ANALISIS RESPONS TERMAL *TRANSIEN ANNULAR FIN* SEBAGAI PEMBATAS TEMPERATUR PADA *CYLINDER PRESSURE SENSOR* MESIN DIESEL

Fathir Moh. Dzulfikar[1, *], Elita Nawalia Agustin[1], Susilo Handoko[1]
[1]Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jalan Gajah Mada No. 38, Cepu, 58315
**E-mail*: fathirzulfikar04@gmail.com

ABSTRAK

Pressure sensor pada mesin diesel dipasang pada port bersuhu tinggi dengan temperatur mencapai 500°C, sedangkan batas maksimum temperatur operasi sensor ditetapkan sebesar 80°C. *Annular fin* berbahan aluminium 6061-T6 digunakan sebagai *thermal adapter* untuk melindungi sensor dari paparan panas berlebih. Penelitian ini menganalisis distribusi temperatur transien pada *annular fin* melalui simulasi numerik menggunakan ANSYS *Transient Thermal* dengan pendekatan konduksi pada kondisi *adiabatic*. Geometri *annular fin* memiliki panjang 120 mm dengan 16 sirip, diameter luar 60 mm, dan diameter dalam 15 mm. Kondisi batas temperatur 500°C diterapkan pada sisi port dengan temperatur awal seluruh komponen sebesar 40°C. Hasil simulasi menunjukkan bahwa temperatur pada lokasi *pressure sensor* mencapai 80°C pada waktu 117,27 detik, yang hampir bersamaan dengan durasi pemasangan aktual sebesar 120 detik. Margin waktu termal antara waktu tercapainya batas temperatur sensor dan durasi operasi hanya sekitar 2,73 detik, atau ekuivalen dengan rasio waktu tercapainya batas temperatur terhadap durasi operasi sebesar 0,977. Gradien temperatur sepanjang jalur konduksi dari port menuju sensor menunjukkan peran *thermal resistance* dan *thermal mass annular fin* dalam menunda propagasi energi panas secara transien. Model simulasi *conduction-only* pada kondisi *adiabatic* menghasilkan prediksi yang bersifat konservatif karena mengabaikan *heat loss* melalui konveksi alami dan radiasi dari permukaan *fin*. Hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi *annular fin* yang dianalisis memiliki margin waktu termal yang sangat terbatas terhadap batas temperatur operasi sensor. Oleh karena itu, peningkatan kapasitas pelepasan panas dan/atau optimasi geometri *annular fin* perlu dipertimbangkan untuk meningkatkan margin keselamatan termal pada aplikasi aktual.

Kata kunci: Perpindahan Panas Transien, Annular Fin, Thermal Barrier, Pressure Sensor, ANSYS Transient Thermal

1. PENDAHULUAN

Pengukuran tekanan merupakan parameter operasional kritis dalam pemantauan kinerja mesin diesel, terutama pada aplikasi yang membutuhkan akurasi tinggi untuk menjaga efisiensi dan keamanan operasi [1]. *Pressure sensor* umumnya dipasang pada port atau *indicator port* mesin untuk mengakses fluida kerja secara langsung. Namun, kondisi termal pada area pemasangan sensor sering kali berada pada tingkat temperatur yang sangat tinggi, mencapai 500°C pada kondisi operasi tertentu [2]. Kondisi ini menimbulkan risiko kerusakan pada sensor karena batas maksimum temperatur operasi *pressure sensor* yang umum digunakan hanya sekitar 80°C [3]. Paparan temperatur melebihi batas tersebut dapat menyebabkan degradasi komponen internal sensor, *drift* pembacaan, hingga kegagalan permanen.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan suatu mekanisme *thermal protection* yang mampu memperlambat perpindahan panas dari port bersuhu tinggi menuju *pressure sensor*. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah pemasangan *annular fin* atau *thermal adapter* sebagai media perantara konduksi panas. *Annular fin* merupakan komponen berbentuk

tabung dengan sirip-sirip melingkar yang umumnya digunakan untuk meningkatkan laju perpindahan panas dari permukaan tabung ke fluida sekitarnya [4]. Dalam konteks ini, *annular fin* dimanfaatkan bukan untuk meningkatkan *heat transfer*, melainkan sebagai jalur konduksi dengan *thermal resistance* dan *thermal mass* yang bersama-sama menunda propagasi temperatur transien dari port menuju sensor [5].

