

Pengujian Rancangan Simulator Resistansi Termal dan Rugi-rugi Kalor pada Sistem Aliran Fluida dalam Pipa Tersekat dengan Metode *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)* dan *Least-squares Estimation (LSE)*

Testing of Thermal Resistance and Heat Loss Simulator Design of the Fluid Flow in insulated pipe using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) and Least-squares Estimation (LSE) Method

¹Rahmat Romadhon*), ²Mohammad Kemal Agusta dan ³Amirul Ihsan

¹Kelompok Keahlian Rekayasa Kinerja Lingkungan Binaan, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung

²Kelompok Keahlian Teknologi Nano dan Kuantum, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung

³Program Studi Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung

*) *corresponding email: rromadhon@itb.ac.id*

Abstrak

Data resistansi termal sangat diperlukan untuk merancang sistem sekatan (insulasi) untuk pencegahan rugi-rugi kalor pada sistem aliran fluida melalui pipa. Metode pengujian untuk mendapatkan data sifat resistansi termal dari sekatan (*insulator*) jenis bahan sekatan berskala nano masih belum disepakati, begitu juga dengan penjelasan fenomena fisis dalam mekanisme menghambat aliran kalor. Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan rancangan simulator pengujian sifat resistansi termal sekatan dan rugi-rugi kalor melalui pipa sebagai metode pengujian alternatif untuk berbagai jenis bahan sekatan. Udara panas dialirkan melalui pipa yang dilengkapi dengan sistem pengukuran dan pengolahan data untuk mendapatkan data distribusi suhu aliran fluida dalam pipa dan suhu permukaan di sepanjang pipa. Sifat resistansi termal dan rugi-rugi kalor merupakan parameter bahan sekatan yang diuji. Model matematik diselesaikan secara numerik dan divalidasi dengan perangkat lunak COMSOL Multiphysics. Pada rancangan simulator, kedua sifat diestimasi menggunakan metode ANFIS dan LSE. Metode estimasi ANFIS menunjukkan kinerja estimasi terbaik, baik untuk resistansi termal maupun rugi-rugi kalor. Metode estimasi ANFIS untuk resistansi termal memberikan nilai galat sebesar 0,163 m²K/W, sedangkan untuk rugi-rugi kalor memberikan nilai galat sebesar 12,64 W/m. Metode estimasi ANFIS yang telah dikembangkan memiliki ketahanan yang cukup baik terhadap kesalahan dalam simulasi data pengukuran.

Kata Kunci: Simulator, Insulator Skala Nano, Resistansi Termal, Rugi-rugi Kalor, ANFIS, LSE.

Abstract

Thermal resistance is essential for designing insulation systems to prevent heat losses in fluid flow through pipes. The testing method for obtaining data on the thermal resistance of nanoscale insulators is still not agreed upon, as is the explanation of the physical phenomena in the mechanism of inhibiting heat flow. This research aimed to design a simulator for testing the thermal resistance of insulators and heat losses through pipes as an alternative testing method for various insulation materials. Hot air flows through a pipe equipped with a measurement and data processing system to obtain the temperature distribution of the fluid flow in the pipe and the pipe surface temperature along the pipe. Thermal resistance and heat loss are the parameters of the insulation material. The mathematical model was solved numerically and validated with COMSOL Multiphysics software. In designing the simulator, both properties are estimated using the ANFIS and LSE methods. The ANFIS method yields the best estimation for thermal resistance and heat losses. The ANFIS estimation for thermal resistance yields an error of 0.163 m²K/W, and for heat losses yields an error value of 12.64 W/m. The developed ANFIS estimation method is highly resilient to errors in the measurement data.

Keywords: Simulator, Nano Insulation Materials, Thermal Resistance, Heat Loss, ANFIS, LSE.

Makalah diterima 13 Februari 2024 – makalah direvisi 6 April 2024 – disetujui 21 April 2024

Karya ini adalah naskah akses terbuka dengan lisensi [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).



Pendahuluan

Sistem pemipaan baik dalam industri proses (*piping*) atau pada sistem transpor pada industri migas (*pipeline*) merupakan aset yang sangat penting. Fungsi sistem pemipaan ini untuk mengalirkan fluida yang merupakan bagian utama dari kedua jenis industri tersebut. Dalam banyak aplikasi, fluida yang mengalir memiliki suhu tinggi dan perlu tetap dipertahankan, baik untuk mempertahankan parameter atau sifat-sifat termodinamika fluida yang diperlukan dalam proses maupun untuk mencegah pembekuan dan memastikan fluida tetap dapat mengalir (*flow assurance*) [1], [2]. Saat terjadi perbedaan suhu antara permukaan pipa dengan lingkungan sekitar maka terjadi pelepasan kalor yang kemudian menjadi rugi-rugi kalor (*heat loss*). Semakin besar perbedaan suhunya maka semakin besar rugi-rugi kalor yang terjadi dan menyebabkan suhu fluida menjadi turun [3].

Dalam sistem pemipaan untuk transportasi fluida, misalnya minyak dan gas, cara efektif yang digunakan untuk mempertahankan suhu fluida yang mengalir adalah kombinasi dari sistem aktif (pemanas) dan sistem pasif (sekatan) [4], di mana penentuan ketebalan sekatan memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap pengurangan rugi-rugi kalor [5]. Berbagai jenis sekatan digunakan untuk mencegah rugi-rugi kalor baik dari jenis konvensional maupun jenis yang lebih maju (*advance*) yang memanfaatkan fenomena fisis dalam skala nanometer sehingga aplikasinya berupa lapisan tipis (jenis *coating*). Studi perbandingan berbagai jenis sekatan tersebut dengan metode perhitungan kinerja menunjukkan bahwa sekatan jenis *coating* menunjukkan hasil rugi-rugi kalor yang paling kecil [6].

Sifat termal yang penting dari sekatan berkaitan dengan kinerja untuk menahan rugi-rugi kalor adalah resistansi termal (sebagai kebalikan dari sifat konduktivitas termal). Sifat-sifat ini diperoleh melalui pengujian sifat-sifat termal yang sudah baku. Namun, untuk sekatan jenis *coating* metode pengujian baku belum disepakati, begitu juga dengan penjelasan fenomena fisis dalam menghambat aliran kalor [7]. Bahan-bahan sekatan berskala nano atau *Nano Insulation Materials* (NIM) merupakan bahan homogen yang memiliki kualitas sekatan yang sangat tinggi sebagai efek dari struktur nanopori yang terbuka dan tertutup. Dengan mengecilkan ukuran pori hingga ukuran pori maksimum lebih kecil dari *mean free path* udara maka sifat konduktivitas termal gas dapat diturunkan secara drastis [8].

Mekanisme dalam menghambat aliran kalor dalam nanopori melibatkan fenomena transfer kalor secara konduktif (material padat dan gas), radiatif, konvektif dan efek perpaduan (*coupling effect*) sehingga sifat termal tidak dapat diwakili oleh konduktivitas termal bahan padat saja. Efek dari sifat sekatan termal akan berkorelasi langsung dengan laju transfer kalor atau rugi-rugi kalor. Rugi-rugi kalor pada pipa yang dilapisi sekatan akan dapat terlihat pengaruhnya terhadap penurunan suhu disepanjang pipa digunakan untuk menentukan sifat termal dari bahan sekatan tersebut. Metode pembelajaran mesin (*machine learning*) dapat digunakan untuk membantu meng-estimasi sifat termal dan performansi bahan insulator dalam menghambat aliran kalor [9].

