



## **Analisis Perubahan Sinyal *Pneumatic to Electric* Menggunakan Algoritma Fuzzy Logic**

**Alyadris Jerri<sup>1</sup>, Adrianus Inu Natalisanto<sup>1,\*</sup>, Ahmad Zarkasi<sup>1</sup>, Syahrir<sup>1</sup>, Kholis Nurhanafi<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Program Studi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Mulawarman*

*Jl. Barong Tongkok No 4 Kampus Gunung Kelua, Samarinda, Kalimantan Timur 75123 Indonesia*

\*E-mail korespondensi: [adrianus.inu@gmail.com](mailto:adrianus.inu@gmail.com)

---

### **Abstract**

Control valve is a tool in the oil and gas industry that works by relying on actuators as a driving force. For example, pneumatic actuators work with air pressure as driving energy, and standard signals are used for pneumatic. The signal is converted into a current signal using fuzzy as an application of artificial intelligence systems in the industrial sector. The method used in this study is the utilization of fuzzy logic with the Mamdani method using the software MATLAB. The results will be compared with data from companies and P/I simulation data. Pressure pneumatic algorithm system fuzzy by paying attention to the range of signals used. Company data and P/I converter simulation data are not much different, but the line equation obtained is slightly different. Meanwhile, the fuzzy logic data has slightly different data from the previous data caused by the rules of the fuzzy. Thus, the use of fuzzy logic pressure pneumatic signals to flow signals can be said to be quite capable of being used in these systems by paying attention to the range of signals and rules needed. The comparison results that have been tested have data results that are not much different based on the difference in the value of the current signal and the error value obtained below 2.5%.

**Keywords: Current, Fuzzy Logic, Pneumatic Signal**

---

### **PENDAHULUAN**

Berkembangnya teknologi diakibatkan oleh perubahan zaman dan variasi kebutuhan terutama pada bidang industri minyak dan gas bumi. *Control valve* merupakan salah satu alat yang digunakan dalam bidang tersebut mengandalkan aktuator sebagai tenaga penggerak. Contohnya aktuator *pneumatic* atau *valve pneumatic*, aktuator ini bekerja dengan tekanan udara sebagai energi penggerak dan sinyal *pneumatic* sebagai sinyal standar yang digunakan sebesar 3-15 psi. Dengan menambahkan perangkat *I/P converter*, maka *valve* tersebut menjadi *valve electric*. *Valve electric* menggunakan sinyal elektrik sebesar 4-20 mA, dimana terdapat perubahan besaran dari *pneumatic to electric* dengan skala antara 0% hingga 100%. Dari hal tersebut, dapat digunakan algoritma *fuzzy logic* untuk memprediksi terbuka dan tertutupnya *control valve* itu sendiri [1].

*Fuzzy logic* merupakan suatu nilai logika yang berhubungan dengan penalaran manusia. Hal ini dibandingkan dengan himpunan biner dalam variabel *fuzzy logic* memiliki nilai kebenaran antara 0 dan 1. Penggunaannya telah meluas dalam menangani konsep dari

kebenaran parsial yang memiliki nilai kebenaran antara sepenuhnya benar dan sepenuhnya salah. Selain itu, *fuzzy logic* telah diterapkan pada banyak bidang seperti teori kontrol sampai kecerdasan buatan [2]. Berdasarkan penelitian terdahulu [3], perencanaan dan pembuatan simulasi konverter tekanan *pneumatic* ke arus dan arus ke tekanan *pneumatic* di *interface*-kan pada IBM PC-XT yang bertujuan untuk mempelajari proses konverter dari tekanan *pneumatic* ke arus dan sebaliknya yang terdapat pada industri pengolahan minyak dan gas bumi. Dari hasil penelitian tersebut dapat diketahui bahwa hubungan arus, tegangan dan tekanan *pneumatic* adalah linier pada daerah operasi 4 mA – 20 mA, 1 Volt – 5 Volt dan 3 psi – 15 psi.

