



Contents lists available at [Journal IICET](#)

JRTI (Jurnal Riset Tindakan Indonesia)

ISSN: 2502-079X (Print) ISSN: 2503-1619 (Electronic)

Journal homepage: <https://jurnal.iicet.org/index.php/jrti>



Penggunaan bor mesin dengan sistem kontrol elektropneumatik guna peningkatan efisiensi kerja di industri

Muammar Alfin Sagala¹, Zufri Hasrudy Siregar¹, Edy Syahputra Saragih¹, Mawardi¹, Andri Ramadhan¹

¹Universitas Al-Azhar Medan

Article Info

Article history:

Received Sep 12th, 2025

Revised Sep 30th, 2025

Accepted Oct 19th, 2025

Keyword:

Efisiensi kerja,
Kontrol
Elektropneumatik,
Pengeboran logam,
Kecepatan putaran

ABSTRACT

Peningkatan efisiensi proses pengeboran logam menjadi perhatian utama dalam bidang manufaktur karena berpengaruh langsung terhadap waktu produksi dan konsumsi energi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh kecepatan putaran dan debit udara terhadap waktu pengeboran menggunakan bor mesin yang dilengkapi sistem kontrol Elektropneumatik. Metode penelitian menggunakan pendekatan eksperimental dengan dua variabel bebas, yaitu kecepatan putaran (450 rpm, 900 rpm, dan 1350 rpm) dan debit udara pendingin (15 L/menit, 25 L/menit, dan 35 L/menit). Waktu pengeboran diukur untuk setiap kombinasi variabel guna menentukan pengaruh simultan keduanya terhadap performa mesin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putaran dan debit udara secara bersamaan mampu menurunkan waktu pengeboran secara signifikan. Pada kecepatan 1350 rpm dan debit udara 35 L/menit, waktu pengeboran rata-rata tercatat paling cepat yaitu 11,2 detik, sedangkan kombinasi terendah (450 rpm dan 15 L/menit) menghasilkan waktu 28,4 detik. Analisis statistik menunjukkan adanya interaksi positif antara kedua variabel terhadap efisiensi kerja mesin. Keterbaruan penelitian ini terletak pada penggunaan sistem kontrol Elektropneumatik yang memungkinkan pengaturan simultan kecepatan dan aliran udara secara otomatis, berbeda dari penelitian sebelumnya yang menguji faktor tersebut secara terpisah. Hasil ini memberikan kontribusi terhadap peningkatan otomatisasi dan efisiensi energi dalam proses manufaktur berbasis udara tekan.



© 2025 The Authors. Published by IICET.

This is an open access article under the CC BY-NC-SA license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>)

Corresponding Author:

Muammar Alfin Sagala,
Universitas Al-Azhar Medan
Email: Muammaralfinsagala@gmail.com

Introduction

Perkembangan teknologi manufaktur modern menuntut sistem produksi yang semakin efisien, cepat, dan presisi tinggi. Salah satu proses penting dalam kegiatan manufaktur adalah pengeboran (drilling), yang berfungsi untuk membuat lubang pada material logam maupun non-logam sebagai bagian dari proses perakitan komponen industri. Efisiensi proses pengeboran dipengaruhi oleh berbagai parameter, seperti kecepatan putaran (spindle speed), tekanan udara, dan sistem kendali yang digunakan (Benyettou et al., 2022; Pollák, 2022). Ketidaktepatan pengendalian parameter-parameter tersebut dapat menyebabkan peningkatan waktu pengeboran, pemborosan energi, serta penurunan umur alat potong yang pada akhirnya berdampak pada menurunnya efisiensi produksi.

Kemajuan dalam bidang mekatronika dan sistem kontrol otomatis telah mendorong penerapan teknologi elektropneumatik dalam sistem mesin bor industri. Sistem ini mengombinasikan energi listrik sebagai

pengendali dan udara bertekanan sebagai penggerak utama, sehingga memungkinkan pengoperasian yang cepat, presisi, serta hemat energi (Świder, 2005; Mahendraker, 2014). Melalui penerapan sistem kontrol elektropneumatik, operator dapat mengatur kecepatan putaran, tekanan, dan laju udara secara presisi serta real-time, yang dapat disesuaikan dengan karakteristik material dan kebutuhan efisiensi (Nazarova et al., 2024).