Untuk melakukan pengamatan ini maka dirancang sebuah simulator pengujian rugi-rugi kalor pada pipa untuk skala laboratorium sebagai sarana pembuktian pengaruh dari penggunaan berbagai jenis bahan sekatan. Perancangan perangkat simulator melalui kajian analitik untuk mendapatkan model matematik namun penyelesaiannya dilakukan secara numerik. Simulator akan dilengkapi dengan sistem pengukuran yang datanya digunakan meng-estimasi nilai resistansi termal sekatan dan rugi-rugi kalor dari aliran fluida melalui pipa. Hasil penyelesaian model matematik serta hasil pengukuran dan pengolahan data ditampilkan pada tampilan *dashboard* simulator resistansi termal dan rugi-rugi kalor.

Kedua cakupan dalam rancangan simulator tersebut perlu diuji terlebih dahulu. Paper ini melaporkan metode dan hasil pengujian rancangan simulator yang mencakup pengujian kajian analitik dan rancangan sistem pengukuran. Pengujian analitik divalidasi dengan simulasi pada perangkat lunak COMSOL 5.2 sedangkan pengujian sistem pengukuran menggunakan metode ANFIS dan LSE.

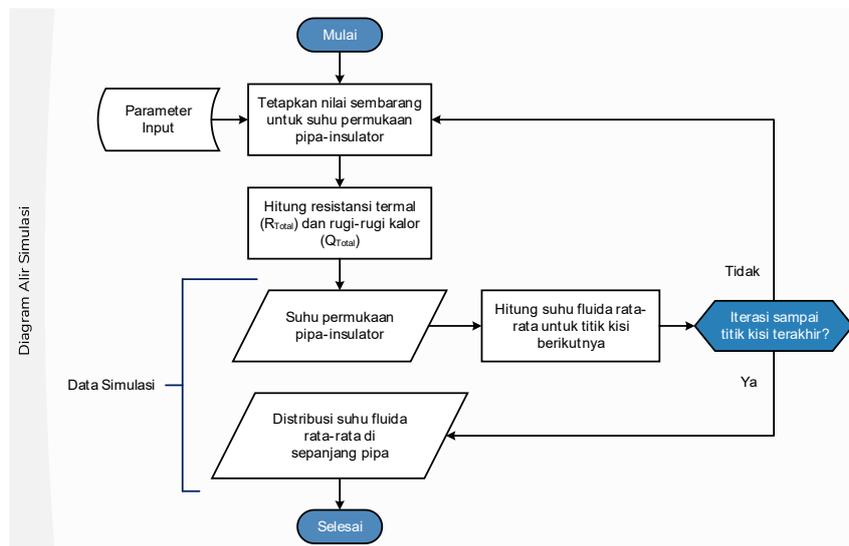
Metodologi

Simulator rugi-rugi kalor dari aliran fluida pada pipa dikembangkan untuk menyajikan hasil penyelesaian model matematik secara numerik dan hasil estimasi nilai resistansi termal sekatan berdasarkan data pengukuran dari percobaan yang dilakukan pada berbagai kasus yang diujikan. Bagian ini menjelaskan metode yang digunakan dalam perancangan simulator tersebut mencakup pengembangan program simulasi yang digunakan untuk menyelesaikan model matematik dari sistem transfer kalor dan perancangan perangkat simulator skala laboratorium yang dilengkapi dengan sistem pengukuran dan sistem kontrol.

1 Pengembangan Program Simulasi

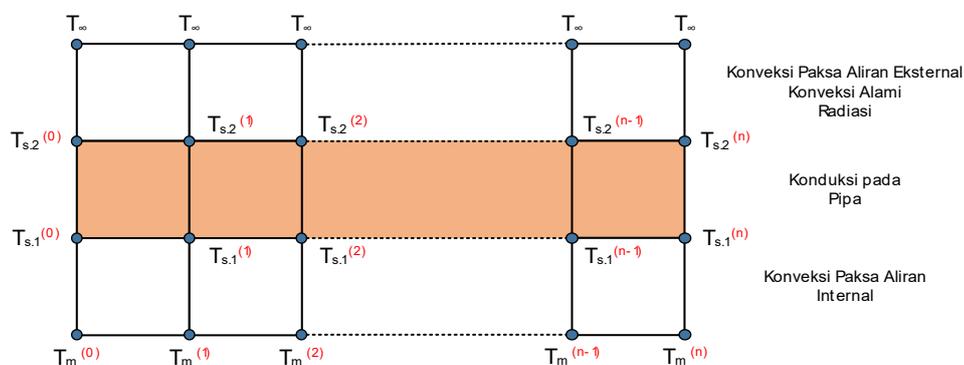
Model matematik yang disusun mencakup semua mekanisme transfer kalor yang mungkin terjadi di setiap komponen lapisan pemipaan serta aliran fluida di dalam dan di luar pipa. Program simulasi dikembangkan untuk menyelesaikan model matematik tersebut agar mampu menghasilkan data distribusi suhu aliran fluida di dalam pipa dan suhu permukaan pipa di sepanjang pipa. Fluida panas mengalir di dalam pipa kalor merambat melalui pipa menyebabkan adanya rugi-rugi kalor. Efeknya adalah penurunan suhu fluida. Besarnya kalor yang hilang melalui pipa sama dengan energi yang dilepaskan oleh fluida sehingga suhunya turun. Begitu juga dengan total transfer kalor yang melalui seluruh lapisan pipa akan sama dengan besarnya kalor yang dilepaskan dari permukaan luar pipa ke lingkungan sekitarnya. Pemeriksaan validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi melalui perangkat lunak COMSOL 5.2, di mana simulasi ini menghasilkan dimensi dan spesifikasi teknis dari komponen dan peralatan dengan mempertimbangkan terjadinya penurunan suhu pada aliran fluida yang cukup signifikan untuk dapat diamati.

Agar program dapat menghasilkan data tersebut, dibutuhkan parameter-parameter masukan yaitu ukuran nominal pipa, suhu udara rata-rata pada masukan pipa sampel dan lingkungan, ketebalan sekatan, laju aliran volumetrik, dan kecepatan angin (aliran eksternal). Material pipa dan sekatan juga termasuk ke dalam parameter yang digunakan dalam simulasi. Pada Gambar 1 dapat dilihat diagram alir simulasi transfer kalor pada aliran udara. Perhitungan secara umum dapat dibagi menjadi dua tahap yaitu perhitungan distribusi suhu pada potongan penampang dan di sepanjang pipa.



Gambar 1. Diagram alir simulasi transfer kalor pada aliran udara

Nilai resistansi kalor mencakup konveksi pada aliran internal, konduksi pada pipa dan sekatan serta konveksi dan radiasi pada aliran eksternal. Koefisien transfer kalor konveksi diperoleh dari Bilangan Nusselt yang masing-masing dihitung dengan korelasi Gnielinski, Churchill – Bernstein dan Churchill – Chu [10]. Penyelesaian model melalui diskritisasi untuk distribusi suhu di sepanjang pipa dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema diskritisasi suhu di sepanjang pipa

Laju transfer kalor (Q) ditentukan dengan menggunakan persamaan (1) apabila nilai suhu udara rata-rata pada masukan pipa (T_m) dan suhu lingkungan (T_∞) diketahui.