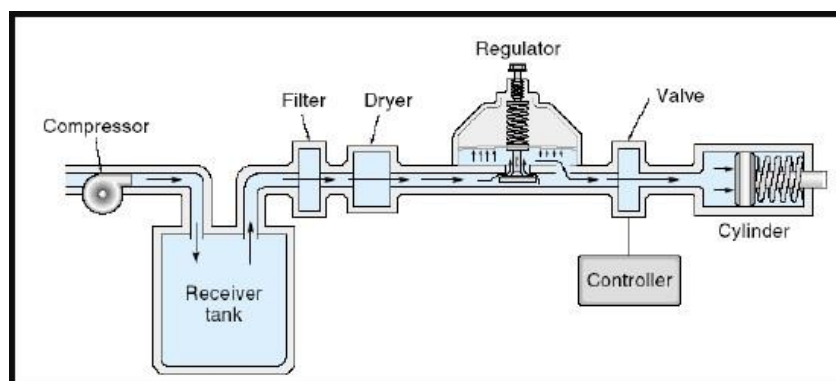
Berdasarkan penjelasan di atas, peneliti tertarik untuk membandingkan perubahan sinyal tekanan *pneumatic* ke sinyal elektrik (arus) dengan simulasi menggunakan *fuzzy logic* terhadap data penelitian terdahulu dan data dari perusahaan dan penerapannya.

## TINJAUAN PUSTAKA

### Sistem *Pneumatic*

*Pneumatic* merupakan suatu sistem penggerak yang menggunakan tekanan udara sebagai sumber penggerak. Cara kerja dari *pneumatic* sendiri memiliki persamaan dengan *hydraulic*, hanya berbeda pada tenaga penggerak. Pada *pneumatic* menggunakan udara sebagai tenaga penggerak, sedangkan *hydraulic* menggunakan cairan oli sebagai tenaga penggerak [3]. Pada sistem *pneumatic* terdapat beberapa komponen penting yang digunakan dalam proses pengaturan (kontrol) dan pengukuran (instrumenasi). Terdapat empat komponen utama, yaitu sensor, *transmitter*, *receiver* dan komponen akhir [4].

*Pneumatic* memiliki fungsi untuk menggerakkan suatu silinder kerja, dimana silinder kerja yang akan mengubah tenaga (tekanan udara) tersebut menjadi tenaga mekanik (gerakan maju dan mundur pada silinder). *Directional valve* atau kutub pengatur arah yang instalasinya berada sebelum aktuaktor, memiliki fungsi untuk mengatur kerja dari aktuaktor dengan mengatur arah aliran fluida yang kerja pada dua atau lebih arah dari aliran serta mampu bekerja secara mekanis atau elektrik, mekanismenya seperti pada Gambar 1 [4].



**Gambar 1. Proses Kerja dari *Pneumatic Valve***

Indikator dalam *pressure transmitter* merupakan pengukur tekanan khusus, yang telah dikalibrasi untuk dibaca dalam satuan tekanan. Rentang tekanan udara yang paling sering digunakan dalam instrumen *pneumatic* industri, yaitu 3-15 psi. Tekanan *output* 3 psi mewakili batas bawah dari skala pengukuran dan tekanan *output* 15 psi mewakili batas atas skala pengukuran. Biasanya, nilai tekanan 3 psi mewakili 0% dari skala dan nilai tekanan 15 psi mewakili 100% dari skala serta nilai tekanan di antara 3-15 psi yang mewakili persentase yang sesuai di antara 0 hingga 100%. Pada Tabel 1 menunjukkan nilai tekanan dan persentase yang sesuai untuk setiap kenaikan 25% antara 0% dan 100% [1].

**Tabel 1. Nilai Tekanan *Pneumatic* dan Persentase**

<i>Pressure value</i>	<i>% of scale</i>
3 psi	0%
6 psi	25%
9 psi	50%
12 psi	75%
15 psi	100%

### **Sinyal Arus Analog**

Sinyal arus merupakan suatu sinyal standar dari sinyal komunikasi instrumen dalam industri berdasarkan standar yang ada dengan skala 4-20 mA. Sinyal tersebut banyak digunakan daripada sinyal tegangan pada sistem pengukuran dan pengendalian dalam industri, sebab sinyal arus memiliki beberapa keunggulan yaitu tahan terhadap *noise*, dapat ditransmisikan secara jarak jauh dan tidak terpengaruh oleh resistansi kabel serta mampu mengenali masalah, contoh putusnya koneksi. Selain itu, keunggulan dari peralatan instrumentasi dengan *output* arus 4-20 mA ini memiliki beberapa karakteristik seperti ketelitian, kelinieran dan presisi [5].

