

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

4.1.1 Data Kerusakan *Low Pressure Turbine*

Tabel 4.1
Data Kerusakan *Low Pressure Turbine*

| LPT Stage | Jumlah Blade | % Kerusakan | |
|-----------|--------------|-------------|------------|
| | | ESN 195231 | ESN 195341 |
| Stage 3 | 90 | 2,22% | 8,89% |
| Stage 4 | 94 | 6,38% | 5,32% |
| Stage 5 | 92 | 4,35% | 1,09% |
| Stage 6 | 94 | 2,13% | 3,19% |

4.1.2 Perhitungan

Perhitungan *Web Interface* General Electric

Engine 195231

- Normal Engine

| | |
|---------------------------|----------------------------|
| <i>Altitude</i> | : 206 m |
| <i>Airspeed</i> | : 83,16 m/s |
| <i>Thrust</i> | : 50.265,37 N |
| HV _{Jet Fuel A1} | : 42.800.000 J/kg |
| <i>Fuel Flow</i> | : 0,602 kg/s |
| T ₁ | : 13,66 °C = 286,66 K |
| T ₄ | : 927,85 °C = 1200,85 K |
| P _{r4} | : 238,7 |
| k | : 1,4 |
| r _p | : 16,5 |
| v ₁ | : 0,832 m ³ /kg |

Asumsi Isentropik

| | |
|---------------------------------|----------------|
| P ₁ = P ₄ | : 98,87 kPa |
| s ₁ = s ₂ | : 1,65 kJ/kg.K |
| s ₃ = s ₄ | : 3,17 kJ/kg. |

▪ Perhitungan Diagram P-v T-s

Proses 1-2

- $P_2 = r_p \times P_1$

$$P_2 = 16,5 \times 98,87 \text{ k}$$

$$P_2 = 1631,35 \text{ k}$$

$$P_2 = P_3 = 1631,35 \text{ kPa}$$

- $T_2 = T_1 \times \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$

$$T_2 = 286,66 \text{ K} \times \left(\frac{1631,35 \text{ k}}{98,87 \text{ k}}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}}$$

$$T_2 = 638,58 \text{ K}$$

- $v_1 = 0,832 \text{ m}^3/\text{kg}$, maka:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$$

$$\frac{638,58 \text{ K}}{286,66 \text{ K}} = \left(\frac{0,832 \text{ m}^3/\text{kg}}{v_2}\right)^{1,4-1}$$

$$v_2 = 0,112 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Proses 2-3

- $P_2 = P_3 = 1631,35 \text{ kPa}$

- $T_3 = T_4 \times \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}}$

$$T_3 = 1200,85 \text{ K} \times \left(\frac{1631,35 \text{ k}}{98,87 \text{ k}}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}}$$

$$T_3 = 2675,1 \text{ K}$$

- $v_2 = 0,112 \text{ m}^3/\text{kg}$, maka:

$$\frac{P_2 \times v_2}{T_2} = \frac{P_3 \times v_3}{T_3}$$

$$\frac{593,22 \text{ k} \times 0,112 \text{ m}^3/\text{kg}}{638,58 \text{ K}} = \frac{593,22 \text{ k} \times v_3}{2675,1 \text{ K}}$$

$$v_3 = 0,469 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$P_{13} = 7469,92$$

Proses 3-4

- $T_3 = 2675,1 \text{ K}$; $v_3 = 0,469 \text{ m}^3/\text{kg}$; $P_{r3} = 7469,92$; $T_4 = 1200,85 \text{ K}$; $P_{r4} = 238,7$ maka:

$$\frac{v_3}{v_4} = \frac{T_3/P_{r3}}{T_4/P_{r4}}$$

$$v_4 = v_3 \times \frac{T_4/P_{r4}}{T_3/P_{r3}}$$

$$v_4 = 0,469 \text{ m}^3/\text{k} \times \frac{1200,85 \text{ K}/238,7}{2675,1 \text{ K}/7469,92}$$

$$v_4 = 6,588 \text{ m}^3/\text{k}$$

▪ Perhitungan Kinerja Mesin

- $\dot{W}_p = F \times v$

$$\dot{W}_p = 50.265,37 \text{ N} \times 83,16 \text{ m/s}$$

$$\dot{W}_p = 4.180.420 \text{ W}$$

$$\dot{W}_p = 4,18 \text{ M}$$

- Efisiensi

$$\eta_p = \frac{\dot{W}_p}{\dot{m}_f \times H_{j, f, A1}}$$

$$\eta_p = \frac{4,18 \text{ M} / \text{s}}{0,602 \text{ kg/s} \times 42,8 \text{ M} / \text{k}} \times 100\%$$