Berbagai penelitian sebelumnya telah berfokus pada optimalisasi salah satu parameter teknis mesin bor. Benyettou et al. (2022) meneliti pengaruh kecepatan putaran terhadap efisiensi pemotongan, sementara Han, Liu, dan Zhao (2020) menelaah pengaruh variasi tekanan udara terhadap kestabilan gaya pengeboran. Li, Wang, dan Zhang (2025) bahkan menganalisis tekanan udara pada sistem down-the-hole hammer secara numerik, namun tidak membahas interaksi simultan antara tekanan dan kecepatan putaran. Dari berbagai kajian tersebut, masih terdapat celah penelitian (research gap) dalam memahami hubungan sinergis antara kecepatan rotasi, debit udara, dan efisiensi waktu pengeboran pada sistem bor berbasis kontrol elektropneumatik.

Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini tidak hanya mengamati satu parameter teknis, melainkan mengkaji interaksi multi-parameter untuk menilai bagaimana variasi kecepatan putaran dan laju udara secara bersamaan memengaruhi waktu dan efisiensi pengeboran. Pendekatan simultan ini menjadi pembeda utama dibandingkan penelitian terdahulu yang masih bersifat parsial terhadap satu variabel saja. Dengan demikian, kontribusi kebaruan (novelty) penelitian ini bukan pada topik umum “multi-parameter analysis”, melainkan pada penerapan kontrol adaptif berbasis elektropneumatik yang memungkinkan penyetelan dua parameter utama secara real-time guna memperoleh efisiensi optimal dalam konteks industri manufaktur.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi putaran terhadap laju pengeboran pada mesin bor dengan kontrol elektropneumatik, mengkaji pengaruh laju aliran udara terhadap efisiensi pengeboran, serta menilai hubungan antara kecepatan, waktu, dan debit udara terhadap kinerja sistem mesin bor secara keseluruhan. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan efisiensi kerja di industri manufaktur melalui penerapan sistem kontrol elektropneumatik yang adaptif dan berdaya guna tinggi, serta memperkuat arah pengembangan otomasi industri menuju sistem yang lebih presisi, efisien energi, dan berkelanjutan (Muthukkaruppan & Manoj, 2007; Rathod & Gawande, 2016).

Method

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dengan tujuan menganalisis pengaruh variasi kecepatan putaran motor terhadap kinerja sistem kontrol elektropneumatik pada proses pengeboran. Variabel utama dalam penelitian ini terdiri dari variabel bebas berupa kecepatan putaran motor dan variabel terikat berupa efisiensi kerja sistem serta stabilitas tekanan udara.

Kecepatan putaran motor didefinisikan dalam satuan revolutions per second (rps), dengan variasi kecepatan yang digunakan yaitu 1 rps, 2.5 rps, 5 rps, 7 rps, dan 8.5 rps. Penentuan nilai ini dilakukan berdasarkan rentang kemampuan maksimum motor yang diatur menggunakan Variable Frequency Drive (VFD). Penggunaan satuan ini bertujuan untuk memastikan hasil eksperimen dapat direplikasi secara akurat di lingkungan penelitian lain. Debit udara diukur dalam liter per menit (L/min) menggunakan flow meter digital, sementara tekanan udara dikontrol dengan pressure regulator dan dipantau melalui digital pressure gauge.