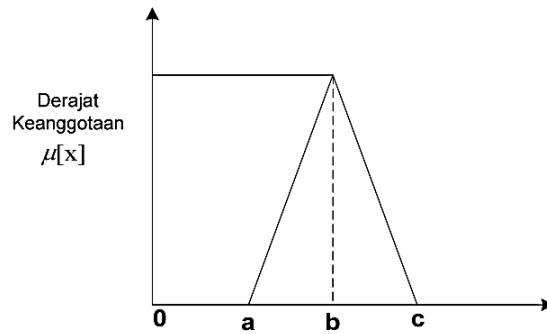
### **Fuzzy Logic**

*Fuzzy logic* ialah generalisasi (abstraksi) dari logika klasik serta menyediakan mekanisme aproksimasi (*approximate reasoning*) dan *inference* (pengambilan keputusan). *Approximate reasoning* merupakan suatu upaya untuk memodelkan pola cara berpikir dan menarik kesimpulan dari manusia, seperti yang telah diketahui bahwa otak manusia mampu melakukan banyak perkiraan untuk mempertimbangkan berdasarkan kriteria persepsi kualitatif dibandingkan pertimbangan akurat yang berdasarkan sejumlah data besar. Suatu pernyataan dapat benar (dengan tingkat tertentu) dan tidak hanya *True or False*, seperti yang dianjurkan oleh logika Boolean, logika yang menjadi dasar dari komputer modern [6].

Metode ini dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah dan mampu untuk mengimplementasikan ke dalam sebuah sistem, seperti sistem yang kecil, sederhana, jaringan PC ataupun sistem kontrol. Logika ini dapat juga diterapkan ke dalam kombinasi perangkat keras dan perangkat lunak serta implementasi sistem dengan menggunakan *fuzzy logic* hal ini juga mudah dipahami dan diterapkan. Dalam penyelesaian masalah, *fuzzy logic* mampu memberikan hasil keputusan yang lebih dekat dengan hasil sebenarnya dengan angka kesalahan yang relatif kecil [7].

### **Dasar Fuzzy Logic**

Pada dasarnya, *fuzzy logic* memiliki fungsi keanggotaan atau *membership function* yang merupakan suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik dari *input* data ke dalam nilai keanggotaannya (derajat keanggotaan) memiliki interval antara 0 hingga 1 atau dapat dinyatakan dalam notasi  $0 \leq \mu \leq 1$ . Fungsi ini dapat dinyatakan dengan dua cara, yaitu secara numerik dan fungsi. Selain fungsi keanggotaan, ada domain. Domain merupakan nilai keseluruhan yang digunakan dalam himpunan *fuzzy*. Salah satunya terdapat fungsi yang merepresentasikan dari fungsi keanggotaan, yaitu representasi kurva segitiga, seperti pada Gambar 2 [8].



**Gambar 2. Fungsi Keanggotaan Kurva Segitiga**

Fungsi keanggotaan kurva segitiga berdasarkan Gambar 2 :

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & ; x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a} & ; a \leq x \leq b \\ 1 & ; b \leq x \leq c \end{cases} \quad (1)$$

Operasi yang dapat didefinisikan secara tertentu untuk mengkombinasi serta memodifikasi himpunan *fuzzy*. Nilai keanggotaan dari hasil operasi tersebut dikenal dengan sebutan *fire strength* atau  $\alpha$ -cut. Terdapat tiga operasi dasar yang dapat digunakan yaitu AND, OR dan NOT [9]. Pada sistem *fuzzy logic* terdapat tahapan-tahapan operasional :

- 1) Fuzzifikasi, suatu proses pengubahan dari *input* atau nilai tegas yang digunakan menjadi nilai fungsi keanggotaan.
- 2) *Rule Base*, inti aturan dari sistem *fuzzy* yang akan digunakan untuk menerapkan suatu aturan yang memiliki alasan mendasar dan efisien.
- 3) *Fuzzy inference engine*, suatu prinsip *fuzzy logic* yang digunakan untuk mengkombinasi aturan *if-then fuzzy* dalam suatu dasar aturan *fuzzy* pada pemetaan *fuzzy set* untuk himpunan *input* dengan *fuzzy set* pada himpunan *output*.
- 4) *Defuzzy*, suatu mekanisme untuk mengkonversi atau mengubah hasil *output fuzzy* menjadi suatu *output non-fuzzy* [8].

