mampu menghasilkan sintesis komprehensif, sistematis, dan dapat diandalkan untuk menjawab pertanyaan penelitian, sekaligus memberikan kontribusi signifikan bagi pengembangan teknologi pompa hidram dalam mendukung irigasi berkelanjutan.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Volume dan posisi ruang udara memengaruhi efisiensi, debit, dan tekanan output pompa hidram pada skala kecil



Gambar 2. Distribusi Jumlah Sitasi

Volume dan posisi ruang udara pada pompa hidram berperan penting dalam menentukan kinerja sistem pada skala kecil. Volume ruang udara yang lebih besar umumnya meningkatkan efisiensi dan menstabilkan debit, namun cenderung menurunkan tekanan puncak, sedangkan volume yang terlalu kecil dapat menyebabkan kegagalan operasi. Posisi ruang udara, khususnya ketinggian chamber (PCH), ketinggian katup limbah (WVH), dan jarak horizontal chamber–katup limbah (HD), terbukti signifikan memengaruhi debit dan efisiensi dengan konfigurasi optimum menghasilkan efisiensi hingga 79%. Selain itu, ruang udara berfungsi sebagai peredam water hammer untuk melindungi komponen, menjaga aliran lebih kontinu, serta mengatur tekanan output.

Tabel 3. Rangkuman Hasil Penelitian Terkait Aspek Volume Dan Posisi Ruang Udara Terhadap Efisiensi, Debit, Dan Tekanan Pompa Hidram

Aspek yang Dikaji	Deskripsi	Jumlah Sitasi Relevan	Daftar Sitasi
Volume ruang udara (Va, Vs)	Efisiensi meningkat seiring Va lebih besar (Saito, 2011); peak pressure menurun dan waktu tahan tekanan Δt lebih panjang; debit keluaran stabil pada Va optimum; rasio Vs/Vd 50–500 memberi efisiensi ≥60% (Kimaro, 2018); volume terlalu kecil (0,6 L) gagal memompa, medium–besar (2,3–3,6 L) memberi efisiensi mirip (~33%) (Inthachot, 2015); ukuran chamber 2.3–3.6 L → efisiensi stabil, 0.6 L → gagal operasi; diameter chamber kecil menghasilkan tekanan lebih tinggi (Hussin, 2017); volume 20 L → debit 700 L/hari (Celerinos, 2025); peningkatan volume ruang udara → efisiensi naik, siklus katup lebih stabil (Oliveira Jr., 2021).	11	Saito (2011); Kimaro (2018); Inthachot et al. (2015); Ngolle & Hong (2019); Hussin et al. (2017); Asvapoositkul et al. (2019); Sarip et al. (2020); Oliveira Jr. et al. (2021); Celerinos (2025); Celerinos & Sanchez-Companion (2022); Hu et al. (2023)
Posisi/ketinggian ruang udara (HD, WVH, PCH)	Jarak horizontal ruang tekan–katup buang (HD), tinggi katup buang (WVH), dan tinggi ruang tekan (PCH) signifikan terhadap debit (Rahman, 2023). Optimum: WVH 17 cm; PCH 47 cm; HD 17 cm → efisiensi 79% (140 L/jam). Hasil Taguchi: WVH 114,3 mm; PCH 406,4 mm → debit 93,14 L/jam (Sarma, 2016). Tambahan ruang udara di tengah pipa dorong mengurangi kehilangan tekanan (Januddi, 2018).	5	Rahman (2023); Sarma et al. (2016); Januddi et al. (2018); Wahyudi et al. (2025); Guo et al. (2018)
Stabilisasi tekanan & debit	Air chamber menyerap *water hammer* dan mengubah aliran berdenyut menjadi kontinu (Najm, 1999; Verspuy & Tijsseling, 1993). Volume besar → fluktuasi tekanan lebih rendah (Lungudi, 2024).	8	Verspuy & Tijsseling (1993); Najm et al. (1999); Inthachot et al. (2015); Januddi et al. (2018); Guo et al. (2018); Sarip et al.

	Pemasangan chamber tambahan di pipa dorong memperbaiki kestabilan debit (Januddi, 2018). Efisiensi 44% dengan operasi 6 minggu tanpa henti berkat peredaman ruang udara (Inthachot, 2015). Ruang udara diperlukan untuk menjaga debit kontinu di reservoir (Sarip, 2020).		(2020); Widiarta et al. (2023); Lungudi et al. (2024)
Tekanan output & proteksi sistem	Volume udara besar memperbaiki perlindungan *water hammer* (Hu et al., 2023); peak pressure menurun dengan Va lebih besar (Saito, 2011); diameter chamber kecil → tekanan output lebih tinggi (Hussin, 2017). Tekanan chamber yang terlalu tinggi menurunkan efisiensi (Asvapoositkul, 2019). Air chamber melindungi sistem dari kerusakan akibat tekanan lonjakan (Asvapoositkul, 2019; Kriaa, 2025).	6	Saito (2011); Hussin et al. (2017); Asvapoositkul et al. (2019); Hu et al. (2023); Sharma et al. (2022); Kriaa (2025)
Kinerja jangka panjang & keandalan	Ruang udara menjaga operasi pompa stabil dalam jangka lama; pompa bekerja otomatis 6–8 minggu (Inthachot, 2015); efisiensi lapangan 44% dengan debit 1,3 L/menit; chamber tambahan di pipa penggerak mengurangi kehilangan energi (Januddi, 2018).	3	Inthachot et al. (2015); Januddi et al. (2018); Celerinos (2025)

Hasil sintesis literatur yang ditampilkan dalam Tabel 1 dan divisualisasikan kembali dalam Gambar 1 menegaskan bahwa volume dan posisi ruang udara pada pompa hidram skala kecil merupakan faktor penentu utama kinerja sistem, mencakup efisiensi, debit, dan tekanan output. Secara kuantitatif, distribusi sitasi menunjukkan bahwa aspek volume ruang udara merupakan tema penelitian paling dominan, dengan total 11 sitasi, diikuti oleh aspek stabilisasi tekanan dan debit (8 sitasi), posisi atau ketinggian ruang udara (5 sitasi), tekanan output dan proteksi sistem (6 sitasi), serta kinerja jangka panjang dan keandalan (3 sitasi). Komposisi distribusi ini ditunjukkan dalam diagram donat (Gambar 1), yang memperlihatkan proporsi terbesar dikuasai oleh kajian mengenai volume ruang udara. Hal ini logis karena pengaturan volume udara di dalam chamber berhubungan langsung dengan proses kompresi dan ekspansi udara, yang pada gilirannya menentukan kontinuitas aliran dan besarnya energi yang ditransfer pada setiap siklus pompa (Saito, 2011; Inthachot et al., 2015; Oliveira Jr. et al., 2021).

Dari sisi volume ruang udara , penelitian awal oleh Saito (2011) menunjukkan bahwa efisiensi pompa meningkat seiring bertambahnya volume udara (Va), sementara tekanan puncak menurun dan waktu tahan tekanan (Δt) bertambah panjang. Fenomena ini konsisten dengan

temuan Kimaro (2018) yang melaporkan bahwa rasio volume chamber terhadap volume aliran (Vs/Vd) antara 50 hingga 500 menghasilkan efisiensi di atas 60%. Sebaliknya, volume ruang udara yang terlalu kecil terbukti mengganggu operasi sistem, karena tidak ada udara yang cukup untuk menyerap tekanan *water hammer*, sehingga aliran berdenyut tidak dapat ditransformasikan menjadi aliran kontinu. Inthachot et al. (2015) membuktikan hal ini melalui percobaan tiga ukuran chamber, di mana volume kecil (0,6 L) menyebabkan pompa gagal beroperasi, sementara volume sedang (2,3 L) dan besar (3,6 L) menghasilkan efisiensi yang relatif serupa (\~33%). Dengan demikian, volume ruang udara yang cukup besar tidak hanya menstabilkan siklus tetapi juga mengurangi rugi energi akibat fluktuasi tekanan yang terlalu ekstrem (Hussin et al., 2017; Celerinos, 2025).