Perpindahan panas dari port menuju *pressure sensor* melalui *annular fin* bersifat transien, yang berarti temperatur pada setiap titik komponen berubah terhadap waktu. Analisis *steady-state* tidak memadai untuk menjawab pertanyaan kritis mengenai pada saat berapa detik temperatur sensor mencapai batas maksimumnya. Konduksi transien pada padatan dikendalikan oleh persamaan panas yang melibatkan *thermal diffusivity* material, geometri komponen, serta kondisi batas temperatur [6]. *Thermal diffusivity* aluminium 6061-T6 sebesar 6,90 × 10^-5 m²/s menunjukkan bahwa energi panas memerlukan waktu untuk merambat sepanjang jalur konduksi 120 mm dari port menuju sensor.

Beberapa penelitian terdahulu telah memanfaatkan metode *finite element* untuk menganalisis distribusi temperatur pada komponen bersirip. Analisis termal pada *annular fin* dengan metode numerik telah diteliti untuk berbagai konfigurasi geometri dan kondisi batas [7], [8]. Simulasi menggunakan ANSYS juga telah banyak digunakan untuk analisis perpindahan panas transien pada berbagai komponen *engineering* [9]. Namun, penelitian-penelitian tersebut pada umumnya berfokus pada karakteristik distribusi temperatur, pengaruh geometri, atau respons termal komponen berdasarkan kondisi batas yang ditentukan, sehingga belum secara spesifik mengkaji *annular fin* sebagai *thermal adapter* untuk melindungi *pressure sensor* yang dipasang pada port mesin diesel bersuhu tinggi. Selain itu, pendekatan yang menghubungkan hasil distribusi temperatur transien dengan waktu tercapainya batas temperatur operasi sensor selama durasi pemasangan aktual masih terbatas. Penelitian ini secara khusus membedakan pendekatannya dengan tidak hanya mengevaluasi distribusi temperatur pada *annular fin*, tetapi juga menelusuri propagasi temperatur dari port menuju lokasi sensor dan menentukan waktu ketika temperatur sensor mencapai batas operasi maksimumnya. Dengan demikian, parameter waktu digunakan sebagai dasar evaluasi *thermal protection* dan margin waktu operasi sensor pada kondisi pemasangan sementara [10].

Berdasarkan permasalahan dan *research gap* tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi temperatur transien pada *annular fin* aluminium 6061-T6 yang digunakan sebagai *thermal barrier* pada *pressure sensor*, serta menentukan waktu kritis tercapainya batas temperatur sensor. Artikel ini disusun dengan sistematika sebagai berikut: bagian pertama memaparkan pendahuluan, bagian kedua menjelaskan metode penelitian, bagian ketiga membahas hasil dan analisis, bagian keempat berisi simpulan, dan bagian kelima memuat daftar pustaka.

2. METODE

A. Geometri Annular Fin

Objek penelitian ini adalah annular fin yang berfungsi sebagai thermal adapter antara port mesin diesel dan pressure sensor. Geometri annular fin didesain dengan konfigurasi tabung bersirip melingkar, yang terdiri dari bagian dasar tabung (tube base) dan 16 buah sirip annular yang terpasang secara merata sepanjang axial. Dimensi geometri annular fin ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 menunjukkan bahwa annular fin memiliki panjang total 120 mm dengan diameter luar sirip 60 mm dan diameter dalam 15 mm. Diameter luar tabung dasar sebesar 30 mm, sehingga tinggi sirip yang dihitung adalah 15 mm. Konfigurasi geometri ini menghasilkan jalur konduksi axial sepanjang 120 mm dari sisi port (sisi A) menuju lokasi pressure sensor (sisi B).

Penempatan pressure sensor berada pada ujung far-field, yaitu sisi yang paling jauh dari port bersuhu tinggi.

Tabel 1. Dimensi Geometri Annular Fin

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Panjang total	L	120	mm
Diameter luar sirip	Dfo	60	mm
Diameter dalam	Di	15	mm
Diameter luar tabung dasar	Do	30	mm
Jumlah sirip	Nf	16	-
Tebal sirip	tf	2	mm
Tinggi sirip	hf	15	mm
Jari-jari luar sirip	Rfo	30	mm
Jari-jari dasar tabung	Rbase	15	mm

B. Properti Material

Annular fin terbuat dari aluminium alloy 6061-T6 yang merupakan paduan aluminium yang umum digunakan pada aplikasi struktural dan thermal karena kombinasi kekuatan mekanik yang baik serta thermal conductivity yang tinggi [6]. Properti termal aluminium 6061-T6 yang digunakan dalam simulasi ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Properti Termal Aluminium 6061-T6