## **MATLAB**

MATLAB atau *Matrix Laboratory* merupakan bahasa pemrograman dalam bidang komputasi yang memiliki kemampuan untuk mengintegrasikan komputasi, visualisasi dan pemrograman. Dikarenakan fungsinya yang cukup kompleks, maka MATLAB sering digunakan dalam bidang riset yang membutuhkan komputasi numerik yang kompleks. Terdapat fungsi-fungsi pada MATLAB yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan secara khusus, yang disebut *Toolboxes*. *Toolboxes* ini mampu digunakan dalam bidang pengolahan sinyal, sistem pengaturan, *fuzzy logic*, *neural network*, optimasi, pengolahan citra serta simulasi yang lainnya [9-10].

## **Error**

*Error* merupakan selisih nilai yang dihasilkan dalam suatu pengukuran atau kesalahan dalam perhitungan yang dapat diubah ke dalam bentuk selisih mutlak antara nilai eksperimen  $E$  dan nilai  $A$  yang diterima. Rumus yang digunakan seperti pada pers. (2) [11-12].

$$Error = \frac{|E - A|}{A} \times 100\% \quad (2)$$

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini dirancang untuk menganalisis perubahan sinyal dari *pneumatic to electric* dengan menggunakan algoritma *fuzzy logic* pada software MATLAB. Data yang digunakan berupa sinyal arus (4-20mA) dan sinyal *pneumatic* yang besarnya antara 3-15 psi. Pengambilan data berupa kondisi-kondisi yang terjadi akibat perubahan sinyal *pneumatic to electric*. Pers. (2) akan digunakan untuk melihat selisih nilai dari sinyal arus yang dihasilkan. Pada analisis data, hasil dari algoritma *fuzzy* akan dibandingkan dengan data simulasi konverter P/I [3] dan data dari perusahaan. Data yang diperoleh diolah pada Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mulawarman.

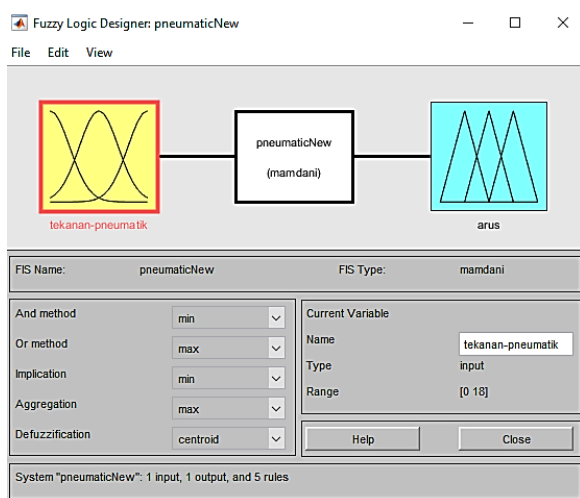
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Data diambil dari besaran perubahan sinyal *pneumatic to electric* yang bekerja untuk membuka dan menutup *valve* yang terdapat pada industri migas. Adapun data dari besaran sinyal tersebut berdasarkan standar sinyal dari dokumen *Instrument Society of America* dan dimasukkan ke dalam Tabel 2 berikut :

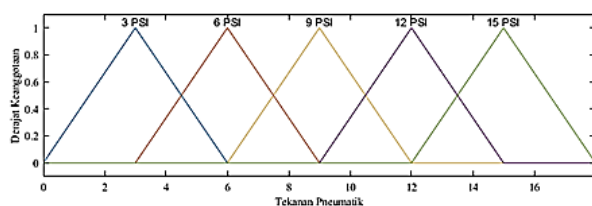
**Tabel 2. Data Besaran Sinyal Tekanan *Pneumatic* dan Sinyal Arus**

<i>Pressure value</i>	<i>Electric value</i>
3 psi	4 mA
6 psi	8 mA
9 psi	12 mA
12 psi	16 mA
15 psi	20 mA

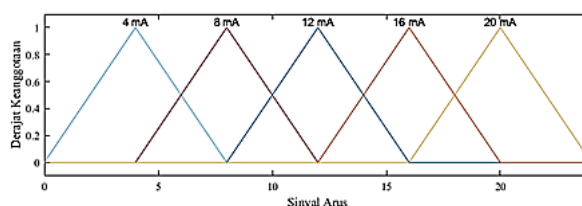
Langkah selanjutnya, yaitu menentukan variabel *fuzzy* berdasarkan kasus yang akan diubah menjadi model *fuzzy*. Terdapat 2 variabel untuk model *fuzzy*, yaitu variabel sinyal tekanan *pneumatic* sebagai *input* dengan skala 0-18 dan sinyal arus sebagai *output* dengan skala 0-24. Dimasukkan variabel tersebut ke dalam *toolbox fuzzy* dengan desain seperti pada Gambar 3.