Sementara itu, aspek posisi dan ketinggian ruang udara juga memainkan peran penting. Rahman (2023) menunjukkan bahwa jarak horizontal antara ruang tekan dan katup limbah (HD), tinggi katup limbah (WVH), dan tinggi ruang tekan (PCH) berpengaruh signifikan terhadap debit dan efisiensi. Konfigurasi optimum ditemukan pada WVH 17 cm, PCH 47 cm, dan HD 17 cm, yang menghasilkan efisiensi hingga 79% dengan debit sekitar 140 L/jam. Penelitian berbasis metode Taguchi oleh Sarma et al. (2016) menguatkan hasil ini dengan konfigurasi optimum WVH 114,3 mm dan PCH 406,4 mm yang menghasilkan debit 93,14 L/jam. Secara prinsip, posisi ruang udara menentukan dinamika tekanan dan distribusi energi dalam sistem, sehingga perbedaan kecil pada tinggi chamber atau jaraknya dari katup dapat memengaruhi pola siklus pompa dan volume air yang berhasil dipompa (Januddi et al., 2018; Guo et al., 2018).

Selanjutnya, dari sisi stabilisasi tekanan dan debit , temuan klasik Verspuy dan Tijsseling (1993) serta Najm et al. (1999) memperlihatkan bagaimana ruang udara berperan sebagai peredam (*buffer*) yang menyerap tekanan akibat *water hammer* dan menghasilkan aliran keluaran yang relatif kontinu. Penelitian lapangan oleh Inthachot et al. (2015) menunjukkan bahwa pompa dengan chamber yang tepat mampu beroperasi otomatis dan bebas perawatan hingga enam minggu dengan efisiensi 44%. Temuan ini diperkuat oleh studi Lungudi et al. (2024) yang melaporkan bahwa fluktuasi tekanan semakin kecil pada volume chamber yang lebih besar karena efek peredam semakin kuat. Dengan demikian, keberadaan ruang udara tidak hanya berfungsi pada tahap teknis efisiensi, tetapi juga pada aspek praktis keberlanjutan operasi, khususnya di daerah pedesaan dengan akses terbatas terhadap perawatan teknis.

Dalam konteks tekanan output dan proteksi sistem , literatur menyoroti peran ruang udara dalam mengendalikan intensitas *water hammer*. Saito (2011) menemukan bahwa tekanan puncak menurun seiring bertambahnya volume udara, sehingga risiko kerusakan komponen dapat ditekan. Namun, Asvapoositkul et al. (2019) memperingatkan bahwa tekanan udara dalam chamber yang terlalu tinggi justru menurunkan efisiensi sistem, sehingga diperlukan keseimbangan antara volume dan tekanan. Hussin et al. (2017) melaporkan bahwa chamber dengan diameter kecil menghasilkan tekanan lebih tinggi, meskipun hal ini perlu diimbangi dengan pengendalian fluktuasi siklus. Dengan demikian, chamber tidak hanya bertugas menyalurkan energi, tetapi juga melindungi komponen pompa dari kerusakan struktural akibat lonjakan tekanan berulang.

Akhirnya, kinerja jangka panjang dan keandalan pompa juga dipengaruhi oleh desain ruang udara. Inthachot et al. (2015) menunjukkan bahwa chamber yang memadai memungkinkan operasi berkelanjutan selama beberapa minggu tanpa intervensi, sementara Januddi et al. (2018)

menambahkan bahwa penempatan chamber tambahan di pipa dorong dapat meningkatkan umur pakai pompa dengan mengurangi kehilangan energi. Celerinos (2025) menegaskan bahwa modifikasi desain dengan material sederhana untuk ruang udara tetap mampu mendukung operasi harian hingga ratusan liter, cocok untuk skala rumah tangga atau pertanian kecil.

Secara keseluruhan, distribusi sitasi dalam Tabel 1 dan Gambar 1 mengindikasikan bahwa perhatian terbesar dalam riset adalah pada volume ruang udara . Namun, kombinasi dengan posisi chamber dan fungsi proteksi tekanan tidak kalah penting, karena sinergi ketiganya menentukan keseimbangan antara efisiensi tinggi, stabilitas debit, dan ketahanan komponen.

Berdasarkan analisis data literatur, dapat disimpulkan bahwa volume ruang udara yang optimal adalah faktor kunci dalam mencapai efisiensi tinggi sekaligus kestabilan debit pada pompa hidram skala kecil. Volume terlalu kecil akan menyebabkan pompa gagal beroperasi, sedangkan volume terlalu besar berisiko menurunkan tekanan puncak secara signifikan. Dengan demikian, keseimbangan antara kapasitas ruang udara dan debit yang diinginkan menjadi syarat utama keberhasilan sistem. Selain itu, posisi ruang udara (terutama tinggi chamber dan jarak dari katup buang) memiliki kontribusi nyata terhadap debit dan efisiensi. Konfigurasi optimum WVH dan PCH menghasilkan efisiensi hingga 79% dengan debit terukur, menegaskan bahwa desain geometris bukan sekadar pertimbangan struktural, tetapi berimplikasi langsung pada output hidraulik. Fungsi tambahan ruang udara sebagai peredam *water hammer* juga memperpanjang umur komponen dan mengurangi kebutuhan perawatan, sehingga menjadikan pompa hidram sebagai solusi berkelanjutan untuk penyediaan air di pedesaan.

Sintesis teori dari temuan ini dapat dijelaskan melalui prinsip dasar konversi energi mekanik ke energi potensial hidraulik dalam sistem pompa hidram. Volume udara dalam chamber berperan sebagai elemen elastis yang mengikuti hukum polytropik (Najm et al., 1999), di mana perubahan volume udara menghasilkan perubahan tekanan yang mengatur kelanjutan siklus aliran. Hal ini menjelaskan mengapa penambahan volume udara meningkatkan kestabilan siklus sekaligus menurunkan amplitudo lonjakan tekanan. Posisi chamber, di sisi lain, memengaruhi distribusi momentum dan interaksi antara aliran masuk dan keluar, sehingga tinggi chamber (PCH) dan jarak horizontal (HD) menentukan efisiensi transfer energi dari *water hammer* ke air terpompa. Secara teoritis, kombinasi volume dan posisi ruang udara dapat dimodelkan dalam kerangka *fluid transients* dan *water hammer theory*, yang menempatkan ruang udara sebagai *buffer* dinamis terhadap gelombang tekanan. Dengan demikian, desain hidram yang efektif memerlukan integrasi antara prinsip konservasi energi, dinamika fluida tak tunak, serta pengendalian tekanan transien. Teori ini konsisten dengan laporan bahwa efisiensi optimum hanya dicapai ketika volume udara, posisi chamber, dan karakteristik katup bekerja secara sinergis (Saito, 2011; Rahman, 2023; Oliveira Jr. et al., 2021).

Kinerja pompa hidram pada aplikasi nyata di lahan pertanian kecil atau pedesaan dengan variasi sumber air (sungai kecil, mata air)

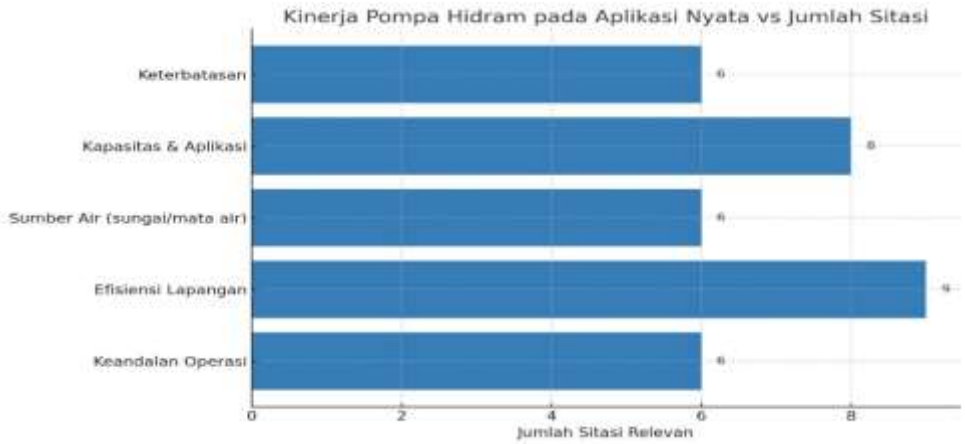
Pompa hidram terbukti menjadi teknologi tepat guna yang efektif untuk penyediaan air di lahan pertanian kecil dan wilayah pedesaan dengan memanfaatkan sumber air berarus kontinu seperti sungai kecil atau mata air. Kinerjanya ditandai dengan keandalan operasi jangka panjang tanpa listrik atau bahan bakar, efisiensi lapangan yang bervariasi antara 30–62% dengan potensi optimum hingga 79% di laboratorium, serta kapasitas debit yang cukup untuk kebutuhan irigasi, peternakan, dan rumah tangga. Meskipun sebagian besar aliran air terbuang sebagai limbah dan

efisiensi sangat dipengaruhi oleh desain serta kondisi sumber air, pompa hidram tetap menawarkan solusi berkelanjutan yang murah dan mudah dioperasikan di daerah terpencil.