Dengan mengetahui besar laju perpindahan kalor maka nilai suhu permukaan luar $T_{s,2}$ dan dalam $T_{s,1}$ pipa dapat ditentukan. Perhitungan suhu permukaan dalam pipa melibatkan perpindahan kalor konveksi paksa akibat aliran internal dan nilainya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.

Dengan metode yang serupa, suhu permukaan luar pipa dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 3. Perhitungan suhu permukaan luar melibatkan perpindahan kalor secara konduksi. Persamaan ini juga digunakan untuk menghitung suhu permukaan sekatan apabila penggunaan sekatan pada simulasi dilakukan. Apabila pada simulasi digunakan sekatan maka konveksi dan radiasi pada permukaan terluar terjadi pada permukaan sekatan sehingga nilai suhu permukaan yang digunakan adalah suhu permukaan sekatan. Perhitungan dilanjutkan dengan penentuan distribusi suhu udara di sepanjang pipa perangkat uji.

$$\begin{pmatrix} Q_{\text{Total}}^{(0)} \\ \vdots \\ Q_{\text{Total}}^{(i)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (T_m^{(0)} - T_\infty) / R_{\text{Total}}^{(0)} \\ \vdots \\ (T_m^{(i)} - T_\infty) / R_{\text{Total}}^{(i)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

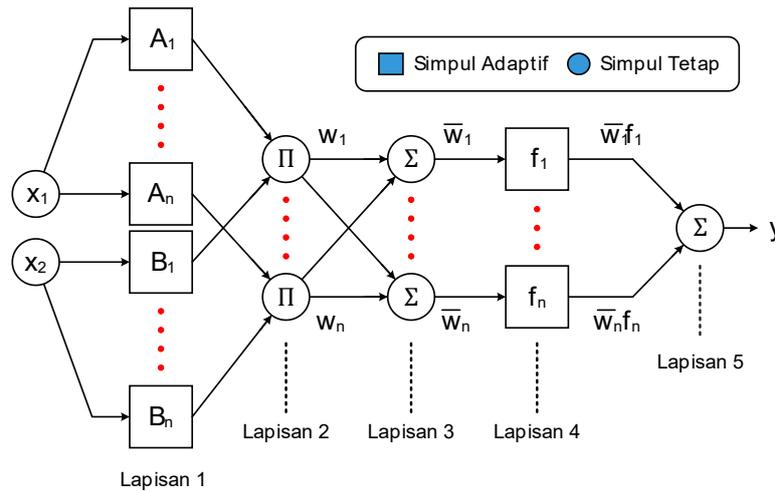
$$\begin{pmatrix} T_{s,1}^{(0)} \\ \vdots \\ T_{s,1}^{(i)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_m^{(0)} \\ \vdots \\ T_m^{(i)} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Q_{\text{Total}}^{(0)} / R_{\text{konv}}^{(0)} \\ \vdots \\ Q_{\text{Total}}^{(i)} / R_{\text{konv}}^{(i)} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} T_{s,2}^{(0)} \\ \vdots \\ T_{s,2}^{(i)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{s,1}^{(0)} \\ \vdots \\ T_{s,1}^{(i)} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Q_{\text{Total}}^{(0)} / R_{\text{kond}}^{(0)} \\ \vdots \\ Q_{\text{Total}}^{(i)} / R_{\text{kond}}^{(i)} \end{pmatrix} \quad (3)$$

2 Pengembangan Metode Estimasi

Metode estimasi dikembangkan untuk memperkirakan nilai resistansi termal dan rugi-rugi kalor berdasarkan data-data pengukuran. Resistansi termal yang diperkirakan merupakan nilai keseluruhan dari resistansi termal konduksi pada material insulator, serta konveksi dan radiasi pada permukaan sekatan. Hal ini dilakukan mengingat masih ambigunya mekanisme sekatan termal pada skala mikroskopis. Terdapat sumber referensi yang menyatakan nilai konduktivitas termalnya berada disekitar 0,001 – 0,003 W/m.K sedangkan dari paper lainnya menyatakan nilai konduktivitas termal yang lebih tinggi, yaitu di sekitar 0,01-0,14 W/m.K [11]. Metode pengujian sifat sekatan pada skala ini masih menjadi perdebatan, apakah pengujian mengukur sifat konduktivitas termal bahan padat saja atau juga melibatkan fenomena transfer kalor lainnya. Apabila metode estimasi yang dikembangkan memiliki kemampuan estimasi yang baik, metode tersebut dapat diintegrasikan dengan program akuisisi data sehingga nilai resistansi termal sekatan dan rugi-rugi kalor dapat Langsung terukur. Upaya ini juga meningkatkan efisiensi waktu yang diperlukan untuk pengolahan data. Adapun metode estimasi yang akan dikembangkan adalah metode estimasi menggunakan *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS) dan *Least-square Estimation* (LSE).

ANFIS merupakan salah satu teknologi pembelajaran mesin yang merupakan kombinasi dari sistem inferensi fuzzy dan jaringan syaraf tiruan (JST). Sistem inferensi fuzzy yang digunakan merupakan model sistem inferensi Takagi-Sugeno-Kang (TSK) orde nol. Model TSK memiliki keunggulan komputasi karena struktur yang sederhana [REF]. Struktur ANFIS pada umumnya terdiri dari lima lapisan dengan fungsi yang berbeda-beda, sebagaimana yang dapat dilihat pada Gambar 3.

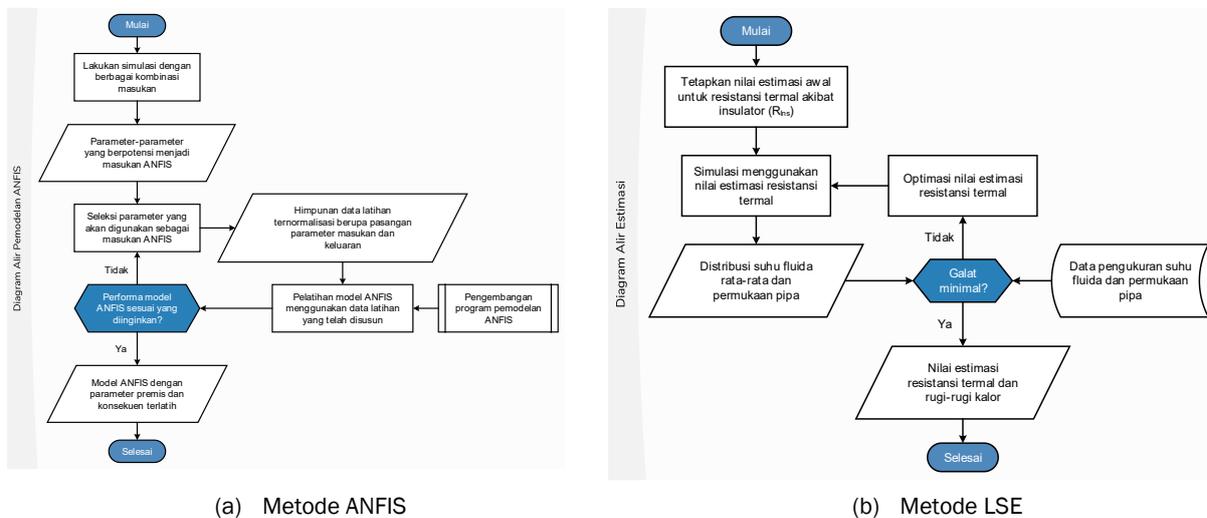


Gambar 3. Diagram Struktur ANFIS dengan model sistem inferensi fuzzy TSK

Terdapat dua macam simpul pada struktur ANFIS yang simpul adaptif dan simpul tetap. Simpul adaptif merupakan simpul-simpul yang mempunyai parameter yang nilainya dapat berubah selama proses pembelajaran. Terdapat dua lapisan yang mengandung simpul adaptif yaitu lapisan pertama dan lapisan keempat. Lapisan pertama terdiri dari fungsi-fungsi keanggotaan dan parameter-parameter yang mengatur bentuk dari fungsi keanggotaan disebut sebagai parameter premis. Fungsi keanggotaan yang digunakan dalam pengembangan adalah fungsi Gaussian, yaitu sebanyak 64 fungsi untuk masing-masing masukan. Adapun lapisan keempat terdiri dari fungsi polinomial orde nol, atau berupa konstanta, mengingat model yang digunakan dalam pengembangan adalah TSK orde nol [12]. Koefisien polinomial disebut juga sebagai parameter konsekuen. Pengembangan dilakukan dengan menggunakan bahasa pemrograman Python dan dengan memanfaatkan pustaka TensorFlow.