(a)



(b)



(c)

**Gambar 3. (a) Desain *toolbox fuzzy* dan *Membership Function*; (b) *input* serta (c) *output***

Berikutnya menentukan aturan yang akan digunakan. Dengan menentukan dan menambahkan aturan pada *fuzzy logic*, maka perubahan sinyal akan dapat teratur dengan adanya aturan tersebut dan dapat mengkondisikan sinyal yang akan diperlukan untuk menghasilkan *output* yang diinginkan. Aturan ini terdiri dari 5 yaitu ;

- 1) Jika *input* sinyal tekanan *pneumatic* sebesar 3 psi, maka *output* sinyal arus yang dikeluarkan sebesar 4 mA.
- 2) Jika *input* sinyal tekanan *pneumatic* sebesar 6 psi, maka *output* sinyal arus yang dikeluarkan sebesar 8 mA.
- 3) Jika *input* sinyal tekanan *pneumatic* sebesar 9 psi, maka *output* sinyal arus yang dikeluarkan sebesar 12 mA.
- 4) Jika *input* sinyal tekanan *pneumatic* sebesar 12 psi, maka *output* sinyal arus yang dikeluarkan sebesar 16 mA.
- 5) Jika *input* sinyal tekanan *pneumatic* sebesar 15 psi, maka *output* sinyal arus yang dikeluarkan sebesar 20 mA.

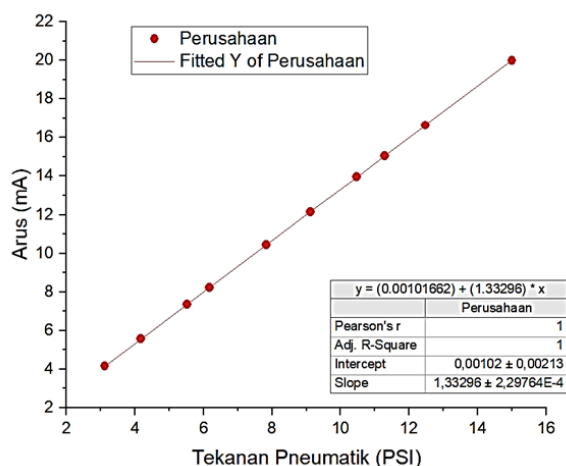
Aturan di atas diterapkan pada menu *rule editor* dan menampilkan grafik keanggotaan dari nilai yang telah di *input* yang menghasilkan grafik nilai *output* berdasarkan aturan yang telah ditetapkan pada menu *rule viewer*.

Tabel 3 merupakan perolehan data dari perusahaan yang menggunakan alat *valve pneumatic*, di mana alat tersebut akan digunakan untuk mengontrol aliran fluida dengan membuka dan menutup *valve* berdasarkan tekanan udara yang telah diberikan. Pengukuran yang diambil berupa sinyal tekanan *pneumatic* dengan sinyal arus.

**Tabel 3. Data Transmitter (Perusahaan)**

No.	Tekanan Pneumatic (psi)	Arus (mA)
1	3,12	4,16
2	4,18	5,57
3	5,53	7,37
4	6,18	8,24
5	7,82	10,43
6	9,11	12,15
7	10,47	13,96
8	11,29	15,06
9	12,47	16,63
10	14,99	19,99

Gambar 4 merupakan grafik sebaran data dari Tabel 3, di mana digambarkan dengan garis linier. Sumbu X sebagai sinyal tekanan *pneumatic* dan sumbu Y sebagai sinyal arus.