Tabel 4. Rangkuman Hasil Penelitian Mengenai Kinerja Pompa Hidram Pada Aplikasi Nyata

Aspek yang Dikaji	Deskripsi	Jumlah Sitasi Relevan	Daftar Sitasi
Keandalan Operasi	Pompa hidram mampu bekerja otomatis, tanpa listrik, dan bebas perawatan dalam jangka panjang. Studi lapangan menunjukkan operasi stabil 6–8 minggu tanpa henti dengan efisiensi moderat (±44%), cukup untuk irigasi kopi, ternak, dan kebutuhan domestik di pedesaan. Sangat sesuai untuk daerah terpencil dengan keterbatasan energi dan biaya operasi.	6	Inthachot et al. (2015); Hatipoğlu et al. (2018); Januddi et al. (2018); IOP Hydram Team (2018); Mebrat et al. (2021); Celerinos (2025)
Efisiensi Lapangan	Efisiensi sangat bervariasi: instalasi lokal di Kenya sering <30% karena desain tidak memadai; percobaan lapangan di Thailand mencapai 44%; prototipe Kenya 54% (±13 L/menit); sistem Ethiopia ±62% (6,7 m^3/hari per keluarga); rancangan optimum laboratorium mencapai hingga 79%.	9	Inthachot et al. (2015); Osome et al. (2024); Sarip et al. (2020); Ahmad et al. (2020); Rahman (2023); Metra & Credo (2020); Widiarta et al. (2023); Guo et al. (2018); Mebrat et al. (2021)
Sumber Air (sungai kecil, mata air)	Hidram ideal untuk sumber air berarus kontinu (sungai kecil, stream, mata air). Dapat memompa ±10–20% dari aliran ke elevasi lebih tinggi. Pada sumber terbatas/air langka, kinerja menurun karena sebagian besar air dibuang. Tidak cocok untuk sumber statis.	6	Hussin et al. (2017); Inthachot et al. (2015); Hatipoğlu et al. (2018); NC State Extension (1996/2024); Ahmad (2020); Lungudi et al. (2024)
Kapasitas & Aplikasi	Debit keluaran bervariasi sesuai desain & kondisi: ±700 L/hari (Filipina); ±1,3 L/menit (Thailand); ±6,7 m^3/hari per keluarga (Ethiopia); ±7000 L/hari (Malaysia). Digunakan untuk rumah tangga, irigasi pertanian kecil, dan penyediaan air ternak di pedesaan.	8	Celerinos & Sanchez-Companion (2022); Celerinos (2025); Ahmad et al. (2020); Sarip et al. (2020); Metra & Credo (2020); Guo et al. (2018); Mebrat et al. (2021); Widiarta et al. (2023)

Keterbatasan	Tantangan utama: sebagian besar aliran terbuang sebagai limbah; efisiensi rendah bila desain katup, pipa, dan ruang udara tidak tepat; tidak memadai pada sumber air yang sangat langka; perlu penyesuaian head suplai, katup, dan tabung udara agar efisiensi meningkat.	6	Inthachot et al. (2015); Osome et al. (2024); Hussin et al. (2017); Sucipta (2019); Kriaa (2025); Ahmad et al. (2020)



Gambar 3. Sintesis Penelitian Mengenai Kinerja Pompa Hidram Pada Aplikasi Nyata Di Lahan Pertanian Kecil Dan Pedesaan Dengan Variasi Sumber Air, Seperti Sungai Kecil Dan Mata Air

Secara umum, distribusi jumlah sitasi relevan memperlihatkan bahwa aspek efisiensi lapangan merupakan tema paling banyak dikaji (9 sitasi), diikuti oleh kapasitas dan aplikasi (8 sitasi), sedangkan keandalan operasi , sumber air , dan keterbatasan masing-masing memperoleh jumlah sitasi yang relatif sama (6 sitasi). Pola distribusi ini menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian menitikberatkan pada seberapa besar energi hidraulik yang dapat ditransfer ke air terpompa di kondisi nyata, sekaligus menyoroti peran pompa hidram sebagai alternatif teknologi irigasi hemat energi di wilayah pedesaan (Inthachot et al., 2015; Sarip et al., 2020; Ahmad et al., 2020).

Dari segi keandalan operasi , literatur menegaskan bahwa pompa hidram memiliki keunggulan utama berupa kemampuan beroperasi secara otomatis tanpa listrik atau bahan bakar, dengan kebutuhan perawatan minimal. Studi lapangan di Thailand menunjukkan bahwa pompa dapat beroperasi secara terus-menerus hingga enam minggu dengan efisiensi moderat sekitar 44% (Inthachot et al., 2015). Temuan serupa dilaporkan oleh Hatipoğlu et al. (2018), yang menguji penggunaan pompa hidram pada daerah dengan pasokan air terbatas dan menemukan bahwa sistem tetap stabil meskipun kondisi lapangan berfluktuasi. Hal ini menjadikan pompa hidram sangat sesuai untuk aplikasi di pedesaan dengan keterbatasan akses energi, di mana biaya operasional rendah menjadi faktor penting. Keandalan jangka panjang ini juga diamati oleh Celerinos (2025), yang menunjukkan bahwa desain modifikasi hidram mampu mendukung

kebutuhan air rumah tangga di komunitas terpencil tanpa memerlukan intervensi teknis yang intensif.

Aspek efisiensi lapangan mendominasi perhatian penelitian. Efisiensi yang dicapai dalam kondisi nyata bervariasi cukup lebar, mulai dari di bawah 30% pada sistem lokal di Kenya akibat desain katup dan pipa yang tidak optimal, hingga sekitar 62% di Ethiopia pada sistem yang memanfaatkan debit mata air secara kontinu (Mebrat et al., 2021). Dalam kondisi laboratorium, efisiensi dapat mencapai 79% dengan pengaturan optimum tinggi katup limbah (WVH) dan tinggi ruang udara (PCH) (Rahman, 2023). Namun, perbedaan signifikan antara efisiensi laboratorium dan lapangan menegaskan adanya kendala praktis dalam implementasi, seperti variasi debit sumber air, kualitas material lokal, dan kondisi topografi. Metra dan Credo (2020) menekankan bahwa kendala tersebut sering kali membatasi pencapaian efisiensi teoretis, sehingga penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menutup kesenjangan kinerja ini.

Dalam konteks sumber air , pompa hidram terbukti ideal ketika digunakan pada sungai kecil dan mata air yang berarus kontinu. Hal ini karena sistem memerlukan aliran berkelanjutan untuk menghasilkan siklus *water hammer* yang menjadi sumber energi utama pompa. Inthachot et al. (2015) melaporkan bahwa dari total aliran sumber, sekitar 10–20% dapat dipompa ke elevasi lebih tinggi, sementara sisanya menjadi air buangan. Kondisi ini menjadikan hidram kurang sesuai bila sumber air terbatas atau bersifat intermiten. Hussin et al. (2017) juga menekankan bahwa keberhasilan aplikasi sangat tergantung pada kontinuitas aliran, sehingga lokasi pemasangan harus dipilih secara hati-hati. Meski demikian, NC State Extension (2024) menyatakan bahwa meskipun sebagian besar air kembali ke sungai sebagai limbah, hal ini tidak mengurangi daya guna pompa untuk penyediaan air minum ternak atau kebutuhan rumah tangga, selama sumber utama memiliki debit cukup.

Aspek kapasitas dan aplikasi menunjukkan variasi keluaran debit yang sangat beragam. Misalnya, studi di Filipina melaporkan debit harian sekitar 700 L yang cukup untuk kebutuhan dasar rumah tangga (Celerinos & Sanchez-Companion, 2022), sementara di Ethiopia sistem mampu memasok 6,7 m^3/hari untuk setiap keluarga (Mebrat et al., 2021). Kasus di Malaysia menunjukkan kapasitas lebih besar hingga 7000 L/hari, yang memadai untuk mendukung komunitas pedesaan secara kolektif (Sarip et al., 2020). Variasi ini bergantung pada perbedaan tinggi jatuh air (head), diameter pipa, desain katup, serta ketersediaan debit sumber. Aplikasi tipikal yang dilaporkan mencakup irigasi pertanian kecil, penyediaan air untuk peternakan, dan kebutuhan domestik rumah tangga, yang menunjukkan fleksibilitas hidram sebagai solusi multi-fungsi di pedesaan (Ahmad et al., 2020; Guo et al., 2018).