Proses pembelajaran ANFIS dilakukan melalui dua tahap yaitu *forward pass* dan *back propagation*. Pada saat *forward pass* dilakukan optimasi nilai parameter konsekuen, sedangkan pada saat *back propagation* dilakukan optimasi nilai parameter premis. Pembelajaran bertujuan untuk menghasilkan nilai galat minimal antara keluaran model dan keluaran yang diinginkan. Fungsi yang digunakan untuk merumuskan galat atau disebut juga *loss function* adalah fungsi Huber, sebagaimana yang dirumuskan pada persamaan 4. Adapun algoritma optimasi yang digunakan adalah algoritma optimasi *Adaptive Moment Estimation Algorithm* (ADAM). Baik fungsi Huber dan algoritma optimasi ADAM telah disediakan dalam pustaka TensorFlow.

$$L_{\delta}(\delta, f(x)) = \begin{cases} 0.5 \cdot (y - f(x))^2, & \text{jika } |(y - f(x))| \leq \delta \\ \delta|(y - f(x))| - 0.5\delta^2, & \text{lainnya} \end{cases} \quad (4)$$



(a) Metode ANFIS

(b) Metode LSE

Gambar 4. Diagram alir pengembangan metode estimasi

Pada Gambar 4(a) dapat dilihat diagram alir keseluruhan untuk pengembangan metode estimasi ANFIS. Tujuan dari pengembangan ANFIS adalah untuk melatih metode ANFIS sedemikian rupa sehingga estimasi memberikan nilai keluaran sesuai dengan nilai yang diinginkan. Maka dari itu, diperlukan himpunan data yang terdiri dari pasangan parameter masukan dan keluaran sebagai data latihan. Data tersebut dapat diperoleh dengan melakukan program simulasi yang juga dikembangkan dalam penelitian ini.

Agar data latihan dapat mencakup berbagai kondisi pengukuran, simulasi dilakukan dengan menggunakan berbagai kombinasi parameter masukan. Adapun parameter masukan yang divariasikan beserta rentang nilainya adalah suhu aliran udara pada masukan pipa sampel, suhu lingkungan, laju aliran volumetrik udara dalam pipa, dan resistansi termal sekatan, sebagaimana yang dapat dilihat pada Tabel 1. Material dan ukuran pipa yang digunakan pada simulasi adalah konstan yaitu pipa *carbon steel* dengan panjang tiga meter dan ukuran *schedule 40* dan ukuran nominal 3". Kecepatan angin atau aliran udara eksternal juga dianggap konstan sebesar 1 m/s.

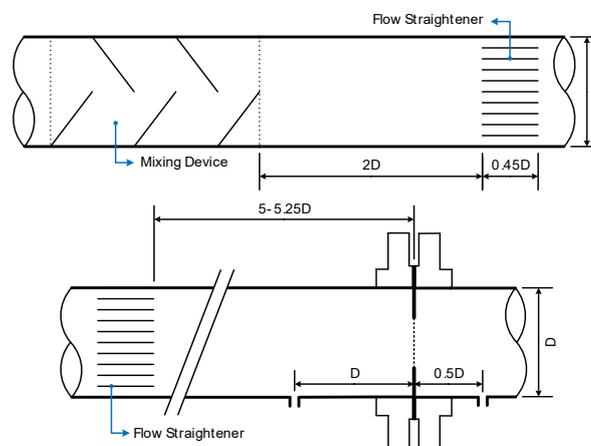
Tabel 1. Variasi parameter masukan yang digunakan untuk membuat *dataset*

Parameter Masukan Simulasi	Rentang Nilai	Satuan Parameter	Jumlah Variasi Nilai
Panjang Pipa	[1, 3]	Meter	3
Suhu Fluida (Inlet)	[50, 250]	°C	21
Suhu Udara	[15, 30]	°C	21
Laju Aliran Volumetrik Fluida	[25, 750]	CFM	21
Resistansi Termal Insulator	[1, 50]	K·W ⁻¹	21
Jumlah Kombinasi Parameter Masukan Simulasi:			583.443

Jumlah kombinasi parameter masukan simulasi diperoleh sebanyak 583.443 pasangan data, dengan masing-masing pasang terdiri dari kombinasi nilai parameter masukan dan satu nilai keluaran. Seluruh data dinormalisasi berdasarkan nilai terbesar dan terkecil dari masing-masing parameter. Data kemudian dibagi menjadi sebelas himpunan data dengan ukuran yang hampir sama, dengan rincian masing-masing data latihan dan data validasi sebanyak lima himpunan, dan satu himpunan lainnya digunakan sebagai data uji.

Pada Gambar 4(b) dapat dilihat diagram alir optimasi resistansi termal yang dihasilkan oleh sekatan beserta rugi-rugi kalor yang terjadi. Estimasi dilakukan dengan menjadikan nilai resistansi termal yang dihasilkan oleh sekatan sebagai masukan untuk program simulasi dan menghasilkan hasil simulasi berupa data suhu udara rata-rata dan permukaan pipa. Hasil tersebut kemudian dibandingkan dengan data pengukuran. Nilai estimasi awal resistansi termal yang dipilih adalah hasil estimasi ANFIS atau dapat dipilih nilai sembarang. Nilai tersebut kemudian dioptimasi dengan menggunakan metode LSE hingga dicapai nilai galat minimal antara hasil simulasi dan data pengukuran.

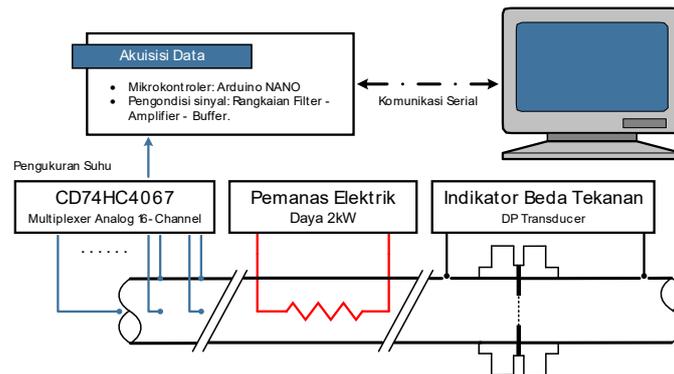
3 Perancangan Perangkat Uji



Gambar 5. Ilustrasi segmen pengkondisi dan pengukuran laju aliran

Gambar 5 menunjukkan perangkat uji memiliki bentuk berupa pipa horizontal yang tersusun atas beberapa segmen yaitu segmen pengondisi dan pengukuran aliran, segmen pemanas, dan segmen sampel. Pipa yang digunakan adalah pipa *carbon steel* dengan ukuran *schedule 40* dan ukuran nominal 3" sehingga memiliki diameter luar dan dalam berturut-turut sebesar 3,5" dan 3,068". Udara dialirkan dengan menggunakan *blower* tiga fasa yang kecepatannya dapat diatur dengan sebuah *Variable Frequency Drive* (VFD).