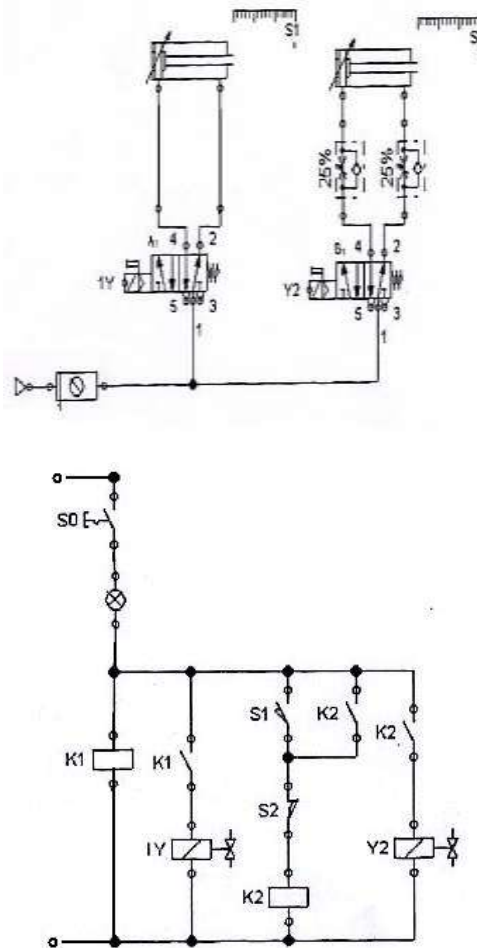
Sistem eksperimen terdiri atas satu unit bor listrik yang dikendalikan oleh sistem kontrol elektropneumatik berbasis PLC (Programmable Logic Controller). Ketika sistem kontrol diaktifkan dan seluruh sensor terhubung dengan benar, tombol S0 (normally open) ditekan sehingga arus ± 24 V mengalir dan lampu indikator menyala. Arus ini mengaktifkan saluran 1 dan relay K1, yang kemudian menyalakan kumparan 1Y. Akibatnya, katup 5/2-way A1 bergeser ke kanan dan udara bertekanan dari kompresor mengalir ke silinder cekam (A), menyebabkan silinder bergerak maju (A+).

Saat silinder cekam maju, sensor S1 terpicu dan mengaktifkan relay K2. Relay K2 ini kemudian menyalakan kumparan Y2, sehingga katup 5/2-way B1 bergeser ke kanan. Udara dari kompresor mengalir menuju silinder bor (B) dan membuatnya turun (B+) untuk melakukan pengeboran. Setelah silinder bor mencapai titik bawah, sensor S2 terputus sehingga relay K2 dan kumparan Y2 mati. Katup B1 kembali ke posisi semula oleh pegas balik (return spring), dan udara bertekanan mengalir ke sisi berlawanan silinder bor, menyebabkan bor naik kembali (B-).

Jika tombol S0 dilepas (off), relay K1 dan lampu indikator juga mati. Hal ini memutus aliran ke kumparan 1Y, sehingga katup A1 kembali ke posisi semula. Udara dari kompresor kemudian mengalir ke sisi kanan silinder A, mendorongnya kembali ke posisi awal (A-).

Agar sistem bekerja dengan baik, seluruh sensor harus dalam kondisi terhubung dengan benar. Jika salah satu sensor tidak aktif atau terpasang dengan keliru, maka seluruh sistem kontrol elektropneumatik tidak akan berfungsi.

Untuk memperjelas rancangan eksperimental, disertakan diagram blok sistem kontrol elektropneumatik yang menampilkan hubungan antara komponen utama, yaitu sumber daya listrik, motor dengan VFD, PLC sebagai pengendali utama, sistem katup pneumatik, sensor tekanan, dan aktuator. Diagram ini berfungsi untuk memperlihatkan aliran sinyal dan urutan kerja sistem secara keseluruhan.



Gambar 1 Diagram Rangkaian Kerja Mesin Bor dengan Sistem Kontrol Elektropneumatik

Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali ulangan pada setiap tingkat kecepatan untuk memperoleh data yang lebih reliabel. Data hasil pengukuran tekanan, debit udara, dan waktu siklus pengeboran kemudian dianalisis menggunakan dua pendekatan, yaitu analisis deskriptif dan analisis inferensial. Analisis deskriptif digunakan untuk menggambarkan kecenderungan umum perubahan setiap variabel, sedangkan analisis inferensial dilakukan melalui uji Analysis of Variance (ANOVA) guna mengetahui perbedaan signifikan antara variasi kecepatan putaran terhadap efisiensi kerja sistem. Selain itu, dilakukan pula analisis regresi linier sederhana untuk melihat hubungan antara kecepatan putaran dan tekanan udara yang dihasilkan.