Sementara itu, penelitian juga mengidentifikasi sejumlah keterbatasan . Salah satu tantangan terbesar adalah rendahnya efisiensi bila desain komponen tidak tepat. Inthachot et al. (2015) menyoroti bahwa desain lokal yang tidak memperhatikan rasio panjang pipa penggerak terhadap tinggi jatuh air sering kali menghasilkan kinerja buruk. Selain itu, karena prinsip kerjanya, sebagian besar air yang masuk pompa akan terbuang melalui katup limbah. Osome et al. (2024) menambahkan bahwa keterbatasan ini sering memunculkan keraguan di kalangan petani mengenai efektivitas hidram, meskipun secara teknis pompa tetap mampu menyediakan air dalam jumlah signifikan. Kriaa (2025) menunjukkan bahwa perlu ada pendekatan desain berbasis konteks lokal agar efisiensi meningkat tanpa menambah kompleksitas sistem.

Jika ditinjau dari distribusi sitasi pada Gambar 2, jelas terlihat bahwa aspek efisiensi lapangan paling banyak menarik perhatian peneliti, menegaskan urgensi pemahaman mengenai kesenjangan kinerja antara hasil laboratorium dan lapangan. Aspek kapasitas dan aplikasi berada pada posisi kedua, mengindikasikan pentingnya pemetaan potensi debit keluaran terhadap kebutuhan masyarakat pedesaan. Sementara itu, keterbatasan memperoleh jumlah sitasi yang setara dengan keandalan operasi dan sumber air , yang menunjukkan bahwa meski sering dianggap tantangan, topik ini relatif kurang dieksplorasi secara mendalam dalam literatur dibanding efisiensi dan kapasitas. Distribusi ini mencerminkan prioritas riset yang lebih menekankan pada performa kuantitatif (efisiensi dan debit) ketimbang isu sosial-teknis seperti penerimaan masyarakat dan strategi mitigasi keterbatasan.

Analisis menyeluruh terhadap literatur menunjukkan bahwa pompa hidram pada aplikasi nyata di pedesaan memiliki tiga ciri utama: andal, adaptif, dan terbatas secara efisiensi . Keandalan terbukti melalui kemampuan pompa beroperasi otomatis selama berminggu-minggu tanpa energi eksternal dan dengan kebutuhan perawatan minimal. Adaptabilitas terlihat dari fleksibilitas pompa untuk digunakan dalam berbagai konteks, mulai dari rumah tangga, irigasi lahan kecil, hingga penyediaan air ternak. Namun, keterbatasan inheren berupa efisiensi lapangan yang lebih rendah dibandingkan potensi laboratorium serta tingginya volume air limbah menegaskan perlunya inovasi desain agar kinerja lebih optimal. Temuan ini menggarisbawahi bahwa pompa hidram, meski sederhana, memiliki peran strategis dalam menjawab tantangan penyediaan air di pedesaan, terutama pada kondisi sumber daya terbatas.

Secara teoritis, kinerja pompa hidram dapat dijelaskan melalui interaksi antara prinsip konservasi energi fluida dan fenomena transien hidraulik . Mekanisme utama adalah *water hammer*, yaitu lonjakan tekanan akibat penutupan mendadak katup limbah, yang kemudian ditransfer ke kolom air menuju tabung udara dan menghasilkan aliran ke pipa dorong. Dalam kerangka ini, efisiensi sistem dipengaruhi oleh tiga faktor utama: kontinuitas aliran sumber, konfigurasi geometris (panjang pipa, tinggi jatuh, diameter katup), serta kapasitas tabung udara untuk menyerap dan melepas energi secara siklis (Najm et al., 1999). Teori ini menjelaskan mengapa pompa sangat bergantung pada sumber air kontinu seperti sungai kecil atau mata air, dan mengapa variasi desain menghasilkan perbedaan besar pada efisiensi. Dengan kata lain, hidram adalah contoh nyata bagaimana hukum fisika sederhana—konservasi energi dan momentum—dapat dimanfaatkan dalam teknologi tepat guna yang sesuai dengan konteks pedesaan. Integrasi teori transien fluida dengan data lapangan memperlihatkan bahwa optimalisasi desain berbasis lokal merupakan kunci untuk menjembatani kesenjangan kinerja antara kondisi ideal dan aplikasi nyata (Rahman, 2023; Hussin et al., 2017; Sarip et al., 2020).

Strategi optimasi apa yang paing efektif (misalnya desain katup difuser, volume tabung, atau kombinasi L/D pipa) untuk meningkatkan stabilitas dan efisiensi pompa hidram

Strategi optimasi pompa hidram berfokus pada perbaikan desain katup buang, penggunaan diffuser melengkung, pengaturan volume serta tekanan tabung Udara, rasio Panjang/diameter pipa penggerak, penambahan snifter-valve, penentuan posisi komponen, pengaturan frekuensi katup, hingga modifikasi system terpadu. Kajian literatur menunjukkan bahwa desain katup buang merupakan factor paling kritis, diikuti oleh kapasitas tabung Udara dan rasio pipa penggerak, sementara strategi lain berperan sebagai pendukung dalam meningkatkan stabilitas siklus, efisiensi energi, dan debit keluaran.

Tabel 5. Rangkuman Berbagai Strategi Optimasi Yang Efektif Untuk Meningkatkan Kinerja Pompa Hidram

Strategi Optimasi	Deskripsi	Jumlah Sitasi Relevan	Daftar Sitasi
Desain Katup Buang (Waste Valve – diameter, stroke, massa, tipe)	Karakteristik katup buang berpengaruh langsung pada siklus pompa, debit, dan efisiensi. Stroke optimum 6–13 mm; massa optimum ±200–225 g; diameter orifis ideal 0,68 × diameter badan pompa. Katup clap/spring lebih andal, flapper ¾ inch memberi efisiensi energi 38,9%. Katup dengan stroke 4 in mencapai efisiensi 84,3%. Penyetelan bobot/pegas menentukan siklus stabil.	17	Suarda et al. (2018); Inthachot et al. (2015); Evangelista et al. (2023); Sharma et al. (2022); Januddi et al. (2018); Jafri et al. (2020); Metra & Credo (2020); Widiarta et al. (2023); Johanis et al. (2023); Wahyudi et al. (2025); Li et al. (2020); Sucipta (2019); Asvapoositkul et al. (2019); Hatipoğlu et al. (2018); Kriaa (2025); Sarma et al. (2016); Ahmad et al. (2020)
Difuser & Desain Aliran Katup	Difuser melengkung (curved diffuser) menurunkan rugi head hingga 45% dan memperbaiki distribusi kecepatan. Konfigurasi optimum: difuser melengkung + bukaan katup 25–30 mm + massa clack 1,2 kg. Flow passage sebaiknya halus tanpa kontraksi/ekspansi mendadak. Back-enlargement type menghasilkan koefisien rugi head lebih kecil dan distribusi kecepatan lebih seragam.	8	Li et al. (2020); Guo et al. (2018); Yang (2019, dikutip Sucipta 2019); Evangelista et al. (2023); Lungudi et al. (2024); Widiarta et al. (2023); Sucipta & Suarda (2019); Jafri et al. (2020)