Perancangan pengondisi aliran dilakukan dengan mengikuti standar yang tersusun dalam ASHRAE 41.2. Panjang *straightener* yang dispesifikasikan pada ASHRAE 41.2 adalah sebesar $0,45D$ dengan D adalah diameter dalam pipa. Adapun standar jarak antara *mixer* dan *straightener* tidak dijelaskan secara spesifik. Pada perangkat uji ini, laju aliran udara diukur melalui pengukuran tekanan diferensial yang dihasilkan oleh *orifice*. Bidang hilir dari *straightener* harus berada dalam rentang jarak 5 hingga 5,25 kali diameter pipa dari bidang hulu alat ukur aliran, yang pada penelitian ini adalah *orifice* [13].



Gambar 6. Rancangan sistem akuisisi data perangkat uji

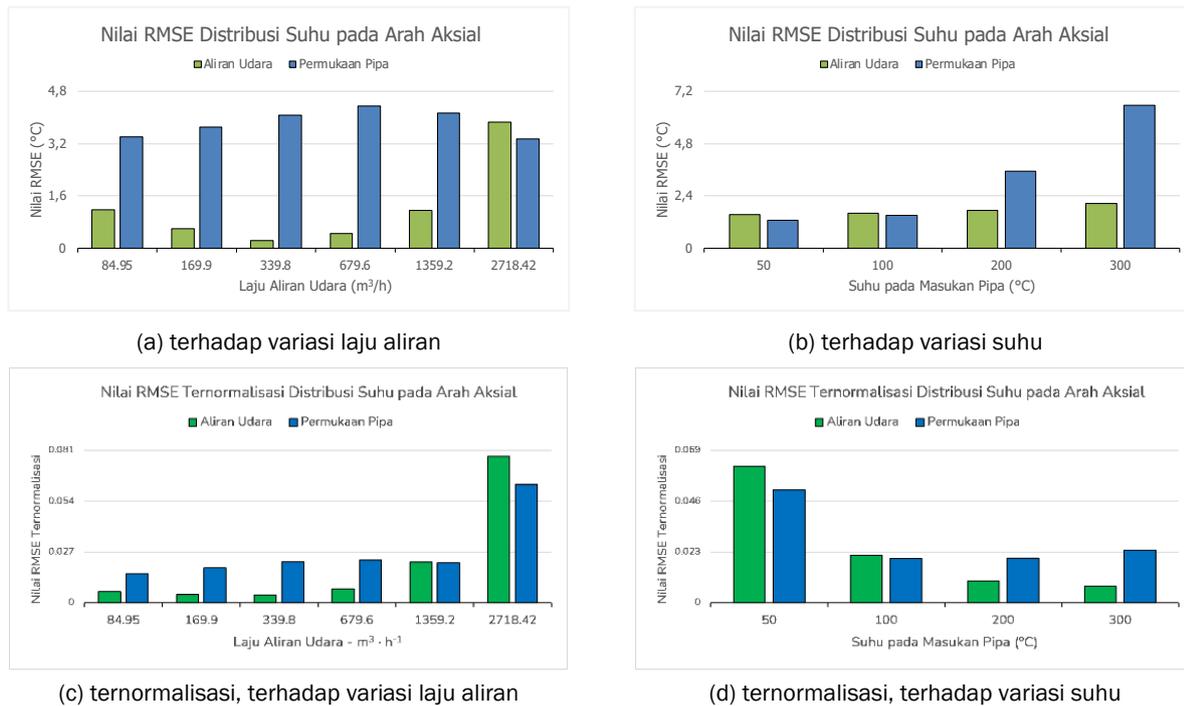
Ilustrasi rancangan segmen pengondisi dan pengukuran laju aliran dapat dilihat pada Gambar 5. Udara lalu dilewatkan melalui pemanas elektrik sebelum akhirnya masuk ke segmen pipa sampel yang memiliki panjang tiga meter dan merupakan lokasi dilakukannya pengukuran suhu. Rancangan sistem akuisisi data pengukuran dari perangkat uji ditunjukkan pada Gambar 6.

Hasil dan Pembahasan

1 Validasi Program Simulasi

Evaluasi program simulasi dilakukan dengan menggunakan rancangan sistem berbentuk pipa silinder horizontal dengan panjang, ukuran serta material pipa yang digunakan yang sesuai dengan spesifikasi segmen pipa perangkat uji, yang akan dilapisi dengan sampel sekatan termal. Adapun data yang digunakan sebagai referensi adalah data suhu aliran udara dan permukaan pipa, serta tekanan udara dalam pipa, yang diperoleh dari perangkat lunak COMSOL. Parameter *Root Mean-square Error* (RMSE) digunakan sebagai indikator untuk mengetahui tingkat ketidakesesuaian data simulasi yang didapatkan dari program hasil pengembangan dengan data referensi.

Perhitungan nilai RMSE dilakukan untuk seluruh nilai suhu pada seluruh nilai laju aliran volumetrik. Agar pengaruh suhu pada masukan pipa dan laju aliran dalam simulasi dapat diamati, nilai RMSE dihitung dengan mengelompokkan data berdasarkan kedua parameter tersebut. Nilai RMSE juga dinormalisasi berdasarkan rentang suhu lingkungan/udara dan suhu fluida pada inlet/masukan pipa. Adapun suhu lingkungan pada simulasi ditetapkan sebagai konstan sebesar 25°C . Nilai RMSE ternormalisasi memiliki rentang nilai antara nol hingga satu, dengan nilai yang semakin rendah menunjukkan tingkat kesesuaian yang semakin baik.



Gambar 7. Nilai RMSE distribusi suhu

Pada Gambar 7(a) dapat dilihat nilai RMSE suhu aliran dan permukaan pipa yang dikelompokkan berdasarkan laju aliran volumetrik. Secara keseluruhan, diperoleh kombinasi nilai RMSE tertinggi pada laju aliran volumetrik 2.718,42 m³/jam. Pada laju aliran ini juga diperoleh nilai RMSE tertinggi suhu aliran, yaitu dengan nilai sebesar 3,9°C. Adapun untuk nilai RMSE terendah data suhu aliran diperoleh pada laju aliran volumetrik 339,8 m³/jam dengan nilai sebesar 0,3°C. Nilai RMSE suhu aliran cenderung menurun hingga mencapai nilai laju aliran volumetrik 339,8 m³/jam dan kemudian meningkat seiring bertambahnya laju aliran. Berbeda dengan suhu aliran, nilai RMSE suhu permukaan pipa relatif tidak berbeda terlalu jauh satu sama lain, dengan nilai tertinggi sebesar 4,4°C dan nilai terendah sebesar 3,4°C masing-masing pada laju aliran volumetrik 679,6 dan 2.718,42 m³/jam.