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Densitas	ρ	2700	kg/m³
Thermal conductivity	k	167	W/(m·K)
Specific heat capacity	Cp	896	J/(kg·K)
Thermal diffusivity	α	$6{,}90 \times 10^{-5}$	m²/s

Thermal diffusivity dihitung berdasarkan hubungan antara thermal conductivity, densitas, dan specific heat capacity. Nilai thermal diffusivity sebesar 6,90 x 10^-5 m^2/s menunjukkan kemampuan aluminium 6061-T6 dalam menghantarkan perubahan temperatur secara transien. Nilai ini menjadi parameter kunci yang menentukan seberapa cepat energi panas merambat melalui material annular fin dari port menuju sensor.

C. Model Matematika Perpindahan Panas

Mekanisme perpindahan panas yang dianalisis dalam penelitian ini adalah konduksi transien pada padatan. Hukum Fourier menggambarkan hubungan antara heat flux dan gradien temperatur sebagai berikut:

$$q'' = -k\,(dT/dx) \tag{1}$$

di mana q" adalah heat flux (W/m²), k adalah thermal conductivity (W/m·K), dan dT/dx adalah gradien temperatur sepanjang arah konduksi (K/m). Persamaan ini menunjukkan bahwa heat flux berbanding lurus dengan gradien temperatur dan thermal conductivity material.

Persamaan panas untuk konduksi transien satu dimensi pada koordinat Kartesius dituliskan sebagai:

$$\partial T/\partial t = \alpha\,(\partial^2 T/\partial x^2) \tag{2}$$

di mana α adalah thermal diffusivity (m²/s) yang didefinisikan sebagai:

$$\alpha = k / (\rho \cdot Cp) \tag{3}$$

Fourier number (Fo) digunakan sebagai parameter tanpa dimensi untuk mengkarakterisasi proses transien:

$$Fo = \alpha \cdot t / L^2 \quad (4)$$

di mana t adalah waktu (s) dan L adalah karakteristik panjang (m). Fourier number yang lebih besar dari 0,2 umumnya menunjukkan bahwa efek transien sudah cukup signifikan pada titik yang dianalisis.

Thermal resistance akibat konduksi pada jalur panjang L dengan luas penampang Ac didefinisikan sebagai:

$$R_cond = L / (k \cdot Ac) \quad (5)$$

Untuk geometri tabung annular, luas penampang dihitung sebagai:

$$Ac = (\pi/4)(Do^2 - Di^2) \quad (6)$$

Nilai parameter geometri dan material yang digunakan menghasilkan luas penampang Ac = 5,301 x 10^-4 m^2 dan thermal resistance R_cond = 1,356 K/W. Nilai thermal resistance ini menggambarkan hambatan terhadap aliran energi panas dari port menuju sensor melalui material aluminium.

D. Kondisi Batas dan Kondisi Awal

Simulasi transient thermal dilakukan dengan kondisi batas dan kondisi awal sebagai berikut. Temperatur awal seluruh komponen annular fin ditetapkan sebesar 40°C. Temperatur port (sisi A) diberikan kondisi batas temperatur tetap sebesar 500°C selama seluruh durasi simulasi. Sisa permukaan annular fin dianggap adiabatic, yaitu tidak terjadi heat loss ke lingkungan sekitar melalui konveksi atau radiasi. Asumsi adiabatic ini merupakan penyederhanaan model yang menghasilkan prediksi temperatur pada sisi sensor bersifat konservatif (batas atas), karena dalam kondisi aktual terdapat heat loss melalui konveksi alami dan radiasi dari permukaan fin ke udara sekitar.

Durasi simulasi ditetapkan untuk merepresentasikan kondisi operasional aktual, yaitu periode pemasangan pressure sensor pada port mesin. Parameter utama yang dianalisis adalah temperatur pada lokasi pressure sensor terhadap waktu, dengan fokus pada penentuan waktu kritis t80, yaitu waktu minimum ketika temperatur sensor mencapai 80°C.