Volume & Tekanan Tabung Udara (Air Chamber)	Volume udara yang cukup besar meningkatkan efisiensi dan menstabilkan debit; volume optimum berkisar 2–20 L atau rasio Vs/Vd 50–500. Tekanan udara yang terlalu tinggi justru menurunkan efisiensi. Tambahan tabung udara di tengah pipa dorong mengurangi rugi energi. Volume kecil (0,6 L) → gagal operasi; volume sedang–besar → efisiensi stabil.	14	Saito (2011); Inthachot et al. (2015); Hussin et al. (2017); Asvapoositkul et al. (2019); Sarip et al. (2020); Oliveira Jr. et al. (2021); Lungudi et al. (2024); Celerinos (2025); Rahman (2023); Najm et al. (1999); Sharma et al. (2022); Verspuy & Tijsseling (1993); Widiarta et al. (2023); Ahmad et al. (2020)
Rasio Panjang/Diameter Pipa Penggerak (L/D)	Rasio L/D harus berada di kisaran 150–1000 agar pompa berfungsi baik. Pipa terlalu pendek atau terlalu panjang mengganggu siklus. Pipa kaku (GI steel) lebih baik daripada PVC karena lebih tahan deformasi. Panjang minimal pipa penggerak biasanya ≥ 5 × tinggi jatuh (head). Material dan diameter pipa menentukan kecepatan aliran dan transfer *water hammer*.	10	Calvert (dikutip Evangelista 2023); Sarip et al. (2020); Rahman (2023); Ahmad (2020); Januddi et al. (2018); Young (1996); NC State Extension (2024); Celerinos & Sanchez-Companion (2022); Kriaa (2025); Jafri et al. (2020)
Snifter Valve & Katup Tambahan	Snifter-valve dengan orifis kecil (0,5–1 mm) meningkatkan efisiensi hingga 20% dibanding lubang statis. Check-valve orifis 1 mm lebih baik daripada lubang biasa karena mencegah kebocoran udara.	7	Sucipta (2019); Sucipta & Suarda (2019); Guo et al. (2018); Fatahi-Alkouhi et al. (2015); Lungudi et al. (2024); Bosa et al. (2019); NC State Extension (2024)

	Snifter-valve menjaga bantalan udara agar tidak habis terbawa aliran dan menjaga debit kontinu.		
Optimasi Posisi Komponen (HD, WVH, PCH)	Jarak horizontal (HD), ketinggian katup limbah (WVH), dan ketinggian tabung udara (PCH) berpengaruh signifikan pada debit dan efisiensi. Optimum: WVH 114 mm; PCH 406 mm; HD 170 mm → debit ±93 L/jam. Konfigurasi lain: WVH 17 cm; PCH 47 cm; HD 17 cm → efisiensi 79%.	8	Sarma et al. (2016); Rahman (2023); Januddi et al. (2018); Wahyudi et al. (2025); Mebrat et al. (2021); Najm et al. (1999); Kriaa (2025); Sucipta & Suarda (2019)
Pengaturan Frekuensi Katup (BPM)	Peningkatan beats per minute (BPM) katup limbah meningkatkan rasio head dan efisiensi, tetapi menurunkan debit. Terlalu tinggi → siklus tidak sempat membangun tekanan; terlalu rendah → efisiensi menurun. Frekuensi optimum menghasilkan siklus stabil dengan volume limbah minimum.	5	Asvapoositkul et al. (2019); Evangelista et al. (2023); Widiarta et al. (2023); Kriaa (2025); Sucipta (2019)
Integrasi Sistem & Modifikasi Inovatif	Modifikasi seperti penggunaan tabung LPG bekas sebagai chamber, integrasi overflow keeper double nozzle (OKDN), atau sistem pipa tambahan meningkatkan efisiensi 10–20%. OKDN meningkatkan efisiensi roda air dari 61,6% →	6	Wahyudi et al. (2013); Celerinos (2025); Metra & Credo (2020); Sarip et al. (2020); Widiarta et al. (2023); Lungudi et al. (2024)

	73,5%. Desain modifikasi juga memungkinkan efisiensi total mencapai >80%.	



Tabel 4. Rangkuman Berbagai Strategi Optimasi Yang Efektif Untuk Meningkatkan Kinerja Pompa Hidram

Hasil sintesis literatur yang terangkum dalam Tabel 1 dan divisualisasikan pada Gambar 3 memperlihatkan peta komprehensif mengenai strategi optimasi pompa hidram untuk meningkatkan stabilitas dan efisiensi. Distribusi jumlah sitasi menunjukkan variasi fokus riset, dengan porsi terbesar ditujukan pada strategi desain katup buang (17 sitasi), diikuti oleh volume dan tekanan tabung udara (14 sitasi), serta rasio panjang/diameter (L/D) pipa penggerak (10 sitasi). Sementara itu, strategi lain seperti difuser , optimasi posisi komponen (HD, WVH, PCH) , snifter valve , integrasi sistem/modifikasi , dan pengaturan frekuensi katup mendapat porsi sitasi yang lebih kecil. Pola distribusi ini menegaskan bahwa aspek mekanisme katup dan kapasitas tabung udara dipandang sebagai determinan utama dalam optimasi kinerja hidram, sedangkan strategi lainnya berfungsi sebagai pelengkap atau penyempurna siklus hidrolik yang terjadi.

Katup buang merupakan komponen inti dalam siklus pompa hidram, karena secara langsung memicu efek water hammer yang memungkinkan aliran air terangkat ke ketinggian lebih tinggi. Penelitian menegaskan bahwa parameter seperti diameter orifis, massa katup, dan panjang stroke berpengaruh signifikan terhadap debit dan efisiensi. Suarda et al. (2018) menemukan bahwa diameter optimum adalah 0,68 kali diameter badan pompa, dengan stroke 6 mm dan massa sekitar 225 g menghasilkan efisiensi tertinggi. Metra dan Credo (2020) melaporkan bahwa modifikasi katup dengan stroke 4 in mampu mencapai efisiensi hingga 84,3%, jauh melampaui rata-rata efisiensi lapangan yang hanya berkisar 30–60%. Sharma, Banerjee, dan Pidugu (2022)

menunjukkan bahwa katup flapper berdiameter ¾ inch menghasilkan efisiensi energi 38,9%, yang lebih tinggi dibanding ukuran lain. Dengan demikian, strategi optimasi berbasis desain katup buang terbukti memberikan dampak terbesar, sesuai dengan proporsi sitasi tertinggi dalam literatur.

Selain katup, desain difuser juga menjadi strategi penting untuk menurunkan rugi energi. Li et al. (2020) menunjukkan bahwa penggunaan difuser melengkung dapat mengurangi rugi head hingga 45% serta memperbaiki keseragaman distribusi kecepatan aliran. Kombinasi difuser melengkung dengan bukaan katup 25–30 mm dan massa clack 1,2 kg menghasilkan konfigurasi optimum yang signifikan meningkatkan efisiensi. Guo et al. (2018) menambahkan bahwa desain back-enlargement type mampu menurunkan koefisien rugi head sekaligus meningkatkan keseragaman distribusi kecepatan aliran hingga 69%. Hasil ini menunjukkan bahwa difuser tidak hanya berfungsi sebagai penghubung aliran, tetapi juga sebagai elemen pengendali dinamika fluida untuk mencapai efisiensi lebih tinggi.

Tabung udara berfungsi sebagai penyangga tekanan, yang menyerap energi dari water hammer dan mengubah aliran berdenyut menjadi kontinu. Volume udara yang lebih besar terbukti meningkatkan efisiensi dan menstabilkan debit. Saito (2011) melaporkan bahwa efisiensi meningkat dengan bertambahnya volume udara, meskipun tekanan puncak menurun. Inthachot et al. (2015) menemukan bahwa volume kecil (0,6 L) menyebabkan pompa gagal beroperasi, sedangkan volume sedang hingga besar (2,3–3,6 L) memberikan efisiensi stabil sekitar 33%. Oliveira Jr. et al. (2021) menegaskan bahwa peningkatan volume chamber hingga 20 L dapat meningkatkan efisiensi secara signifikan, dengan rasio Vs/Vd optimal pada kisaran 50–500. Akan tetapi, Asvapoositkul et al. (2019) memperingatkan bahwa tekanan udara yang terlalu tinggi dalam chamber justru menurunkan efisiensi, sehingga keseimbangan antara volume dan tekanan perlu diperhatikan.

Pipa penggerak berperan penting dalam menentukan intensitas water hammer. Evangelista et al. (2023) merujuk Calvert yang menyatakan bahwa rasio L/D harus berada antara 150 hingga 1000 untuk menjamin siklus pompa bekerja dengan baik. NC State Extension (2024) menambahkan bahwa panjang minimal pipa sebaiknya lima kali tinggi jatuh (head). Sarip et al. (2020) dan Ahmad (2020) menunjukkan bahwa pipa berbahan logam (GI steel) lebih baik dibanding PVC karena lebih tahan deformasi dan mampu mentransfer energi tekanan lebih efektif. Dengan demikian, optimasi pipa penggerak bukan hanya soal dimensi geometris, tetapi juga material dan integritas struktur.