Nilai RMSE juga dihitung berdasarkan suhu udara pada masukan pipa, sebagaimana yang dapat dilihat pada Gambar 7(b). Berbeda dengan sebelumnya, nilai RMSE memiliki kecenderungan untuk meningkat seiring dengan meningkatnya suhu aliran dalam pipa, terutama untuk suhu permukaan. Nilai RMSE suhu aliran mengalami peningkatan yang sangat kecil dan cenderung tidak berubah. Baik untuk data suhu aliran maupun permukaan pipa, nilai RMSE tertinggi diperoleh pada suhu 300°C dengan nilai berturut-turut sebesar 2,1°C dan 6,6°C. Adapun nilai RMSE terendah diperoleh pada suhu 50°C dengan nilai sebesar 1,5°C dan 1,3°C.

Berdasarkan nilai RMSE ternormalisasi, dapat dikatakan bahwa program simulasi yang dikembangkan memiliki Tingkat ketidakesesuaian yang sangat kecil terhadap hasil simulasi acuan. Adapun nilai RMSE ternormalisasi dapat dilihat pada Gambar 7(c) dan 7(d). Secara keseluruhan, baik terhadap variasi laju aliran volumetrik maupun variasi suhu, didapatkan nilai RMSE ternormalisasi untuk distribusi suhu aliran dalam pipa sebesar 0.033, sedangkan untuk distribusi suhu pada permukaan pipa sebesar 0.032.

2 Simulasi Perangkat Uji

Besaran yang disimulasikan adalah penurunan suhu aliran udara di sepanjang pipa, resistansi termal akibat penggunaan sekatan termal, dan rugi-rugi kalor yang terjadi. Penurunan suhu aliran udara dipilih sebagai besaran yang disimulasikan karena besaran ini dapat digunakan sebagai indikator kemampuan sekatan yang dapat langsung dilihat pada saat pengukuran, tanpa diperlukan pengolahan data terlebih dahulu. Adapun resistansi termal dan rugi-rugi kalor merupakan besaran yang dapat menggambarkan kemampuan sekatan secara menyeluruh, tanpa adanya kecenderungan mekanisme transfer kalor. Simulasi dilakukan dengan suhu aliran pada masukan pipa sebesar 200°C dan laju aliran volumetrik sebesar 339,8 m³/jam, serta sekatan termal yang digunakan adalah kalsium silikat dan wol mineral.

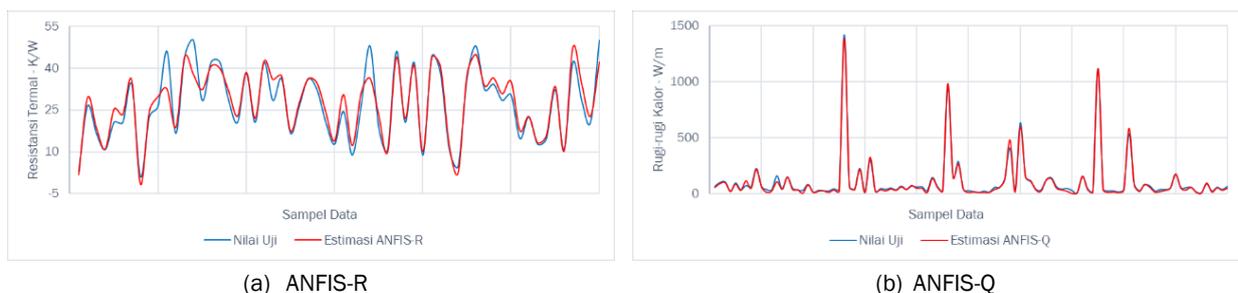
Tabel 2. Hasil simulasi pengaruh ketebalan sekatan termal

Ketebalan (mm)	Penurunan Suhu Aliran (°C)		Resistansi Termal R-value (m ² K-W ⁻¹)		Rugi-rugi Kalor (W-m ⁻¹)	
	MW	CS	MW	CS	MW	CS
<i>Bare-pipe:</i>	25,81		0,045		659,7	
10:	7,92	8,87	0,215	0,189	187,1	208,8
20:	5,03	5,78	0,356	0,306	117,5	134,3
30:	3,83	4,46	0,477	0,406	89,1	103,0
40:	3,17	3,71	0,584	0,494	73,6	85,6
50:	2,75	3,23	0,678	0,572	63,7	74,4
60:	2,45	2,89	0,763	0,642	56,9	66,6
70:	2,23	2,64	0,840	0,706	51,8	60,8
80:	2,07	2,45	0,911	0,765	47,9	56,3

Seluruh nilai simulasi besaran pada setiap ketebalan sekatan termal yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2. Singkatan MW mengacu pada material wol mineral, sedangkan singkatan CS mengacu pada material kalsium silikat.

3 Hasil Pengembangan Metode Estimasi

Telah dikembangkan dua metode estimasi ANFIS yaitu metode estimasi resistansi termal, yang selanjutnya disebut sebagai ANFIS-R, dan rugi-rugi kalor, yang selanjutnya disebut sebagai ANFIS-Q. Nilai resistansi termal yang dihasilkan oleh metode estimasi ANFIS-R adalah nilai resistansi termal absolut, yang menyatakan selisih suhu per satuan laju perpindahan kalor untuk suatu panjang beda hingga Δx . Nilai resistansi termal absolut dapat diubah ke dalam besaran lain yang juga termasuk besaran untuk mengukur resistansi termal (*R-Value*). Besaran ini menyatakan nilai resistansi material terhadap perpindahan kalor dalam satuan luas dan memiliki satuan m²K-W⁻¹. Gambar 8(a) dan Gambar 8(b) berturut-turut menunjukkan sampel hasil pembelajaran dari metode estimasi ANFIS-R dan metode estimasi ANFIS-Q.



Gambar 8. Sampel hasil pembelajaran metode estimasi ANFIS-R dan ANFIS-Q

Hasil pembelajaran metode estimasi ANFIS-R memberikan nilai RMSE sebesar 3,32 K-W⁻¹. Model ANFIS-R lalu diujikan dengan himpunan data uji berukuran 41.546 data. Data uji tersebut memiliki rentang nilai antara 1-50 K-W⁻¹ sehingga didapat nilai RMSE ternormalisasi sebesar 0.068. Berdasarkan nilai tersebut, dapat dikatakan bahwa model ANFIS-R yang dikembangkan memiliki performa estimasi yang sangat baik.

Pengujian kemudian dilakukan dengan menggunakan data uji yang telah ditambahkan dengan kesalahan untuk mensimulasikan kinerja metode ketika menggunakan data pengukuran. Pada Gambar 9(a) dapat dilihat nilai RMSE estimasi nilai resistansi termal yang dihasilkan oleh metode ANFIS-R maupun metode LSE terhadap variasi laju aliran volumetrik. Dari data yang diperoleh, dapat dibandingkan kinerja masing-masing metode estimasi terhadap variasi laju aliran. Dapat diamati bahwa nilai RMSE metode estimasi ANFIS-R relatif tidak mengalami perubahan dan tidak memiliki kecenderungan tertentu terhadap variasi laju aliran. Adapun nilai RMSE metode estimasi LSE didapati mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya laju aliran. Hal ini menyebabkan nilai suhu yang diperoleh dari pengukuran memiliki selisih nilai yang kecil satu dengan yang lain sehingga memungkinkan galat untuk memiliki pengaruh yang besar terhadap akurasi hasil estimasi. Nilai RMSE

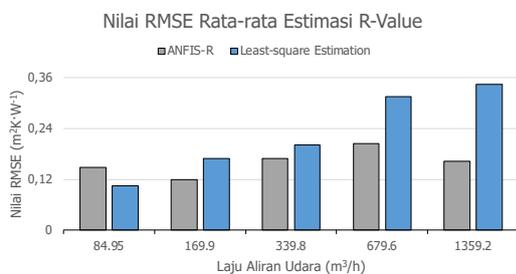
cenderung menurun seiring dengan meningkatnya suhu udara pada masukan pipa, baik untuk metode ANFIS-R maupun LSE, sebagaimana yang dapat dilihat pada Gambar 9(b). Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, kinerja estimasi terbaik untuk nilai *R-Value* diperoleh dari metode estimasi ANFIS-R dengan nilai RMSE keseluruhan sebesar 0,163 m²K·W⁻¹. Adapun nilai RMSE keseluruhan metode estimasi LSE adalah sebesar 0,244 m²K·W⁻¹.