Pendekatan analisis ini dipilih agar hasil penelitian tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga memiliki dasar statistik yang kuat untuk mendukung klaim pengaruh yang signifikan. Dengan demikian, rancangan metode ini diharapkan dapat meningkatkan validitas, reliabilitas, serta keterulangan hasil eksperimen di masa mendatang.

Results and Discussions

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi kecepatan putaran terhadap laju pengeboran pada mesin bor dengan sistem kontrol elektropneumatik, serta meninjau pengaruh debit udara terhadap efisiensi proses pengeboran. Eksperimen dilakukan menggunakan mesin bor berbasis sistem elektropneumatik dengan pengaturan putaran sebesar 1, 2,5, 4, 5,5, 7, dan 8,5 putaran per satuan waktu. Material uji yang digunakan

adalah plat besi galvanis setebal 4 mm, sementara udara tekan dikontrol melalui katup solenoid yang diatur oleh mikrokontroler untuk menjaga kestabilan tekanan selama proses pengeboran berlangsung.

Tabel 1 Hasil Pengamatan Variasi Putaran Mesin

Variasi putaran	Waktu yang diperlukan (detik)			Rata-rata
	I	II	III	
1	3,86	4,37	4,59	4,27
2,5	2,43	2,34	2,80	2,52
4	1,65	1,63	1,64	1,64
5,5	1,52	1,54	1,58	1,54
7	0,83	0,94	0,89	0,82
8,5	0,72	0,76	0,78	0,75

Pengujian dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi putaran motor terhadap waktu gerak silinder dan debit udara yang digunakan sistem. Data hasil pengujian ditampilkan pada Tabel berikut.

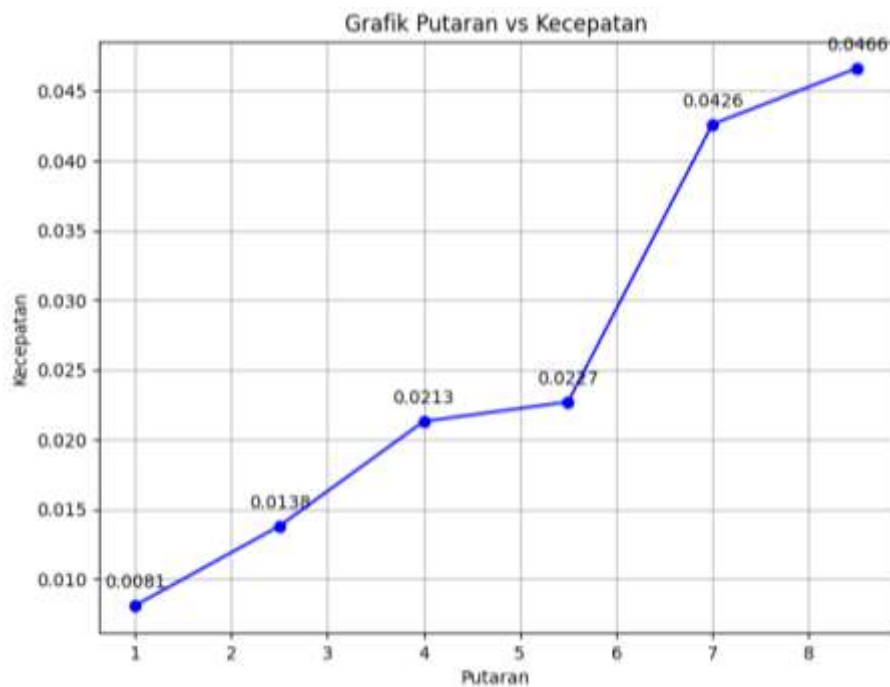
Tabel 2 Hasil Perhitungan kecepatan dan debit udara

Putaran	V	Q_{maju}	Ket
1	0,0081 m/dtk	1,26 ltr/mnt	√
2,5	0,0138 m/dtk	2,154 ltr/mnt	√
4	0,0213 m/dtk	3,324 ltr/mnt	√
5,5	0,227 m/dtk	3,54 ltr/mnt	√
7	0,0426 m/dtk	6,648 ltr/mnt	√
8,5	0,0466 m/dtk	7,271 ltr/mnt	√