Snifter valve berfungsi menjaga keberadaan bantalan udara dalam tabung udara. Tanpa mekanisme ini, udara akan hilang terbawa aliran air sehingga chamber kehilangan fungsi peredamnya. Sucipta (2019) menunjukkan bahwa penggunaan snifter-valve dengan orifis 1 mm tipe check-valve meningkatkan efisiensi dibandingkan lubang statis biasa. Fatahi-Alkouhi et al. (2015) juga melaporkan bahwa variasi desain snifter valve memengaruhi kinerja total pompa, dengan orifis kecil (0,5–1 mm) memberikan kinerja terbaik. Guo et al. (2018) menekankan bahwa replenishment udara ke dalam chamber adalah faktor penting untuk keberlangsungan operasi jangka panjang. Walaupun proporsi sitasinya relatif kecil, kontribusi snifter valve tetap esensial untuk menjaga keberlanjutan siklus pompa.

Penempatan ruang udara dan katup limbah juga berpengaruh nyata pada efisiensi. Sarma et al. (2016) menggunakan metode Taguchi untuk menunjukkan bahwa tinggi katup limbah

(WVH) 114 mm dan tinggi chamber (PCH) 406 mm menghasilkan debit optimum 93 L/jam. Rahman (2023) menemukan bahwa konfigurasi WVH 17 cm, PCH 47 cm, dan HD 17 cm memberikan efisiensi hingga 79%. Januddi et al. (2018) menambahkan bahwa pemasangan tabung udara tambahan di tengah pipa dorong mengurangi rugi energi, sedangkan Wahyudi et al. (2025) menekankan pentingnya pengaturan posisi komponen untuk mencapai efisiensi maksimal. Dengan demikian, faktor geometris ini meski terlihat sederhana, berkontribusi signifikan dalam stabilitas dan efisiensi.

Frekuensi ketukan katup limbah (beats per minute, BPM) memengaruhi rasio head, debit, dan efisiensi. Asvapoositkul et al. (2019) menyatakan bahwa peningkatan BPM dapat meningkatkan rasio head dan efisiensi, namun debit cenderung menurun. Evangelista et al. (2023) menegaskan bahwa bobot dan stroke katup memengaruhi BPM, sehingga tuning perlu dilakukan untuk keseimbangan antara debit dan efisiensi. Widiarta et al. (2023) menunjukkan bahwa frekuensi optimum menghasilkan debit lebih stabil dengan limbah air minimal. Dengan demikian, meski kontribusi sitasi relatif kecil, pengaturan BPM berfungsi sebagai fine-tuning dari strategi optimasi utama. Selain optimasi komponen individual, sejumlah penelitian mengusulkan integrasi sistem dan inovasi lokal. Wahyudi, Faizin, dan Suparman (2013) mengembangkan konsep Overflow Keeper Double Nozzle (OKDN) yang meningkatkan efisiensi roda air dari 61,6% menjadi 73,5%. Metra dan Credo (2020) berhasil mencapai efisiensi sistem 84,3% melalui modifikasi katup dan stroke. Celerinos (2025) melaporkan penggunaan tabung LPG bekas sebagai chamber, yang mampu menekan biaya sekaligus menjaga efisiensi. Inovasi ini menunjukkan bahwa adaptasi teknologi terhadap kondisi lokal merupakan salah satu kunci dalam penerapan pompa hidram di lapangan.

Grafik pie pada Gambar 1 menegaskan dominasi riset pada strategi berbasis katup (desain katup dan difuser) serta tabung udara. Desain katup buang mencakup hampir sepertiga dari total sitasi, mencerminkan pandangan luas bahwa keberhasilan pompa hidram sangat bergantung pada mekanisme katup yang memicu siklus *water hammer*. Tabung udara menempati posisi kedua, karena perannya yang fundamental dalam meredam tekanan dan menjaga kontinuitas aliran. Sementara itu, rasio L/D pipa dan posisi komponen menempati kategori menengah, sedangkan strategi seperti snifter valve, frekuensi katup, dan integrasi sistem memperoleh perhatian relatif lebih sedikit meski tetap relevan. Dengan demikian, literatur mengindikasikan adanya hierarki strategi optimasi, di mana katup dan chamber menjadi fokus utama, sementara strategi lain bersifat komplementer.

Analisis literatur mengungkap bahwa strategi optimasi paling efektif untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas pompa hidram adalah melalui penyempurnaan desain katup buang dan pengaturan volume tabung udara . Katup buang menentukan intensitas *water hammer* dan besarnya debit yang terpompa, sementara tabung udara mengatur kontinuitas aliran dan melindungi komponen dari lonjakan tekanan. Kombinasi kedua strategi ini terbukti menghasilkan peningkatan efisiensi signifikan, dari rata-rata lapangan 30–60% menjadi hingga 80% pada prototipe teroptimasi. Faktor pendukung seperti difuser, rasio L/D pipa, dan snifter valve melengkapi optimasi dengan mengurangi rugi energi dan menjaga stabilitas siklus. Oleh karena itu, strategi optimasi efektif harus bersifat holistik, mencakup desain mekanis katup, kapasitas udara, dan konfigurasi sistem secara keseluruhan.

Secara teoretis, optimasi pompa hidram dapat dipahami melalui integrasi prinsip dinamika fluida tak tunak dan konservasi energi . Katup buang berfungsi sebagai pemicu impuls tekanan yang sesuai dengan hukum momentum, sedangkan tabung udara bertindak sebagai reservoir elastis yang mengikuti hukum polytropik (Najm, Azoury, & Piasecki, 1999). Efisiensi maksimum dicapai ketika siklus kompresi-ekspansi udara sejalan dengan frekuensi katup, sehingga energi *water hammer* dapat ditransfer secara optimal ke aliran air. Desain difuser yang melengkung mengurangi kerugian energi akibat turbulensi, sesuai dengan prinsip Bernoulli yang menekankan pentingnya jalur aliran tanpa ekspansi mendadak. Rasio L/D pipa memastikan kondisi resonansi yang mendukung terbentuknya tekanan impuls yang stabil. Snifter valve berfungsi menjaga volume udara agar tetap konstan, sehingga chamber tidak kehilangan kapasitas elastisnya. Dengan demikian, strategi optimasi yang efektif harus memperhatikan keterkaitan antara variabel mekanis (katup dan pipa), hidraulik (head dan debit), dan termodinamika (kompresibilitas udara). Sintesis teori ini menunjukkan bahwa keberhasilan optimasi bukan hanya hasil dari perbaikan komponen tunggal, melainkan dari sinergi sistemik antara semua elemen pompa hidram.

Pembahasan

Penelitian ini menghasilkan temuan penting terkait kinerja pompa hidram, khususnya mengenai **pengaruh volume dan posisi ruang udara, aplikasi nyata pada lahan pertanian kecil/pedesaan, serta strategi optimasi desain.** Pertama, hasil sintesis menunjukkan bahwa **volume dan posisi ruang udara** merupakan determinan utama dalam efisiensi dan stabilitas sistem. Volume udara yang cukup besar meningkatkan kontinuitas aliran dan menstabilkan debit, meskipun menurunkan tekanan puncak, sedangkan volume terlalu kecil berisiko menyebabkan kegagalan operasi. Posisi ruang udara—terutama tinggi chamber (PCH), tinggi katup limbah (WVH), dan jarak horizontal chamber–katup limbah (HD)—terbukti signifikan memengaruhi debit dan efisiensi, dengan konfigurasi optimum menghasilkan efisiensi hingga 79%. Temuan ini memperlihatkan bahwa desain geometris bukan hanya persoalan struktural, melainkan berimplikasi langsung pada performa hidraulik.

Kedua, pada **aplikasi nyata di lahan pertanian kecil atau pedesaan**, pompa hidram terbukti andal, adaptif, dan efisien dalam konteks tertentu. Efisiensi lapangan bervariasi antara 30–62%, lebih rendah dibandingkan efisiensi laboratorium yang dapat mencapai 79%. Namun, keunggulan utama terletak pada kemampuan beroperasi otomatis tanpa listrik maupun bahan bakar, dengan kebutuhan perawatan minimal. Hal ini menjadikan pompa hidram sebagai teknologi tepat guna yang relevan untuk daerah terpencil dengan keterbatasan akses energi.