**Gambar 4. Grafik Persamaan Linier Data dari Perusahaan**

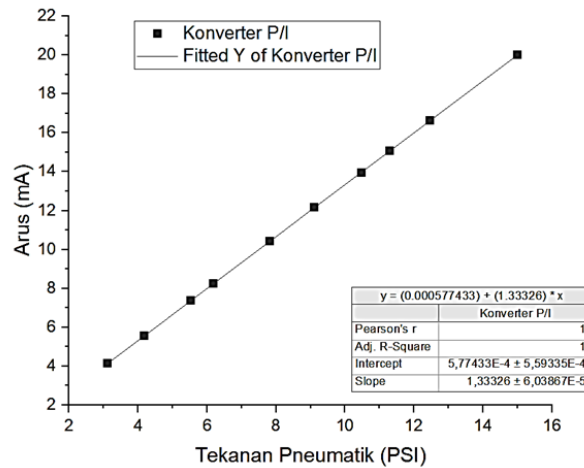
Gambar 4 menampilkan grafik persamaan garis atau *fitted Y* yang merupakan estimasi dari garis linier yang sesungguhnya didapatkan  $y = 0,00102 + 1,33296x$ . Nilai  $R^2$  atau *R square* merupakan nilai koefisien determinasi dan  $r$  adalah nilai koefisien korelasi yang berguna untuk mengukur hubungan antara dua variabel. Nilai  $r$  dan  $R^2$  adalah 1, artinya hubungan antara sinyal tekanan *pneumatic* dengan sinyal arus pada data dari perusahaan memiliki hubungan yang kuat dan tidak dipengaruhi faktor lain.

Tabel 4 merupakan perolehan data hasil dari simulasi konverter P/I berdasarkan penelitian terdahulu [3] yang telah dilakukan. Hasil dari data tersebut tidak jauh berbeda dengan data pada Tabel 3. Hal ini dapat diartikan bahwa penelitian terdahulu dapat digunakan sebagai referensi untuk pengembangan teknologi konverter P/I.

**Tabel 4. Data Simulasi Konverter P/I**

No.	Tekanan Pneumatic (psi)	Arus (mA)
1	3,12	4,16
2	4,18	5,57
3	5,53	7,37
4	6,18	8,24
5	7,82	10,43
6	9,12	12,16
7	10,47	13,96
8	11,29	15,06
9	12,47	16,63
10	15	20

Gambar 5 merupakan grafik sebaran data dari Tabel 4 ditandai dengan kotak berwarna hitam.



**Gambar 5. Grafik Persamaan Linier Data Simulasi Konverter P/I**

Gambar 5 menunjukkan grafik persamaan linier dengan didapatkannya persamaan garis  $y = 0,0006 + 1,33326x$  dan nilai  $r$  serta  $R^2$  adalah 1. Artinya, hubungan antara sinyal tekanan *pneumatic* dengan sinyal arus tidak dipengaruhi oleh variabel lain.

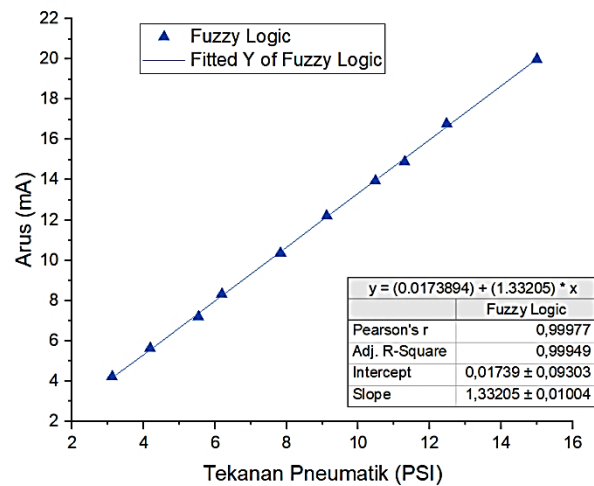
Tabel 5 merupakan data tabel penelitian menggunakan algoritma *fuzzy logic* dengan memanfaatkan *toolbox fuzzy* pada *software* MATLAB. Data sinyal tekanan *pneumatic* disesuaikan dengan data pada Tabel 3 dan Tabel 4. Hal ini berguna untuk melihat perbandingan dari perubahan sinyal tekanan *pneumatic* ke sinyal arus.