E. Pengaturan Simulasi ANSYS

Simulasi numerik dilakukan menggunakan ANSYS 2026 R1 Student Version dengan modul *Transient Thermal*. Model tiga dimensi dianalisis menggunakan material aluminium 6061-T6 dengan properti termal konstan. *Mesh generation* menggunakan elemen tetrahedral kuadratik 10-node dengan ukuran elemen 5 mm, menghasilkan sekitar 96.842 elemen dan 153.706 *node*. Studi kemandirian mesh dilakukan pada empat tingkat kehalusan, dengan perubahan temperatur maksimum antar-mesh sebesar 0,67%, sehingga memenuhi kriteria perubahan <5%. Mesh 5 mm dipilih karena memberikan hasil yang stabil dengan waktu komputasi lebih efisien.

Time step ditetapkan sebesar 0,1 s berdasarkan kriteria $Fo = \alpha \Delta t/(\Delta x)^2 < 0{,}5$. Dengan difusivitas termal aluminium 6061-T6 sebesar $8{,}6 \times 10^{-5}$ m²/s dan ukuran elemen 5 mm, diperoleh $Fo = 0{,}344$, sehingga memenuhi kriteria yang ditetapkan.

F. Kriteria Evaluasi

Parameter utama evaluasi adalah t80, yaitu waktu minimum ketika temperatur pada lokasi

pressure sensor mencapai atau melebihi 80°C. Definisi matematisnya adalah:

$$t80 = \min\{t \mid T_sensor(t) \geq 80°C\} \quad (7)$$

Perbandingan antara t80 dan durasi pemasangan aktual (120 detik) menghasilkan margin waktu thermal:

$$\Delta t = t80 - t_operation \quad (8)$$

Nilai Δt yang positif menunjukkan bahwa sensor belum mencapai batas temperatur selama durasi operasi, sedangkan nilai negatif menunjukkan bahwa batas temperatur tercapai sebelum durasi operasi berakhir.

3. PEMBAHASAN

A. Karakteristik Geometri dan Properti Material

Annular fin yang menjadi objek penelitian memiliki karakteristik geometri yang menentukan jalur dan resistensi perpindahan panas. Dengan panjang total 120 mm, diameter luar sirip 60 mm, dan 16 buah sirip ber-tebal 2 mm, geometri ini menghasilkan konfigurasi dengan rasio panjang-diameter sekitar 2:1. Luas penampang efektif jalur konduksi axial sebesar 5,301 x 10^-4 m^2, yang merupakan hasil dari luas penampang tabung annular dengan diameter luar 30 mm dan diameter dalam 15 mm.

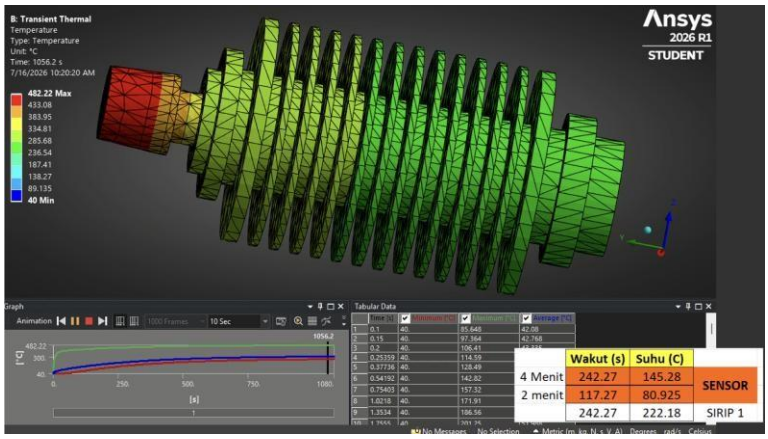
Thermal conductivity aluminium 6061-T6 sebesar 167 W/m·K merupakan nilai yang relatif tinggi dibandingkan material lain yang umum digunakan untuk komponen mekanis, seperti baja karbon (k ~ 50 W/m·K) atau stainless steel (k ~ 16 W/m·K). Meskipun thermal conductivity yang tinggi umumnya menguntungkan untuk transfer panas, dalam konteks annular fin sebagai thermal barrier, thermal conductivity yang tinggi berarti energi panas dapat merambat dengan lebih cepat menuju sensor. Oleh karena itu, mekanisme penundaan temperatur pada annular fin ini lebih banyak bergantung pada thermal massa (kapasitas termal) material daripada pada thermal resistance geometri.

Thermal resistance total jalur konduksi axial dari port menuju sensor dapat dihitung menggunakan Pers. (5), menghasilkan nilai R_cond = 1,356 K/W. Nilai ini menggambarkan hambatan terhadap aliran energi panas statis. Namun, dalam kondisi transien, respons temperatur sensor tidak hanya ditentukan oleh thermal resistance, melainkan juga oleh thermal capacitance (muatan termal) material yang diwakili oleh produk antara densitas, volume, dan specific heat capacity.