$$\eta_p = 16,2\%$$

- *Problem Engine*

| | |
|---------------------------|----------------------------|
| <i>Altitude</i> | : 192 m |
| <i>Airspeed</i> | : 81,46 m/s |
| <i>Thrust</i> | : 48.223,2 N |
| $HV_{\text{Jet Fuel A1}}$ | : 42.800.000 J/kg |
| <i>Fuel Flow</i> | : 0,645 kg/s |
| T_1 | : 13,75 °C = 286,75 K |
| T_4 | : 970,37 °C = 1243,37 K |
| P_{r4} | : 275,41 |
| k | : 1,4 |
| r_p | : 16,5 |
| v_1 | : 0,839 m ³ /kg |
| Asumsi Isentropik | |
| $P_1 = P_4$ | : 99,04 kPa |
| $s_1 = s_2$ | : 1,64 kJ/kg.K |
| $s_3 = s_4$ | : 3,22 kJ/kg.K |

▪ Perhitungan Diagram P-v T-s

Proses 1-2

- $P_2 = r_p \times P_1$

$$P_2 = 16,5 \times 99,04 \text{ k}$$

$$P_2 = 1634,16 \text{ k}$$

$$P_2 = P_3 = 1634,16 \text{ kPa}$$

- $T_2 = T_1 \times \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$

$$T_2 = 286,75 \text{ K} \times \left(\frac{1634,16 \text{ k}}{99,04 \text{ k}}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}}$$

$$T_2 = 638,78 \text{ K}$$

- $v_1 = 0,839 \text{ m}^3/\text{kg}$, maka:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$$

$$\frac{638,78 K}{286,75 K} = \left(\frac{0,839 m^3/k}{v_2} \right)^{1,4-1}$$

$$v_2 = 0,113 m^3/k$$

Proses 2-3

- $P_2 = P_3 = 1634,16 \text{ kPa}$

- $T_3 = T_4 \times \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{k-1}{k}} T_3 = 1243,37 K \times \left(\frac{1,1 k}{9,0 k} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}}$

$$T_3 = 2769,82 K$$

- $v_2 = 0,233 m^3/kg$, maka:

$$\frac{P_2 \times v_2}{T_2} = \frac{P_3 \times v_3}{T_3}$$

$$\frac{1634,16 k \times 0,113 m^3/k}{638,78 K} = \frac{1634,16 k \times v_3}{2769,82 K}$$

$$v_3 = 0,489 m^3/k$$

$$P_{r3} = 8727,51$$

Proses 3-4

- $T_3 = 2769,82 K$; $v_3 = 0,489 m^3/kg$; $P_{r3} = 8727,51$; $T_4 = 1243,37 K$; $P_{r4} = 275,41$ maka:

$$\frac{v_3}{v_4} = \frac{T_3/P_{r3}}{T_4/P_{r4}}$$

$$v_4 = v_3 \times \frac{T_4/P_{r4}}{T_3/P_{r3}}$$

$$v_4 = 0,489 m^3/k \times \frac{1243,37 K / 275,41}{2769,82 K / 8727,51}$$

$$v_4 = 6,956 m^3/k$$

▪ Perhitungan Kinerja Mesin

- $\dot{W}_p = F \times v$

$$\dot{W}_p = 48.223,2 N \times 81,46 m/s$$

$$\dot{W}_p = 3.928.262 W$$

$$\dot{W}_p = 3,92 M$$

- Efisiensi

$$\eta_p = \frac{W_p}{\dot{m}_f \times H_{j, f, A1}}$$

$$\eta_p = \frac{3,92 \text{ M /s}}{0,645 \text{ kg/s} \times 42,8 \text{ M /k}} \times 100\%$$

$$\eta_p = 14,22\%$$

4.1.3 Tabel Hasil Perhitungan

Tabel 4.2

Normal Engine ESN 195231

| <i>Normal Engine</i> | | | | |
|----------------------|-------------|-------------|--------------|------------------------|
| No | T-s Diagram | | P- v Diagram | |
| | T (K) | s (kJ/kg-K) | P (kPa) | v (m ³ /kg) |
| 1 | 286,66 | 1,66 | 98,87 | 0,832 |
| 2 | 638,58 | 1,66 | 1631,35 | 0,112 |
| 3 | 2675,1 | 3,18 | 1631,35 | 0,469 |
| 4 | 1200,85 | 3,18 | 98,87 | 6,588 |

Tabel 4.3

Problem Engine ESN 195231

| <i>Problem Engine</i> | | | | |
|-----------------------|-------------|-------------|--------------|------------------------|
| No | T-s Diagram | | P- v Diagram | |
| | T (K) | s (kJ/kg-K) | P (kPa) | v (m ³ /kg) |
| 1 | 286,75 | 1,64 | 99,04 | 0,839 |
| 2 | 638,78 | 1,64 | 1634,16 | 0,113 |
| 3 | 2769,82 | 3,22 | 1634,16 | 0,489 |
| 4 | 1243,37 | 3,22 | 99,04 | 6,956 |