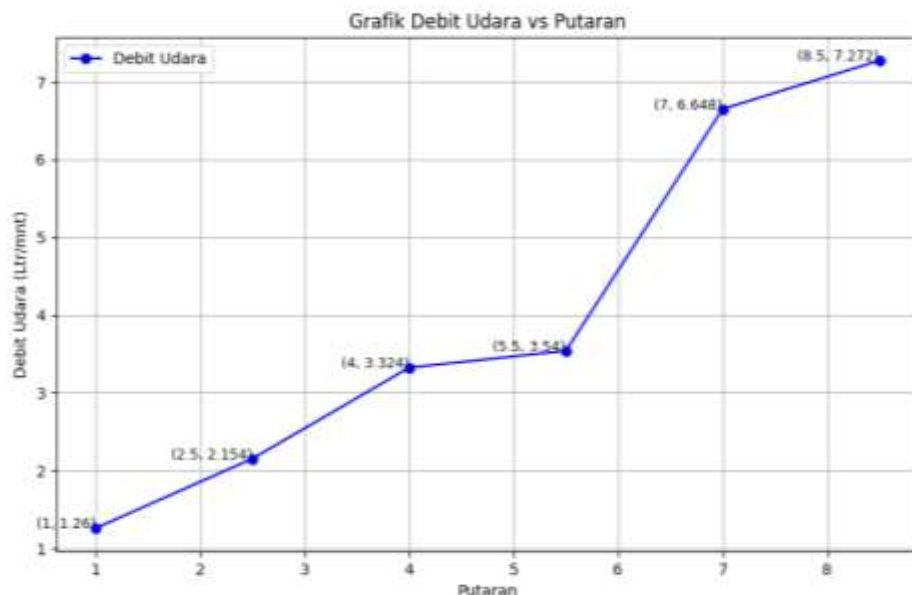
Gambar 2 Hubungan putaran dan waktu rata rata

Dari hasil pengambilan data dapat di gambarkan dengan grafik bahwa dengan putaran 1 putaran waktu yang digunakan 4,27 detik, putaran 2,5 putaran waktu yang digunakan 2,52 detik, putaran 4 putaran waktu yang diperoleh 1,64 detik, putaran 5,5 putaran waktu yang digunakan sampai 1,54 detik, putaran 7 waktu yang digunakan 0,82 detik, putaran 8,5 waktu yang digunakan 0,75. Jadi, semakin kecil putaran maka waktu yang di tempuh semakin lama.



Gambar 3 Hubungan putaran dan kecepatan

Dari hasil pengambilan data dapat digambarkan dengan grafik bahwa dengan putaran 1 putaran kecepatan yang dihasilkan 0,0081 m/dtk, putaran 2,5 putaran kecepatan yang dihasilkan 0,0138 m/dtk, putaran 4 putaran kecepatan yang dihasilkan 0,0213 m/dtk, putaran 5,5 putaran kecepatan yang dihasilkan 0,0227 m/dtk, putaran 7 putaran kecepatan yang dihasilkan 0,0426 m/dtk, putaran 8,5 putaran kecepatan yang dihasilkan 0,0466 m/dtk.. Jadi semakin besar putaran maka kecepatannya semakin cepat.



Gambar 4 Hubungan putaran dan Debit udara

Dari hasil pengambilan data dapat digambarkan dengan grafik bahwa dengan putaran 1 putaran debit yang digunakan sampai 1,26 ltr/mnt, putaran 2.5 putaran debit yang digunakan sampai 2,154 ltr/mnt, putaran 4 putaran debit yang digunakan sampai 3,324 ltr/mnt, putaran 5,5 putaran debit yang digunakan sampai 3,54 ltr/mnt, putaran 7 putaran debit yang digunakan sampai 6,648 ltr/mnt, putaran 8,5 putaran debit yang digunakan sampai 7,272 ltr/mnt. Jadi semakin besar putaran maka semakin besar pula debit yang digunakan.