B. Distribusi Temperatur Transien

Hasil simulasi ANSYS Transient Thermal menghasilkan distribusi temperatur transien pada annular fin selama periode pengamatan. Pada saat t = 0 detik, seluruh komponen berada pada temperatur awal 40°C. Ketika kondisi batas temperatur 500°C diterapkan pada sisi port, energi panas mulai merambat melalui mekanisme konduksi dari sisi port (sisi A) menuju sisi sensor (sisi B).

Kontur temperatur pada t = 1056,2 detik (sekitar 17,6 menit) menunjukkan distribusi temperatur yang tidak seragam sepanjang annular fin. Temperatur maksimum sebesar 482,22°C terkonsentrasi pada area yang berdekatan dengan interface port, sedangkan temperatur minimum sebesar 40°C tercatat pada area yang paling jauh dari port. Gradien temperatur yang signifikan dari sisi port menuju sisi sensor mengindikasikan adanya thermal resistance yang efektif pada jalur konduksi, meskipun thermal conductivity aluminium 6061-T6 tergolong tinggi.



Gambar 1. Hasil simulasi annular fins

Pola distribusi temperatur ini menunjukkan bahwa propagasi panas melalui annular fin bersifat gradual. Energi panas dari port pada 500°C tidak langsung merambat ke seluruh komponen secara seragam, melainkan secara bertahap menyebar dari sisi port menuju sisi sensor. Kecepatan propagasi ini ditentukan oleh thermal diffusivity material dan geometri jalur konduksi.

C. Respons Temperatur Transien pada Pressure Sensor

Respons temperatur pada lokasi pressure sensor (sisi B, ujung far-field dari port) terhadap waktu merupakan data kunci dalam penelitian ini. Berdasarkan hasil simulasi ANSYS, data respons temperatur sensor ditunjukkan pada Tabel 3.

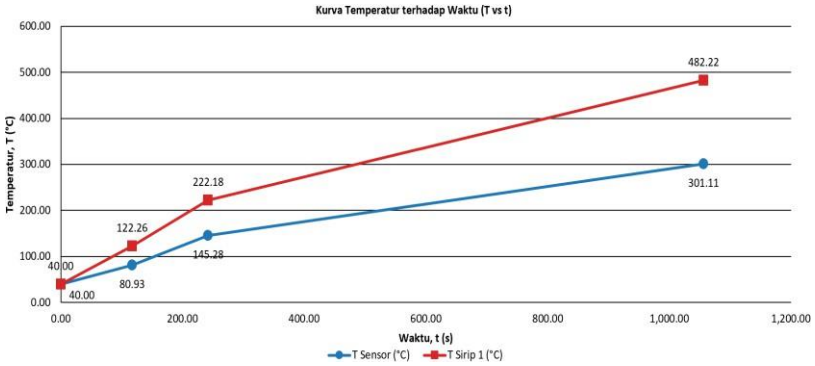
Tabel 3. Respons Temperatur pada Pressure Sensor dan Sirip 1

Waktu (s)	T Sensor (°C)	T Sirip 1 (°C)	Keterangan
0	40	40	Temperatur awal
117,27	80,925	122,26	Mencapai t80
242,27	145,28	222,18	4 menit
1056,2	301,11	482,22	T_max = 482,22°C

Tabel 3 menunjukkan bahwa temperatur pada lokasi sensor mengalami peningkatan yang signifikan dari waktu ke waktu. Pada t = 117,27 detik, temperatur sensor mencapai 80,925°C, yang merupakan nilai pertama yang melebihi batas maksimum 80°C. Pada t = 242,27 detik, temperatur sensor telah meningkat menjadi 145,28°C, dan pada waktu yang sama temperatur pada sirip pertama (sirip 1, sisi port) mencapai 222,18°C.

Data pada Tabel 3 juga memperlihatkan bahwa temperatur pada sirip 1 lebih tinggi dibandingkan temperatur sensor pada waktu yang sama. Hal ini konsisten dengan posisi sirip 1 yang lebih dekat ke port bersuhu 500°C, sehingga energi panas yang diterima lebih besar dan waktu yang diperlukan untuk mencapai temperatur tertentu lebih singkat. Perbedaan temperatur antara sirip 1 dan sensor pada t = 242,27 detik sebesar 76,9°C menggambarkan gradien temperatur axial yang terbentuk sepanjang jalur konduksi.