**Tabel 5. Data Penelitian Fuzzy Logic**

No.	Tekanan Pneumatic (psi)	Arus (mA)
1	3,12	4,22
2	4,18	5,65
3	5,53	7,21
4	6,18	8,33
5	7,82	10,35
6	9,12	12,22
7	10,47	13,97
8	11,29	14,9
9	12,47	16,79
10	15	20

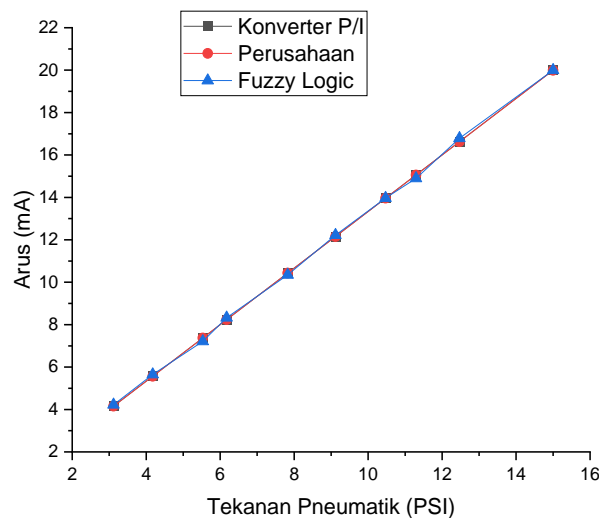
Pada data pertama, hasil sinyal arus yang didapatkan sebesar 4,22 mA. Hasil ini berbeda dengan data pertama pada Tabel 3 dan Tabel 4, yang disebabkan oleh aturan pada algoritma *fuzzy logic*. Aturan yang digunakan untuk menghubungkan sinyal tekanan *pneumatic* dengan sinyal arus adalah operasi AND, di mana operasi ini akan menghasilkan nilai minimum berdasarkan 2 himpunan yang diberikan sehingga hasil dari perubahan sinyal yang didapatkan cukup jauh berbeda.





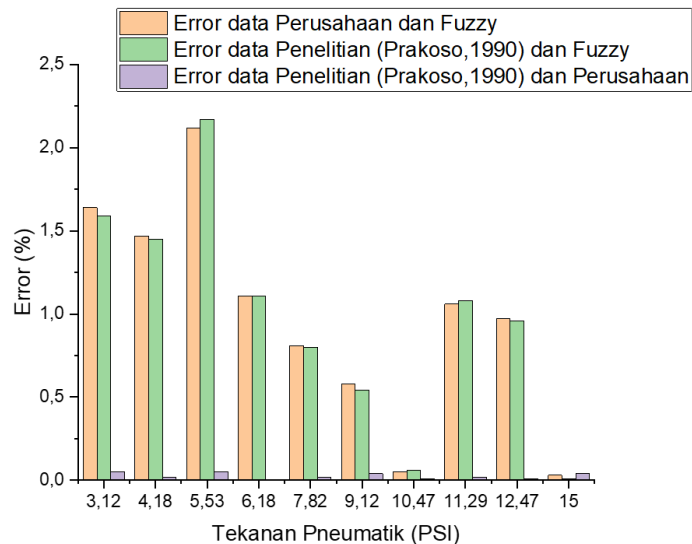
**Gambar 6. Grafik Persamaan Linier Data Fuzzy Logic**

Gambar 6 merupakan grafik persamaan linier berdasarkan sebaran data dari tabel 5. Didapatkan nilai persamaan garis  $y = 0,0174 + 1,33205x$  dan nilai  $r$  serta  $R^2$  sebesar 0,999. Dapat diartikan bahwa nilai koefisien korelasi yang mendekati 1 untuk data penelitian *fuzzy logic*, kedua variabel yang digunakan mempunyai hubungan yang kuat dan kontribusi sinyal tekanan *pneumatic* terhadap variasi sinyal arus sebesar 99%, sisanya 1% dipengaruhi oleh aturan dari *fuzzy logic*.



**Gambar 7. Grafik Gabungan Data Penelitian**

Gambar 7 merupakan grafik data dari penelitian, sebaran data pada grafik tersebut diambil dari data Tabel 3 sampai Tabel 5. Dapat terlihat pada gambar tersebut, selisih data antara nilai yang diperoleh tidak jauh berbeda dan saling berhimpit. Oleh sebab itu, dilakukan uji *error* pada data yang digunakan yang ditunjukkan pada Gambar 8.