Tabel 4.4
Normal Engine 195341

| <i>Normal Engine</i> | | | | |
|----------------------|-------------|-------------|--------------|------------------------|
| No | T-s Diagram | | P- v Diagram | |
| | T (K) | s (kJ/kg-K) | P (kPa) | v (m ³ /kg) |
| 1 | 286,64 | 1,65 | 98,85 | 0,832 |
| 2 | 638,54 | 1,65 | 1631,02 | 0,112 |
| 3 | 2685,42 | 3,183 | 1631,02 | 0,471 |
| 4 | 1205,48 | 3,183 | 98,85 | 6,63 |

Tabel 4.5
Problem Engine ESN 195341

| <i>Problem Engine</i> | | | | |
|-----------------------|-------------|-------------|--------------|------------------------|
| No | T-s Diagram | | P- v Diagram | |
| | T (K) | s (kJ/kg-K) | P (kPa) | v (m ³ /kg) |
| 1 | 286,69 | 1,656 | 98,93 | 0,839 |
| 2 | 639,74 | 1,656 | 1632,34 | 0,112 |
| 3 | 2693,31 | 3,184 | 1632,34 | 0,471 |
| 4 | 1206,96 | 3,184 | 98,93 | 6,702 |

Tabel 4.6
Kinerja Mesin ESN 195231

| ESN | <i>Thrust (N)</i> | | <i>Power (MW)</i> | | Efisiensi (%) | |
|---------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|---------------|----------------|
| | Normal | <i>Problem</i> | Normal | <i>Problem</i> | Normal | <i>Problem</i> |
| 195231 | 50.265,4 | 48.223,2 | 4,18 | 3,92 | 16,2% | 14,22% |
| Penurunan (%) | 4,06% | | 6,03% | | 1,98% | |

Tabel 4.7
Kinerja Mesin ESN 195341

| ESN | <i>Thrust (N)</i> | | <i>Power (MW)</i> | | Efisiensi (%) | |
|---------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|---------------|----------------|
| | Normal | <i>Problem</i> | Normal | <i>Problem</i> | Normal | <i>Problem</i> |
| 195341 | 53.244,7 | 52.209,3 | 4,43 | 4,3 | 16,1% | 15,51% |
| Penurunan (%) | 1,94% | | 2,92% | | 0,59% | |

4.2 Pembahasan

4.2.1 Analisa ESN 195231

Kerusakan pada LPT *Blade* khususnya dari *stage* 3 hingga 6 yaitu sebagai berikut:

- *Stage* 3 (90 *blade*)

2 *blade scratch*

Presentase kerusakan yaitu 2,22%

- *Stage* 4 (94 *blade*)

5 *blade crack*; 1 *crack* dengan panjang 0,385 in (*out of limit*)

Presentase kerusakan yaitu 6,38%

- *Stage* 5 (92 *blade*)

4 *blade dent*

Presentase kerusakan yaitu 4,35%

- *Stage* 6 (94 *blade*)