Temperatur maksimum pada t = 1056,2 detik mencapai 482,22°C, yang mendekati temperatur port sebesar 500°C. Hal ini menunjukkan bahwa setelah durasi yang cukup lama, distribusi temperatur mendekati kondisi steady-state di mana seluruh komponen akan berada pada temperatur yang relatif seragam mendekati temperatur port. Namun, pada periode awal transien (0 hingga beberapa ratus detik), distribusi temperatur masih sangat tidak seragam.



Gambar 2. Kurva temperatur terhadap waktu

D. Penentuan Waktu Kritis t80

Parameter t80 didefinisikan sebagai waktu minimum ketika temperatur pada lokasi pressure sensor mencapai atau melebihi 80°C, sebagaimana dinyatakan dalam Pers. (7). Berdasarkan hasil simulasi ANSYS, diperoleh nilai:

t80 = 117,27 detik (setara dengan 1,95 menit)

Nilai ini menunjukkan bahwa temperatur pressure sensor mencapai batas maksimumnya 80°C setelah annular fin terpapar port bersuhu 500°C selama 117,27 detik. Secara physical, nilai t80 yang diperoleh konsisten dengan estimasi Fourier number pada waktu tersebut, yaitu Fo = 0,562 (menggunakan Pers. (4)), yang berada pada rentang transien di mana propagasi panas telah merambat cukup jauh dari sisi port menuju sisi sensor.

Waktu karakteristik termal annular fin dapat diestimasi menggunakan hubungan $\tau = L^2/\alpha$, yang menghasilkan nilai sekitar 208,6 detik. Nilai t80 yang sebesar 117,27 detik merupakan sekitar 56,2% dari waktu karakteristik termal ini. Hal ini menunjukkan bahwa temperatur sensor mencapai 80°C pada saat energi panas telah merambat secara signifikan, namun belum mencapai kondisi mendekati steady-state.

E. Evaluasi terhadap Durasi Pemasangan 120 Detik

Durasi pemasangan annular fin pada kondisi operasional aktual adalah 120 detik (2 menit). Hasil simulasi menunjukkan bahwa t80 = 117,27 detik, yang berarti temperatur sensor mencapai batas 80°C sekitar 2,73 detik sebelum durasi operasi berakhir. Perbandingan ini ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Durasi Operasi dan Waktu Kritis t80

Parameter	Nilai
Temperatur port	500°C
Temperatur awal	40°C
Batas maksimum temperatur sensor	80°C
Durasi pemasangan aktual (t_operation)	120 detik
Waktu tercapainya 80°C (t80)	117,27 detik
Margin waktu (Δt)	−2,73 detik
Rasio keselamatan waktu	0,977
Persentase margin waktu	−2,275%

Tabel 4 menunjukkan bahwa margin waktu thermal bernilai negatif sebesar −2,73 detik, yang berarti batas temperatur sensor tercapai sebelum durasi operasi 120 detik berakhir. Rasio

keselamatan waktu (safety time ratio) sebesar 0,977 menunjukkan bahwa t80 mencapai 97,7% dari durasi operasi. Persentase margin waktu sebesar −2,275% mengkonfirmasi bahwa sensor melewati batas temperatur maksimumnya pada saat operasi pemasangan masih berlangsung.

Temperatur aktual sensor pada t = 120 detik tidak dapat ditentukan secara eksak dari data yang tersedia, namun berdasarkan dua titik data yang ada (80,925°C pada 117,27 detik dan 145,28°C pada 242,27 detik), temperatur sensor pada t = 120 detik diperkirakan berada sedikit di atas 80°C. Hal ini menunjukkan bahwa dalam kondisi simulasi konduksi-only adiabatic, pressure sensor sedikit melampaui batas temperatur maksimumnya pada akhir periode pemasangan.

Temuan ini memiliki implikasi penting terhadap praktik operasional. Meskipun durasi operasi 120 detik secara numerik sedikit melebihi waktu tercapainya batas temperatur, perlu dicatat bahwa simulasi ini menggunakan asumsi adiabatic yang bersifat konservatif. Dalam kondisi aktual, terdapat heat loss melalui konveksi alami dari permukaan fin ke udara sekitar serta radiasi termal dari permukaan fin. Heat loss tersebut akan menurunkan laju kenaikan temperatur pada sensor, sehingga t80 aktual kemungkinan lebih panjang dari 117,27 detik. Selain itu, thermal contact resistance antara port dan annular fin serta antara annular fin dan sensor juga akan menambah hambatan termal yang memperlambat propagasi panas.