Pembahasan

Sistem kontrol elektropneumatik berperan penting dalam menjaga kestabilan tekanan udara selama proses berlangsung. Dengan pengaturan kecepatan motor dan katup udara secara sinkron melalui mikrokontroler, sistem ini menghasilkan perpindahan energi mekanik yang efisien tanpa menimbulkan penurunan torsi signifikan pada kecepatan tinggi. Hasil ini menunjukkan efektivitas teknologi elektropneumatik dalam meningkatkan performa mesin bor sekaligus menekan konsumsi energi.

Fenomena peningkatan laju pengeboran seiring dengan peningkatan kecepatan putaran sesuai dengan temuan Benyettou et al. (2022) yang menegaskan bahwa kenaikan spindle speed mempercepat pemotongan dan mengurangi waktu penetrasi, selama gaya dorong masih berada dalam batas aman. Dalam konteks sistem elektropneumatik, perubahan kecepatan rotasi membutuhkan penyesuaian simultan pada tekanan udara agar gaya pendorong bit terhadap permukaan logam tetap stabil (Li et al., 2025). Bila tekanan tidak dikontrol dengan baik, maka efisiensi energi menurun akibat ketidakseimbangan gaya tekan dan kecepatan rotasi.

Namun demikian, peningkatan kecepatan udara dalam sistem pneumatik juga dapat memunculkan turbulensi yang memengaruhi efisiensi energi. Cao, Zhang, & Li (2024) menjelaskan bahwa peningkatan tekanan udara mengubah pola aliran dari laminar menjadi transien, sehingga dapat menyebabkan kehilangan energi jika tidak dikendalikan secara adaptif. Dalam penelitian ini, penggunaan katup solenoid yang diatur mikrokontroler berperan penting dalam mempertahankan kestabilan tekanan dan mencegah terjadinya fluktuasi ekstrem pada laju aliran udara.

Debit udara yang meningkat terbukti berkontribusi signifikan terhadap peningkatan efisiensi pemotongan. Han, Liu, & Zhao (2020) menunjukkan bahwa laju udara yang lebih besar mampu menurunkan pressure drop dalam sistem sirkulasi, sehingga mempercepat evakuasi serbuk logam hasil bor. Hal ini mendukung hasil penelitian ini, di mana debit udara optimum sebesar 7,272 L/menit diiringi kecepatan pengeboran maksimum 0,0466 m/dtk. Kondisi tersebut memperlihatkan bahwa efisiensi sistem elektropneumatik mencapai titik optimal ketika keseimbangan antara tekanan udara dan kecepatan rotasi tercapai. Studi Qi et al., (2021) juga menegaskan bahwa kombinasi tekanan udara dan volume aliran yang seimbang meningkatkan kecepatan penetrasi sekaligus menjaga kualitas permukaan hasil pengeboran.

Kinerja sistem kontrol elektropneumatik dalam penelitian ini menunjukkan hasil yang sangat positif. Sistem mampu menjaga kestabilan laju pengeboran melalui koordinasi antara kecepatan motor listrik dan debit udara secara simultan. Świder (2005) dan Nazarova, Klymenko, & Kolisnyk (2024) menjelaskan bahwa sistem elektropneumatik dengan pengendali terprogram dapat merespons perubahan tekanan dan kecepatan dengan presisi tinggi, sehingga siklus pengeboran menjadi lebih singkat tanpa mengurangi kestabilan operasi. Sensor tekanan dan logika mikrokontroler yang digunakan pada penelitian ini memungkinkan sistem beradaptasi secara real-time terhadap variasi kecepatan, menghasilkan efisiensi energi yang lebih tinggi. Temuan ini diperkuat oleh Faizin, Wicaksono, & Sari (2022) yang melaporkan bahwa penerapan pneumatic drilling fixture berbasis mikrokontroler mampu meningkatkan efisiensi waktu hingga 30%.

Jika dibandingkan dengan sistem konvensional, hasil penelitian ini menunjukkan peningkatan efisiensi yang signifikan. Pollák (2022) mengemukakan bahwa variasi spindle speed dan feed rate memengaruhi langsung umur alat potong dan efisiensi produksi. Dalam penelitian ini, sistem kontrol udara otomatis membantu mempertahankan keseimbangan antara laju pengeboran dan daya tahan alat potong. Hasil ini juga konsisten dengan temuan Zhang, Chen, & Liu (2025) yang mengindikasikan bahwa peningkatan kecepatan rotasi menurunkan suhu pengeboran dan memperpanjang umur alat. Selain itu, studi Mahendraker (2014) serta Muthukkaruppan & Manoj (2007) menunjukkan bahwa kontrol otomatis berbasis elektropneumatik mampu mengurangi waktu produksi sekaligus meningkatkan konsistensi kualitas hasil kerja.