Tabel 3. Perbandingan nilai RMSE R-value (m²K·W⁻¹) berdasarkan laju aliran

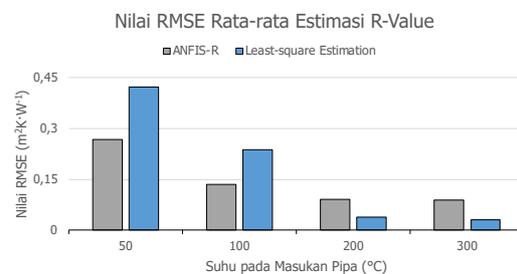
Metode:	ANFIS-R			Optimasi LSE		
STDEV:	$\sigma_1 = 1$	$\sigma_2 = 3$	Rata-rata	$\sigma_1 = 1$	$\sigma_2 = 3$	Rata-rata
84,95	0,118	0,172	0,148	0,019	0,147	0,105
169,90	0,097	0,136	0,119	0,049	0,233	0,168
339,80	0,106	0,215	0,169	0,074	0,276	0,202
679,60	0,192	0,215	0,204	0,178	0,408	0,315
1.359,20	0,146	0,176	0,162	0,265	0,408	0,344
			RMSE Total: 0,163			RMSE Total: 0,244

Tabel 4. Perbandingan nilai RMSE R-value (m²K·W⁻¹) berdasarkan suhu

Metode:	ANFIS-R			Optimasi LSE		
STDEV:	$\sigma_1 = 1$	$\sigma_2 = 3$	Rata-rata	$\sigma_1 = 1$	$\sigma_2 = 3$	Rata-rata
50	0,233	0,297	0,267	0,287	0,526	0,423
100	0,079	0,175	0,136	0,075	0,327	0,238
200	0,078	0,101	0,090	0,017	0,051	0,038
300	0,087	0,089	0,088	0,009	0,041	0,030
			RMSE Total: 0,163			RMSE Total: 0,244



(a) R-value terhadap variasi laju aliran udara



(b) R-value terhadap variasi suhu masukan pipa

Gambar 9. Nilai RMSE estimasi R-Value terhadap variasi laju aliran

Selain metode estimasi untuk resistansi termal, telah dikembangkan pula metode estimasi rugi-rugi kalor, dengan menggunakan parameter masukan yang sama. Hasil pembelajaran metode ANFIS-Q memberikan nilai RMSE sebesar 10,0 W·m⁻¹. Mengingat rentang nilai rugi-rugi kalor yang diperkirakan jauh lebih besar daripada resistansi termal, nilai RMSE yang diperoleh tergolong sangat rendah. Model ANFIS-Q juga diujikan dengan himpunan data uji berukuran 41.546 data. Data uji tersebut memiliki rentang nilai antara 3,84-1724,01 W·m⁻¹ sehingga didapat nilai RMSE ternormalisasi sebesar 0.006. Berdasarkan nilai yang sangat rendah tersebut, model ANFIS-Q menunjukkan performa estimasi yang jauh lebih baik daripada model ANFIS-R.

Pengujian kemudian kembali dilakukan dengan menggunakan data uji yang telah ditambahkan dengan kesalahan untuk mensimulasikan kinerja metode ketika menggunakan data pengukuran. Pada Gambar 10(a) dapat dilihat nilai RMSE estimasi rugi-rugi kalor yang dihasilkan oleh metode ANFIS-Q maupun metode LSE terhadap variasi laju aliran volumetrik. Kedua hasil estimasi juga memiliki kecenderungan peningkatan nilai RMSE seiring dengan meningkatnya laju aliran. Nilai RMSE keseluruhan mengalami lonjakan nilai pada laju aliran 1.359,2 m³/jam sehingga tidak ditampilkan dan dimasukkan ke dalam perhitungan nilai RMSE, dengan nilai RMSE untuk metode ANFIS-Q dan metode LSE pada laju aliran tersebut berturut-turut adalah sebesar 48,07 dan 37,69 W·m⁻¹.

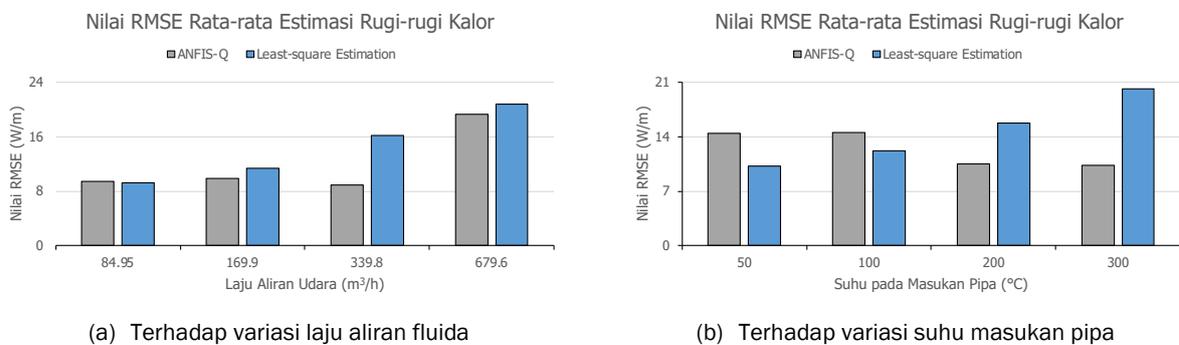
Masing-masing metode estimasi menunjukkan kecenderungan nilai RMSE yang berbeda terhadap variasi suhu udara pada masukan pipa, dengan nilai RMSE metode ANFIS-Q cenderung menurun seiring dengan bertambahnya suhu, sedangkan hal sebaliknya terjadi untuk metode LSE, sebagaimana yang dapat dilihat pada Gambar 10(b). Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, kinerja estimasi terbaik untuk nilai rugi-rugi kalor diperoleh dari metode estimasi ANFIS-Q dengan nilai RMSE keseluruhan sebesar 12,64 W·m⁻¹. Adapun nilai RMSE keseluruhan metode estimasi LSE adalah sebesar 15,07 W·m⁻¹.