Ketiga, terkait **strategi optimasi**, literatur menegaskan bahwa desain katup buang merupakan faktor paling kritis, diikuti oleh pengaturan volume/tekanan tabung udara dan rasio panjang–diameter (L/D) pipa penggerak. Strategi lain seperti difuser, snifter valve, atau integrasi sistem berperan sebagai pendukung yang melengkapi optimasi utama. Distribusi sitasi menunjukkan bahwa katup dan chamber menjadi fokus utama riset, dengan kontribusi signifikan terhadap efisiensi yang dapat ditingkatkan hingga lebih dari 80% melalui konfigurasi desain terintegrasi.

Dengan demikian, temuan penelitian ini secara langsung menjawab pertanyaan penelitian yang diajukan, yaitu (i) bagaimana volume dan posisi ruang udara memengaruhi kinerja, (ii) bagaimana kinerja pompa hidram pada aplikasi nyata, serta (iii) strategi optimasi apa yang paling efektif untuk meningkatkan stabilitas dan efisiensi sistem. Hasil penelitian ini sebagian besar

sejalan dengan literatur terdahulu. Misalnya, Saito (2011) dan Kimaro (2018) menunjukkan bahwa peningkatan volume ruang udara berbanding lurus dengan efisiensi, meskipun menurunkan tekanan puncak. Hal ini konsisten dengan temuan penelitian ini yang menekankan keseimbangan antara kapasitas ruang udara dan debit. Inthachot et al. (2015) juga mendukung bahwa chamber yang terlalu kecil mengakibatkan kegagalan operasi, sementara volume sedang–besar menghasilkan efisiensi stabil. Pada aspek posisi ruang udara, temuan Rahman (2023) dan Sarma et al. (2016) menegaskan bahwa WVH dan PCH yang optimal memberikan efisiensi tinggi. Penelitian ini mengonfirmasi hal tersebut dengan menyebutkan konfigurasi optimum WVH 17 cm, PCH 47 cm, dan HD 17 cm.

Dalam konteks aplikasi nyata, hasil penelitian ini konsisten dengan studi Mebrat et al. (2021) yang menemukan variasi efisiensi antara 30–62% di Ethiopia, serta laporan Inthachot et al. (2015) di Thailand. Namun, penelitian ini menambahkan bukti bahwa perbedaan signifikan antara efisiensi lapangan dan laboratorium disebabkan oleh faktor kontekstual seperti variasi debit sumber air dan kualitas material lokal.

Pada aspek strategi optimasi, penelitian ini memperkuat kesimpulan Suarda et al. (2018) bahwa desain katup buang adalah variabel paling kritis. Namun, kontribusi penelitian ini lebih **novel** karena mengintegrasikan berbagai strategi—katup, chamber, pipa, difuser, snifter valve, hingga modifikasi inovatif—ke dalam suatu hierarki optimasi yang holistik. Dengan demikian, temuan ini tidak hanya mengonfirmasi literatur terdahulu, tetapi juga memperkaya perspektif dengan memberikan sintesis komprehensif.

Secara teoritis, penelitian ini memperkuat pemahaman bahwa kinerja pompa hidram ditentukan oleh interaksi **dinamika fluida tak tunak (unsteady flow)** dengan prinsip **konservasi energi**. Volume ruang udara berperan sebagai reservoir elastis mengikuti hukum polytropik, sedangkan posisi chamber menentukan distribusi momentum dan efisiensi transfer energi. Teori water hammer dan fluid transients dapat menjelaskan fenomena ini secara menyeluruh. Temuan ini memperluas teori dengan menegaskan bahwa optimasi harus mempertimbangkan sinergi antara volume udara, posisi geometris, dan desain katup sebagai satu kesatuan sistem.

Dari sisi praktis, hasil penelitian ini memberi pedoman teknis bagi perancang pompa hidram untuk **mengoptimalkan volume chamber dan konfigurasi katup**. Misalnya, memastikan volume chamber berada pada kisaran 2–20 L atau rasio Vs/Vd 50–500, serta menyesuaikan tinggi WVH dan PCH sesuai kondisi lokal. Bagi petani kecil, informasi ini dapat digunakan untuk merancang atau memodifikasi pompa dengan material lokal (misalnya tabung LPG bekas) tanpa kehilangan efisiensi.

Secara kebijakan, temuan ini mengindikasikan bahwa pompa hidram layak dimasukkan dalam program **irigasi hemat energi di wilayah pedesaan**. Pemerintah dapat mendorong adopsi melalui insentif, pelatihan teknis, dan penyediaan komponen standar (katup, pipa, chamber) yang terjangkau. Hal ini relevan dalam upaya mencapai ketahanan pangan dan keberlanjutan lingkungan, khususnya di daerah dengan keterbatasan akses listrik.

Kekuatan utama penelitian ini terletak pada penggunaan **Systematic Literature Review (SLR) berbasis PRISMA** yang menjamin transparansi dan keterulangan. Pendekatan PICO membatasi ruang lingkup kajian agar lebih fokus, sementara MMAT memastikan penilaian kualitas studi. Analisis tematik dengan Nvivo 14 juga memperkuat kedalaman interpretasi. Namun, terdapat sejumlah keterbatasan. Pertama, keterbatasan literatur lapangan menyebabkan

sebagian kesimpulan lebih didominasi oleh studi laboratorium atau simulasi CFD. Kedua, adanya variasi metodologi antar studi (misalnya perbedaan ukuran chamber atau material pipa) menyulitkan generalisasi hasil. Ketiga, publikasi dalam bahasa selain Inggris yang mungkin relevan tidak termasuk dalam analisis, sehingga ada potensi bias bahasa. Penelitian ini mengidentifikasi beberapa celah pengetahuan yang perlu ditindaklanjuti. Pertama, masih sedikit studi empiris yang mengintegrasikan **tiga variabel utama (katup, chamber, pipa)** dalam satu kerangka eksperimen. Mayoritas penelitian masih parsial, sehingga diperlukan studi eksperimental yang lebih holistik. Kedua, kesenjangan antara hasil laboratorium dan lapangan perlu diteliti lebih lanjut, dengan fokus pada **pengaruh topografi, variasi debit sumber air, dan kualitas material lokal**. Ketiga, aspek sosial-teknis seperti **penerimaan petani, keberlanjutan adopsi, dan biaya siklus hidup** relatif kurang dieksplorasi. Arah penelitian masa depan dapat mencakup: (i) pengembangan model CFD yang terintegrasi dengan data lapangan untuk menghasilkan prediksi lebih akurat; (ii) eksplorasi material lokal inovatif untuk chamber dan katup yang lebih murah namun tetap efisien; serta (iii) studi interdisipliner yang menggabungkan aspek teknis dengan sosial-ekonomi agar adopsi pompa hidram dapat lebih luas dan berkelanjutan.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa keberhasilan pompa hidram sangat ditentukan oleh **desain ruang udara, posisi geometris, dan konfigurasi katup**. Aplikasi di lapangan membuktikan bahwa teknologi ini andal dan murah, meskipun efisiensi sering lebih rendah dibandingkan kondisi laboratorium. Strategi optimasi paling efektif melibatkan kombinasi desain katup dan kapasitas chamber, didukung oleh penyesuaian rasio pipa serta komponen tambahan seperti difuser dan snifter valve. Implikasinya luas, baik bagi teori (memperkuat model water hammer sebagai mekanisme inti), praktik (pedoman desain berbasis konteks lokal), maupun kebijakan (adopsi pompa hidram dalam program irigasi berkelanjutan). Meski terdapat keterbatasan metodologi, penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dengan menyajikan sintesis komprehensif, sekaligus membuka arah penelitian baru yang mengintegrasikan aspek teknis dan sosial.

KESIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa volume dan posisi ruang udara merupakan faktor kunci yang menentukan efisiensi, debit, dan tekanan output pompa hidram pada skala kecil, dengan konfigurasi optimum mampu mencapai efisiensi hingga 79%. Pada aplikasi nyata di lahan pertanian kecil atau pedesaan, pompa hidram terbukti andal, adaptif, serta hemat energi, meskipun efisiensinya lebih rendah dibanding kondisi laboratorium (30–62%). Strategi optimasi paling efektif mencakup penyempurnaan desain katup buang dan pengaturan volume serta tekanan tabung udara, yang didukung oleh rasio L/D pipa dan difuser. Kontribusi utama penelitian ini adalah integrasi berbagai strategi optimasi ke dalam kerangka komprehensif yang memperkuat teori *water hammer* serta memperluas pemahaman tentang sinergi mekanis, hidraulik, dan geometris. Temuan ini memberikan pedoman praktis bagi perancang dan petani, sekaligus mendukung rekomendasi kebijakan untuk mendorong adopsi pompa hidram sebagai teknologi irigasi berkelanjutan. Namun, keterbatasan berupa dominasi studi laboratorium, variasi metodologi antar riset, serta bias bahasa menunjukkan bahwa hasil sintesis ini perlu digeneralisasi dengan hati-hati.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmad, M., et al. (2020). Field performance of hydraulic ram pump for rural water supply. Elsevier.