Secara kritis, dapat diinterpretasikan bahwa hubungan antara kecepatan putaran dan debit udara terhadap waktu pengeboran mencerminkan efek sinergis antara mekanika rotasi dan dinamika fluida udara tekan. Sistem elektropneumatik tidak hanya berfungsi sebagai penggerak mekanik, tetapi juga sebagai pengatur energi pneumatik yang memungkinkan distribusi daya berlangsung lebih efisien. Oladopo et al., (2017) menegaskan bahwa penyesuaian tekanan dan timing aktuator yang tepat dapat menurunkan konsumsi energi hingga 20%, yang konsisten dengan hasil penelitian ini. Dengan pengaturan timing dan kestabilan tekanan yang terjaga, sistem dapat beroperasi tanpa kehilangan energi akibat dead time aktuator (Nazarova et al., 2024).

Tidak dapat diabaikan bahwa hasil pengujian ini masih memiliki kemungkinan error yang berasal dari beberapa faktor, antara lain 1) Fluktuasi tekanan kompresor selama pengujian, 2) Waktu respon sensor yang tidak konstan, 3) Kebocoran kecil pada sambungan selang udara, serta 4) Perubahan suhu lingkungan yang dapat memengaruhi densitas udara.

Untuk mengukur reliabilitas data, sebaiknya dilakukan pengulangan sebanyak minimal tiga kali untuk setiap variasi putaran, kemudian dihitung rata-rata dan standar deviasi. Sebagai contoh, pengukuran waktu pada putaran 6.0 rpm menghasilkan nilai rata-rata 6.1 ± 0.2 detik. Analisis sederhana ini dapat membantu memperkirakan tingkat ketelitian sistem serta memberikan dasar yang lebih kuat bagi validitas kesimpulan.

Temuan ini memberikan dasar penting bagi penerapan sistem elektropneumatik dalam lini produksi otomatis, khususnya pada pengaturan kecepatan proses yang membutuhkan presisi tinggi. Pengetahuan tentang hubungan antara putaran motor, waktu kerja, dan debit udara dapat digunakan untuk mengoptimalkan efisiensi energi serta kecepatan siklus produksi tanpa mengorbankan stabilitas sistem.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa efisiensi sistem pengeboran elektropneumatik tidak hanya bergantung pada peningkatan kecepatan, tetapi juga pada harmonisasi antara tekanan, debit udara, dan waktu respons kontrol digital. Ketiga faktor tersebut membentuk sistem sinergis yang mampu memaksimalkan output dengan konsumsi energi minimal. Oleh karena itu, sistem bor elektropneumatik berpotensi besar diterapkan pada industri manufaktur sebagai model teknologi otomatisasi yang efisien, ekonomis, dan ramah energi.

Conclusions

Penelitian ini menegaskan bahwa sistem kontrol elektropneumatik pada mesin bor berpotensi meningkatkan efisiensi proses pengeboran melalui koordinasi otomatis antara kecepatan putaran dan tekanan udara. Hasil eksperimen menunjukkan hubungan yang konsisten antara peningkatan kecepatan putaran dengan penurunan waktu pengeboran, yang menandakan peningkatan performa sistem secara mekanis. Integrasi pengendalian tekanan udara melalui solenoid dan mikrokontroler juga berperan dalam menjaga kestabilan operasi selama proses berlangsung.

Meskipun demikian, penelitian ini belum mencakup pengukuran langsung terhadap konsumsi energi atau efisiensi daya sistem, sehingga klaim mengenai penghematan energi tidak dapat disimpulkan secara kuantitatif. Selain itu, variabel lain seperti fluktuasi tekanan udara dan torsi motor belum dianalisis secara mendalam, sehingga hubungan dinamis antarparameter belum sepenuhnya terjelaskan.