F. Gradien Temperatur dan Karakteristik Jalur Perpindahan Panas

Analisis gradien temperatur sepanjang jalur konduksi dari port menuju sensor memberikan wawasan mengenai karakteristik perpindahan panas pada annular fin. Berdasarkan data temperatur pada t = 242,27 detik, temperatur pada sirip 1 (sisi port) adalah 222,18°C, sedangkan temperatur pada sensor (sisi B) adalah 145,28°C. Gradien temperatur axial rata-rata antara kedua titik ini dapat diestimasi sebagai:

$$dT/dx = (T_sirip1 - T_sensor) / L = (222{,}18 - 145{,}28) / 0{,}120 = 640{,}8 \text{ K/m} \quad (9)$$

Gradien temperatur ini menghasilkan heat flux yang dapat dihitung menggunakan Pers. (1):

$$q'' = k \times dT/dx = 167 \times 640{,}8 = 107.014 \text{ W/m}^2 \quad (10)$$

Nilai heat flux ini menggambarkan laju perpindahan energi panas per satuan luas pada kondisi transien pada t = 242,27 detik. Heat flux ini akan berkurang seiring waktu karena gradien temperatur mengecil ketika sistem mendekati kondisi steady-state.

Temperatur port 500°C tidak langsung menyebar ke seluruh komponen karena beberapa faktor. Pertama, thermal massa annular fin harus menyerap energi panas yang cukup sebelum temperatur lokal meningkat. Kedua, panjang jalur konduksi sebesar 120 mm memerlukan waktu yang signifikan untuk merambatkan energi panas dari satu ujung ke ujung lainnya. Ketiga, meskipun thermal conductivity aluminium 6061-T6 tergolong tinggi, thermal resistance kumulatif dari seluruh jalur konduksi tetap menjadi penghalang terhadap propagasi temperatur yang cepat. Perpaduan antara thermal resistance dan thermal capacitance inilah yang menciptakan delay atau keterlambatan respons temperatur sensor terhadap perubahan temperatur pada port.

G. Implikasi Engineering dan Batasan Model

Hasil simulasi memberikan beberapa implikasi engineering yang penting untuk praktik operasional. Pertama, durasi pemasangan annular fin selama 120 detik berada tepat pada batas keamanan termal pressure sensor berdasarkan model simulasi konduksi-only. Margin waktu yang sangat tipis (−2,73 detik) menunjukkan bahwa secara numerik, batas temperatur sensor sedikit terlampaui selama periode operasi.

Kedua, keberadaan thermal contact resistance antara komponen-komponen akan meningkatkan t80 aktual karena menambah hambatan termal pada jalur perpindahan panas. Nilai thermal contact resistance untuk aluminium-to-aluminium dalam kondisi kontak kering berkisar pada orde 10^-4 m²·K/W, yang dapat memberikan kontribusi resistansi tambahan yang signifikan terhadap jalur konduksi total.

Ketiga, model adiabatic yang digunakan menghasilkan prediksi yang konservatif. Dalam kondisi aktual, permukaan annular fin mengalami heat loss melalui konveksi alami ke udara sekitar dan radiasi termal. Heat loss ini akan menurunkan laju kenaikan temperatur pada seluruh komponen, termasuk pada lokasi sensor. Oleh karena itu, t80 aktual kemungkinan lebih panjang dari 117,27 detik yang diprediksi oleh model simulasi.

Keempat, model simulasi ini menggunakan properti material konstan. Pada kenyataannya, thermal conductivity aluminium 6061-T6 menurun pada temperatur yang lebih tinggi, dari sekitar 167 W/m·K pada temperatur kamar menjadi sekitar 155 W/m·K pada 400°C [6]. Penurunan thermal conductivity akan memperlambat konduksi dan memperpanjang t80, yang berkontribusi pada keamanan sensor.