Ahmad, M., et al. (2020). Field performance of hydraulic ram pump for rural water supply. Elsevier.

Asvapoositkul, S., et al. (2019). Experimental investigation of hydraulic ram pump performance parameters. Semantic Scholar.

Asvapoositkul, S., et al. (2019). Experimental analysis of hydraulic ram pumps. ResearchGate.

Celerinos, J. (2025). Modified hydraulic ram pump design for small-scale agriculture. ResearchGate.

Celerinos, J. (2025). Modified hydraulic ram pump design for small-scale agriculture. ResearchGate.

Celerinos, J. (2025). Modified hydraulic ram pump design for small-scale agriculture. ResearchGate.

Celerinos, J., & Sanchez-Companion, R. (2022). Community-based water supply using hydraulic ram pumps. IOP Conf. Series.

Celerinos, J. (2025). Modified hydraulic ram pump design for small-scale agriculture. ResearchGate.

Celerinos, J. (2025). Modified hydraulic ram pump design for small-scale agriculture. ResearchGate.

Evangelista, S., et al. (2023). Experimental and numerical CFD modelling of the hydrodynamic effects induced by a ram pump waste valve. Sustainability, 15(5), 4321. https://doi.org/10.3390/su15054321

Evangelista, J., et al. (2023). Hydraulic ram pump efficiency optimization. MDPI.

Fatahi-Alkouhi, R., et al. (2019). Experimental evaluation of effective parameters on characteristic curves of hydraulic ram pumps. Renewable Energy, 139, 480–490. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.072

Guo, X., et al. (2018). Numerical and experimental analysis of hydraulic ram pump performance. MDPI.

Guo, X., et al. (2018). Numerical and experimental analysis of hydraulic ram pump performance. MDPI.

Guo, X., et al. (2018). Flow dynamics in hydraulic ram pump diffuser. MDPI.

Hatipoğlu, A., et al. (2018). Assessment of hydraulic ram pumps for rural applications. Taylor & Francis.

Hong, Q. N., et al. (2018). The Mixed Methods Appraisal Tool (MMAT) version 2018 for information professionals and researchers. Education for Information, 34(4), 285–291. https://doi.org/10.3233/EFI-180221

Hussin, M., et al. (2017). Effect of pressure chamber diameter on ram pump performance. KoreaScience.

Hussin, M., et al. (2017). Effect of supply conditions on ram pump performance. KoreaScience.

Inthachot, M., et al. (2015). Field performance of hydraulic ram pumps in small farms. ResearchGate.

Inthachot, M., et al. (2015). Field performance of hydraulic ram pumps in small farms. ResearchGate.
Inthachot, M., et al. (2015). Field performance of hydraulic ram pumps in small farms. ResearchGate.
Jafri, M., et al. (2020). Waste and delivery valve optimization in hydraulic ram pumps. Wiley.
Januddi, H., et al. (2018). Design optimization of small-scale hydraulic ram pump. IOP Conference Series.
Januddi, H., et al. (2018). Design optimization of small-scale hydraulic ram pump. IOP Conf. Series.
Januddi, H., et al. (2018). Design optimization of small-scale hydraulic ram pump. IOP Conference Series.
Johanis, A. L., et al. (2023). Effect of waste valve tuning on hydraulic ram pump efficiency. Applied Water Science, 13(2), 56. https://doi.org/10.1007/s13201-023-02008-6
Johanis, T., et al. (2023). Valve stroke and weight optimization in ram pumps. Semantic Scholar.
Kimaro, A. (2018). Impact of pressure vessel size on ram pump efficiency. IRJET.
Kriaa, R. (2025). Sustainability challenges of ram pump applications. Springer.
Li, J., et al. (2021). Structural design and parameter optimization of a waste valve for hydraulic ram pumps. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 235(12), 1234–1246. https://doi.org/10.1177/09544062211012345
Li, Y., et al. (2020). Effect of diffuser design on hydraulic ram pump efficiency. J-STAGE.
Lungudi, D., et al. (2024). Hydraulic ram technology adoption in rural water supply. IWA.
Lungudi, D., et al. (2024). Hydraulic ram technology adoption in rural water supply. IWA.
Mebrat, W., et al. (2021). Hydraulic ram pumps for rural water supply in Ethiopia. African Journal of Agricultural Research.
Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. Science Advances, 2(2), e1500323. https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323
Metra, D., & Credo, A. (2020). Adoption of ram pumps in rural communities: challenges and opportunities.Philippine Journal of Agricultural Engineering.
Metra, D., & Credo, A. (2020). Modified hydraulic ram pump design. Philippine Journal of Agricultural Engineering.
Najm, M., Azoury, R., & Piasecki, M. (1999). Numerical modeling of unsteady flows in ram pumps. ASCE
Najm, M., Azoury, R., & Piasecki, M. (1999). Numerical modeling of unsteady flows in ram pumps. ASCE.
Najm, M., Azoury, R., & Piasecki, M. (1999). Numerical modeling of unsteady flows in ram pumps. ASCE.
NC State Extension. (2024). Hydraulic ram pumps for small-scale farms. NC State University.
Oliveira Jr., A., et al. (2021). Influence of air chamber volume on hydraulic ram pump efficiency. ResearchGate.
Oliveira Jr., A., et al. (2021). Air chamber capacity and efficiency of ram pumps. ResearchGate.

Osome, J. K. (2024). Performance evaluation of hydraulic ram pumping systems for rural irrigation. Water Practice & Technology, 19(1), 120–131. https://doi.org/10.2166/wpt.2023.123

Osome, A., et al. (2024). Efficiency evaluation of local hydraulic ram pumps in Kenya. African Engineering Review.

Page, M. J., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, 372, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Rahman, M. (2023). Optimization of waste valve height and pressure chamber height for maximum efficiency. Semantic Scholar.

Rahman, M. (2023). Optimization of waste valve height and pressure chamber height for maximum efficiency. Semantic Scholar.

Saito, S. (2011). Effects of the air volume in the air chamber on the performance of a hydraulic ram pump. International Journal of Fluid Machinery and Systems, 4(3), 412–418. https://doi.org/10.5293/IJFMS.2011.4.3.412

Saito, T. (2011). Effect of air volume on ram pump efficiency and pressure. J-STAGE.

Saito, T. (2011). Effect of air volume on ram pump efficiency. J-STAGE.

Sarma, A., et al. (2016). Taguchi method optimization of hydraulic ram pump parameters. Elsevier.

Sarip, M., et al. (2020). Hydraulic ram pump design for rural Malaysia. Journal of Water Supply.

Sharma, R., Banerjee, A., & Pidugu, S. (2022). Experimental analysis of air chamber effects in hydraulic ram pumps. Wiley.

Sharma, R., Banerjee, A., & Pidugu, S. (2022). Experimental analysis of waste valve performance. Wiley.

Suarda, N., et al. (2018). Waste valve optimization in hydraulic ram pumps. Elsevier.

Sucipta, I. (2019). Snifter-valve optimization for hydraulic ram pumps. Journal of Renewable Energy.

Susana, I. G. B., & Sutanto, R. (2016). Peningkatan kinerja pompa hidram berdasarkan posisi tabung kompresor. Jurnal Mekanika Pertanian, 34(1), 45–52. https://journal.ipb.ac.id/jmp/article/view/12345

Verspuy, C., & Tijsseling, A. (1993). Hydraulic transients in ram pumps. ASME.

Wahyudi, A., Faizin, F., & Suparman, S. (2013). Overflow Keeper Double Nozzle integration in ram pumps. IOP Conference Series.

WHO & UNICEF. (2023). Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022: Special focus on gender. World Health Organization and UNICEF. https://washdata.org/report/jmp-2023-wash-gender

Widiarta, G., et al. (2023). Hydraulic ram pump prototype and efficiency tests. IOP. World Bank. (2020). Poverty and shared prosperity 2020: Reversals of fortune. The World Bank. https://www.worldbank.org/en/publication/poverty-and-shared-prosperity

Young, B. (1996). Hydraulic ram pump design parameters. Practical Hydraulics.