Tabel 5. Perbandingan nilai RMSE rugi-rugi kalor (W·m⁻¹) berdasarkan laju aliran

Metode:	ANFIS-Q			Optimasi LSE			
STDEV:	$\sigma_1 = 1$	$\sigma_2 = 3$	Rata-rata	$\sigma_1 = 1$	$\sigma_2 = 3$	Rata-rata	
84,95	8,77	10,16	9,46	8,68	9,72	9,21	
169,90	7,39	11,81	9,85	10,46	12,19	11,36	
339,80	4,86	11,55	8,86	12,04	19,52	16,22	
679,60	13,70	23,65	19,33	13,52	26,07	20,77	
1.359,20	34,96	58,30	48,07	20,56	49,18	37,69	
RMSE Total:			24,29	RMSE Total:			21,58

Tabel 6. Perbandingan nilai RMSE rugi-rugi kalor (W·m⁻¹) berdasarkan suhu

Metode:	ANFIS-Q			Optimasi LSE			
STDEV:	$\sigma_1 = 1$	$\sigma_2 = 3$	Rata-rata	$\sigma_1 = 1$	$\sigma_2 = 3$	Rata-rata	
50	11,49	16,89	14,44	4,59	13,67	10,20	
100	7,28	19,27	14,56	6,64	15,89	12,18	
200	9,19	11,76	10,55	11,45	19,15	15,78	
300	8,58	11,87	10,36	17,78	22,31	20,17	
RMSE Total:			12,64	RMSE Total:			15,07



Gambar 10. Nilai RMSE estimasi rugi-rugi kalor

Diskusi

Dari pengujian kinerja metode dapat dikatakan bahwa dengan menggunakan data pengukuran laju aliran beserta suhu aliran udara dalam pipa dan permukaan pipa, metode estimasi ANFIS menunjukkan kinerja estimasi terbaik. Secara spesifik, metode ANFIS-R menunjukkan kinerja estimasi terbaik untuk resistansi termal, sedangkan metode ANFIS-Q untuk rugi-rugi kalor. Penggunaan metode estimasi ANFIS memungkinkan nilai resistansi termal atau rugi-rugi kalor dapat diperoleh langsung pada saat pengukuran.

Mengingat besaran yang ingin diukur adalah rugi-rugi kalor maka metode ANFIS-Q dipilih sebagai metode estimasi yang digunakan. Untuk mendapatkan kinerja estimasi terbaik, pengukuran dapat dilakukan pada kondisi yang memungkinkan untuk didapatkannya galat minimal. Berdasarkan laju aliran volumetrik, diperoleh nilai RMSE terendah pada laju aliran 339,8 m³/jam sebesar 8,86 W·m⁻¹. Walaupun demikian, tidak terdapat perbedaan yang signifikan untuk laju aliran yang lebih rendah sehingga berdasarkan hasil pengujian metode ANFIS-Q dapat digunakan pada laju aliran 84,95 hingga 339,8 m³/jam. Adapun berdasarkan suhu aliran udara pada masukan pipa, nilai RMSE terendah diperoleh pada suhu 300 °C dengan nilai sebesar 10,36 W·m⁻¹. Hasil

pengujian mengindikasikan bahwa galat dapat diminimalisir dengan meningkatkan suhu aliran udara pada masukan pipa sehingga terjadi penurunan suhu yang lebih tinggi pada arah aliran. Nilai suhu tersebut dipengaruhi oleh kapasitas daya pemanas elektrik sehingga diperlukan proses perancangan yang tepat agar suhu yang diinginkan dapat tercapai. Selain itu, pertimbangan keamanan juga perlu diperhatikan dalam proses perancangan.

Keunggulan yang dimiliki metode estimasi LSE dibandingkan ANFIS adalah kemudahan dalam pengembangan. Secara keseluruhan, metode estimasi LSE memiliki performa yang relatif lebih buruk daripada metode estimasi ANFIS, baik untuk resistansi termal maupun rugi-rugi kalor. Selain performa, metode estimasi LSE juga kalah unggul dari ANFIS dari sisi komputasi perhitungan nilai keluaran. Hal ini disebabkan karena metode estimasi LSE perlu melakukan iterasi untuk menemukan nilai resistansi termal. Pada setiap iterasi dilakukan optimasi nilai resistansi termal dan hal ini memerlukan program simulasi untuk dijalankan sehingga cenderung memakan waktu yang lebih lama untuk memberikan nilai keluaran. Iterasi dilakukan hingga ditemukan suatu nilai resistansi termal yang menghasilkan galat minimal antara nilai distribusi suhu berdasarkan simulasi dan data pengukuran. Kelemahan pada waktu komputasi ini menyebabkan metode estimasi LSE untuk tidak menjadi pilihan yang tepat untuk penggunaan pengukuran secara *real-time*.

Kesimpulan

Metode estimasi ANFIS-R dipilih sebagai metode yang digunakan karena menunjukkan kinerja estimasi keseluruhan terbaik untuk nilai *R-Value*, dengan nilai RMSE keseluruhan sebesar $0,163 \text{ m}^2\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$. Metode estimasi ANFIS-Q dipilih sebagai metode yang digunakan karena menunjukkan kinerja estimasi keseluruhan terbaik untuk nilai rugi-rugi kalor, dengan nilai RMSE keseluruhan sebesar $12,64 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, metode ANFIS-Q berlaku untuk rentang laju aliran volumetrik $84,95\text{-}679,6 \text{ m}^3/\text{jam}$.

Referensi

- [1] X. Liu et al., "Analysis of transmission characteristics of steam long-distance heating pipeline," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 242–253, 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.10.034.
- [2] E. Bell, Y. Lu, N. Daraboina, and C. Sarica, "Thermal methods in flow assurance: A review," *J Nat Gas Sci Eng*, vol. 88, no. November 2020, p. 103798, 2021, doi: 10.1016/j.jngse.2021.103798.
- [3] D. Wang, "Heat loss along the pipeline and its control measures," *SN Appl Sci*, vol. 5, no. 1, 2023, doi: 10.1007/s42452-022-05226-2.
- [4] N. Sunday, A. Settar, K. Chetehouna, and N. Gascoin, "An overview of flow assurance heat management systems in subsea flowlines," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 2, 2021, doi: 10.3390/en14020458.
- [5] E. G. Gasho and A. I. Kiseleva, "Analysis of energy-saving measures in industrial steam supply systems," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 791, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/791/1/012042.
- [6] A. N. Dolgova, S. A. Yunak, A. S. Rudenko, A. I. Haibullina, and E. S. Karataeva, "Comparative efficiency of pipeline heat-insulating materials," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 915, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/915/1/012010.
- [7] D. Bozsaky, "Recent studies on thermodynamic processes in nano-ceramic thermal insulation coatings," *Pollack Periodica*, vol. 14, no. 1, pp. 107–116, 2019, doi: 10.1556/606.2019.14.1.11.
- [8] S. E. Kalnæs and B. P. Jelle, "Vacuum insulation panel products: A state-of-the-art review and future research pathways," *Appl Energy*, vol. 116, no. 7465, pp. 355–375, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.11.032.
- [9] J. Yang, M. I. Lourenço, and S. F. Estefen, "Thermal insulation of subsea pipelines for different materials," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 168, no. August, pp. 100–109, 2018, doi: 10.1016/j.ijpvp.2018.09.009.
- [10] T. L. Bergman, and A. S. Lavine, F. P. Incropera, and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons Inc, 2011.
- [11] D. Bozsaky, "Laboratory Tests with Liquid Nano-ceramic Thermal Insulation Coating," in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2015, pp. 68–75. doi: 10.1016/j.proeng.2015.10.059.
- [12] J. S. R. Jang, C. T. Sun, and E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing - A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall Inc, 1997.
- [13] *Standard Methods for Laboratory Air-flow Measurement*. : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc, Atlanta, 1987.