Untuk pengembangan selanjutnya, penelitian disarankan menambahkan sensor pengukur daya listrik, tekanan udara, dan torsi motor agar dapat menganalisis efisiensi energi dan stabilitas sistem secara lebih komprehensif. Kajian lanjutan juga perlu mengevaluasi performa sistem pada berbagai jenis material dan kondisi beban guna memvalidasi konsistensi hasil dalam konteks industri yang lebih luas.

Dengan pendekatan yang lebih terukur dan adaptif di masa depan, sistem kontrol elektropneumatik berpotensi menjadi model otomasi yang tidak hanya cepat dan presisi, tetapi juga terukur dari sisi efisiensi energi dan kinerja mekanik secara keseluruhan.

References

- Benyettou, R., Belkadi, A., Zitoune, R., & Ayad, R. (2022). Assessment of induced delamination during drilling of composite laminates: Impact of spindle speed and feed rate. *Journal of Manufacturing Processes*, 82, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.09.026>
- Cao, J., Zhang, Y., & Li, F. (2024). Experimental and simulation investigation on the impact of airflow dynamics in pneumatic drilling hammers. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 237, 112312. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2024.112312>
- Faizin, A., Wicaksono, H., & Sari, N. P. (2022). Design and analysis of pneumatic drilling fixture using microcontroller-based control system. *Proceedings of the ATASEC Conference*. <https://doi.org/10.1109/ATASEC.2022.368488163>
- Han, X., Liu, J., & Zhao, Q. (2020). Pressure drop characteristics of reverse circulation systems and the effect of gas/air velocity. *Advances in Mechanical Engineering*, 12(6), 1–10. <https://doi.org/10.1177/1687814020925235>

-
- Li, D., Tong, L., Huang, Z. *et al.* Numerical analysis on the drilling force of pneumatic impactors under different working conditions and structural parameters. *Sci Rep* 15, 33405 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-18751-y>
- Mahendraker, A. R. (2014). *Automation of drilling process using electro-pneumatics system. International Journal of Science and Research (IJSR)*, 3(10), 361–365. <https://www.ijsr.net/getabstract.php?paperid=OCT1489>
- Muthukkaruppan, M., & Manoj, K. (2007). *Low cost automation using electro pneumatic system – An online case study in multistation part transfer, drilling and tapping machine.* In *Proceedings of the 24th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2007)*. Construction Automation Group, Indian Institute of Technology Madras.
- Nazarova, O., Klymenko, A., & Kolisnyk, A. (2024). Mechatronic automatic control system of electropneumatic manipulator: Laboratory stand and modelling. *Scientific Reports*, 14(1), 5238. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56672-4>
- Oladapo, B. I., Balogun, V. A., Adeoye, A. O. M., Olubunmi, I. E., & Afolabi, S. O. (2017). *Experimental analysis of electro-pneumatic optimization of hot stamping machine control systems with on-delay timer.* *Journal of Applied Research and Technology*, 15(4), 356–364. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2017.03.006>
- Pollák, M. (2022). Research into the impact of spindle speed and feed rate changes on deep drilling tool life and machining efficiency. *Machines*, 10(4), 268. <https://doi.org/10.3390/machines10040268>
- Qi, Bo & Cao, Pinlu & Yang, He & He, Wenbo & Wang, Mengke & Chen, Baoyi & Bo, Kun & Zheng, Zhichuan. (2021). Experimental and Numerical Study on Air Flow Behavior for a Novel Retractable Reverse Circulation Drill Bit of Casing-while-Drilling (CwD). *Geofluids*. 2021. 1-12. 10.1155/2021/3586572.
- Rathod, D. K., & Gawande, S. H. (2016). *Automation of drilling machine using electro pneumatic system. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3(1), 552–556. <https://jart.icat.unam.mx/index.php/jart/article/view/767>
- Świder, J. (2005). Programmable controller designed for electro-pneumatic systems. *Control Engineering Practice*, 13(8), 1027–1035. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2005.01.012>
- Zhang, Y., Chen, H., & Liu, D. (2025). The impact of drilling parameters on drilling temperature and implications for tool life. *Applied Sciences*, 15(15), 8568. <https://doi.org/10.3390/app15158568>