**Gambar 8. Diagram Batang untuk Nilai Error**

Dapat terlihat pada Gambar 8, *error 1* memiliki nilai *error* yang berada di sekitar 0,03% sampai 2,12%, yang berarti data penelitian *fuzzy logic* dan data dari perusahaan memiliki selisih nilai arus yang berbeda. *Error 2*, memiliki nilai *error* berada disekitar 0,01% sampai 2,17%, sehingga data penelitian *fuzzy logic* dan data hasil dari simulasi konverter P/I memiliki selisih nilai arus yang juga berbeda. *Error 3*, memiliki nilai *error* yang sangat kecil berada di sekitar 0% sampai 0,05%, artinya data dari perusahaan dan data hasil simulasi konverter P/I tidak jauh berbeda sehingga dapat disimpulkan bahwa penggunaan algoritma *fuzzy logic* pada sistem perubahan sinyal tekanan *pneumatic* ke sinyal arus dapat dikatakan cukup mampu digunakan dalam sistem tersebut berdasarkan nilai *error* yang diperoleh di bawah 2,5%.

## KESIMPULAN

Secara umum, algoritma *fuzzy* yang dibangun telah terbukti berhasil serta bisa diterapkan dalam sistem *pneumatic*. Hal ini dapat ditinjau dari kesesuaian grafik hasil operasi *fuzzy logic* menggunakan data perusahaan maupun data dari penelitian sebelumnya. Grafik hasil *plotting* ketiga data tersebut menunjukkan hubungan yang linier dengan titik-titik data yang sangat berdekatan. Sehingga, hasil yang didapat mempunyai konsistensi yang baik dengan nilai *error* yang diperoleh sangat kecil dibawah 2,5%.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada pihak Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi FMIPA Universitas Mulawarman dan kepada seluruh pihak yang terlibat serta telah membantu terlaksananya penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. R. Kuphaldt, *Lessons In Industrial Instrumentation (Version 3.01)*. San Francisco: Creative Commons Attribution 4.0 International Public License, 2022.
- [2] G. M. Tamilselvan dan P. Aarthy, "Online tuning of fuzzy logic controller using Kalman algorithm for conical tank system," *J. Appl. Res. Technol.*, vol. 15, no. 5, 2017, doi: 10.1016/j.jart.2017.05.004.
- [3] K. Prakoso, "Perencanaan dan Pembuatan Simulasi Konverter Tekanan Pneumatik Ke

- Arus dan Arus Ke Pneumatik Diinterfacekan Pada IBM PC-XT," Surabaya, 1990.
- [4] H. D. Nurisman, "Alat Pengolah Ampas Tahu Menjadi Pupuk Cair Organik dengan Pengepresan Pneumatik Dilengkapi Pengisian Bahan Otomatis," *Pros. Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, vol. 10, no. Vol 10 No 1 (2019): Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar, hal. 193–200, 2019, doi: <https://doi.org/10.35313/irwns.v10i1.1389>.
- [5] T. W. Nugroho, A. Aliyu, dan J. Prasojo, "Rancang Bangun Alat Pengirim Sinyal Arus 4 -20 mA dari Pemancar Suhu melalui Jaringan GPRS," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 5, no. 1, 2017, doi: 10.26760/elkomika.v5i1.1.
- [6] E. Vlamou dan B. Papadopoulos, "Fuzzy logic systems and medical applications," *AIMS Neuroscience*, vol. 6, no. 4. 2019, doi: 10.3934/Neuroscience.2019.4.266.
- [7] H. Suprpto dan P. Simanjuntak, "FUZZY LOGIC UNTUK MEMREDIKSI PEMAKAIAN LISTRIK MENGGUNAKAN METODE MAMDANI," *Comput. Sci. VOL. 03 NO. 02*, vol. 03, 2020, [Daring]. Tersedia pada: <https://ejournal.upbatam.ac.id/index.php/comasiejournal/article/view/1701/1240>.
- [8] V. Amrizal dan Q. Aini, *Kecerdasan Buatan*. Jakarta: Halaman Moeka, 2013.
- [9] A. S. Prawira, "PENENTUAN KUALITAS PRODUK BOTOL DI PT MAPAN DJAYA MENGGUNAKAN METODE MAMDANI," Semarang, 2018.
- [10] E. S. Puspita dan L. Yulianti, "PERANCANGAN SISTEM PERAMALAN CUACA BERBASIS LOGIKA FUZZY," *J. MEDIA INFOTAMA*, vol. 12, no. 1, 2016, doi: 10.37676/jmi.v12i1.267.
- [11] A. Nasrum, *METODE NUMERIK DENGAN BANTUAN MICROSOFT EXCEL*. Solok: Insan Cendekia Mandiri, 2021.
- [12] J. D. Wilson dan C. A. Hernández-Hall, *Physics Laboratory Experiments*. Amerika Serikat: Cengage Learning, 2014.