Batasan utama dari model ini adalah asumsi konduksi-only dan kondisi adiabatic. Model sensitivitas yang memasukkan konveksi alami (dengan koefisien konveksi yang representative untuk udara diam, h ~ 5–25 W/m²·K) dan radiasi (dengan emisivitas aluminium ~ 0,05–0,1) akan memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai respons termal aktual annular fin. Selain itu, variasi terhadap jumlah sirip, dimensi geometri, dan material dapat dilakukan sebagai studi parametrik untuk mengoptimalkan desain thermal adapter.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi numerik menggunakan ANSYS *Transient Thermal* dengan model *conduction-only adiabatic*, diperoleh simpulan sebagai berikut:

1. Temperatur pada lokasi *pressure sensor* mencapai batas maksimum 80°C pada t_{80} = 117,27 detik, sedangkan durasi pemasangan aktual 120 detik. Kondisi ini menghasilkan margin waktu termal sebesar −2,73 detik dan menunjukkan bahwa sensor mencapai batas operasinya sebelum pemasangan selesai.
2. *Thermal resistance* sebesar 1,356 K/W dan *thermal mass annular fin* berperan dalam memperlambat propagasi panas dari port 500°C menuju sensor.
3. Model *conduction-only adiabatic* bersifat konservatif karena belum memperhitungkan *thermal contact resistance*, konveksi alami, dan radiasi. Ketiga faktor tersebut berpotensi memperlambat peningkatan temperatur sensor, tetapi besarnya pengaruh secara kuantitatif memerlukan simulasi dan validasi tambahan.
4. Untuk meningkatkan margin termal, durasi operasi pada konfigurasi saat ini direkomendasikan dibatasi hingga ≤100 detik. Untuk durasi yang lebih panjang, optimasi jumlah/luas sirip dan konfigurasi material dapat dipertimbangkan serta perlu divalidasi melalui simulasi dan pengujian eksperimental.

Secara keseluruhan, *annular fin* mampu menunda pencapaian batas temperatur sensor hingga 117,27 detik, tetapi durasi pemasangan 120 detik memiliki margin termal yang sangat terbatas. Pembatasan durasi hingga ≤100 detik menjadi rekomendasi operasional konservatif berdasarkan hasil simulasi.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011, 1048 pp., ISBN 978-0-470-50197-9.

[2] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2015, 968 pp., ISBN 978-0-07-339818-1.

[3] J. P. Holman, *Heat Transfer*, 10th ed. Boston, MA, USA: McGraw-Hill Higher Education, 2010, 725 pp., ISBN 978-0-07126769-4.

[4] D. Q. Kern and A. D. Kraus, *Extended Surface Heat Transfer*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1972, 805 pp., ISBN 978-0-608-14708-6.

[5] M. N. Ozisik, *Heat Conduction*, 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley-Interscience, 1993, 692 pp., ISBN 978-0-471-53256-9.

[6] ASM International, *ASM Handbook, Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. Materials Park, OH, USA: ASM International, 1990, 1328 pp., ISBN 978-0-87170-378-1.

[7] ANSYS Inc., *ANSYS Mechanical APDL Thermal Analysis Guide, Release 2026 R1*. Canonsburg, PA, USA: ANSYS Inc., 2026, 126 pp.

[8] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 9th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2014, 905 pp., ISBN 978-1-118-31922-2.

[9] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, 4th ed. Burlington, MA, USA: Butterworth-Heinemann, 2011, 646 pp., ISBN 978-1-85617-663-7.

[10] Y. A. Cengel, *Heat Transfer: A Practical Approach*, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2003, 932 pp., ISBN 978-0-07245-938-8.

Daftar Simbol

Ac	= Luas penampang jalur konduksi, m²
Cp	= Specific heat capacity, J/(kg·K)
Dfo	= Diameter luar sirip, m
Di	= Diameter dalam, m
Do	= Diameter luar tabung dasar, m
Fo	= Fourier number, tanpa dimensi
hf	= Tinggi sirip, m
k	= Thermal conductivity, W/(m·K)
L	= Panjang total annular fin, m
Nf	= Jumlah sirip
q"	= Heat flux, W/m²
R_cond	= Thermal resistance konduksi, K/W
Rfo	= Jari-jari luar sirip, m
Rbase	= Jari-jari dasar tabung, m
T_init	= Temperatur awal, °C
T_port	= Temperatur port, °C
T_sens	= Temperatur pada lokasi pressure sensor, °C
t80	= Waktu tercapainya temperatur sensor 80°C,
s tf	= Tebal sirip, m
t_op	= Durasi pemasangan aktual, s
α	= Thermal diffusivity, m²/s
ρ	= Densitas, kg/m³
τ	= Waktu karakteristik termal, s
Δt	= Margin waktu thermal, s