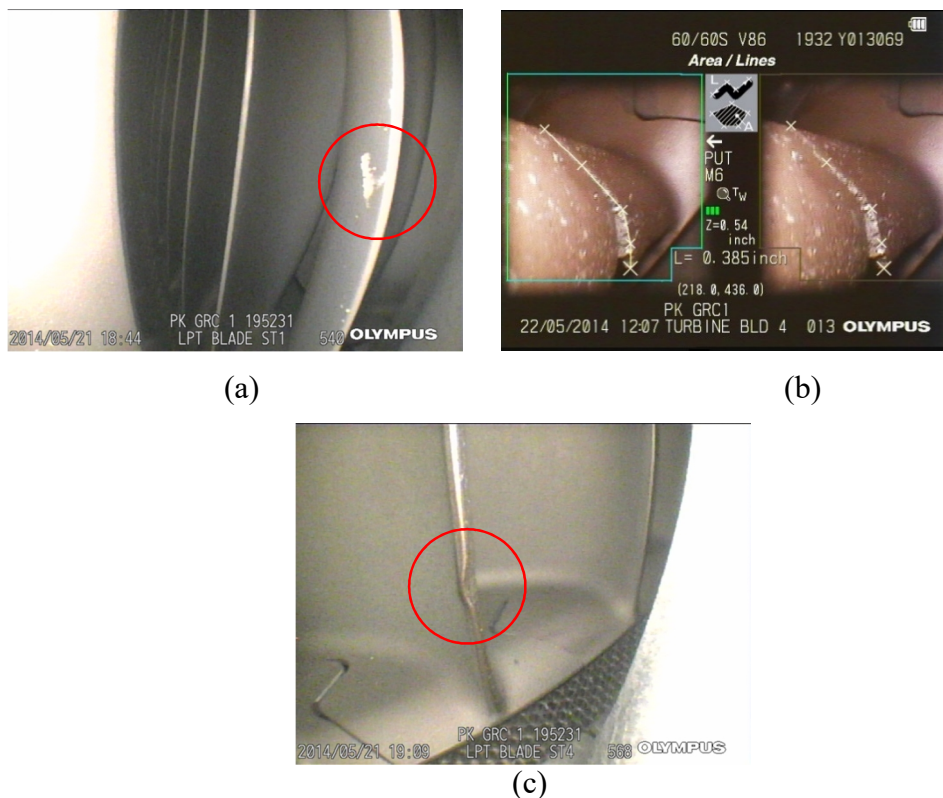
2 *blade dent*

Presentase kerusakan yaitu 2,13%

Tabel 4.8

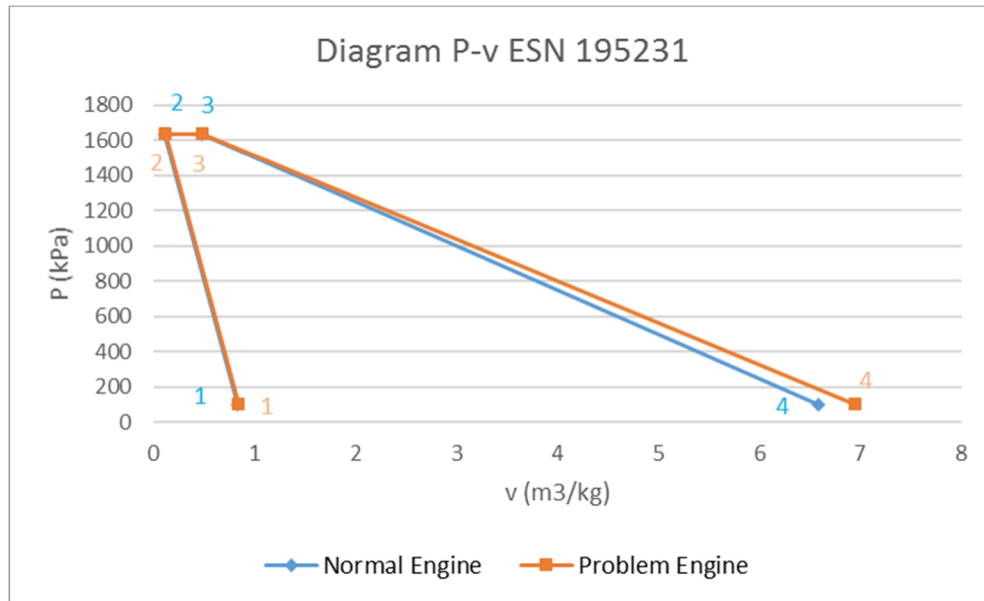
Presentase Kerusakan ESN 195231

| <i>Engine Serial Number</i> | Jumlah <i>Blade</i> | Presentase Kerusakan (%) | | | |
|-----------------------------|---------------------|--------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | <i>Crack</i> | <i>Bend</i> | <i>Dent</i> | <i>Tear</i> |
| 195231 | 370 | 1.35% | - | 1.62% | - |



Gambar 4.1 Kerusakan Pada ESN 195231 yang Terdiri Dari (a) *Blade Scratch*; (b) *Blade Crack*; (c) *Blade Dent*
 Sumber: GMF AeroAsia

Pada ESN 195231 ditemukan beberapa kerusakan pada LPT *blade* (gambar 4.1) yang terdiri dari *crack*, *scratch*, dan *dent*. Kerusakan-kerusakan ini ditemukan di semua *stage* LPT dengan hanya beberapa *blade* yang mengalami kerusakan. Kerusakan pada *stage* 3 ditemukan 2,22%, *stage* 4 ditemukan 6,38%, *stage* 5 ditemukan 4,35%, dan *stage* 6 ditemukan 2,13%. Presentase jumlah *crack* yang terdapat pada LPT *blade* yaitu sebesar 1,35% dan presentase jumlah *dent* yang terdapat pada LPT *blade* yaitu sebesar 1,62% seperti yang terlihat pada tabe 4.8. Khususnya pada *engine* ini ditemukan *crack* yang mendekati *limit safety* yaitu 0,40 in (Lampiran) dengan *crack* yang ditemukan yaitu dengan panjang 0,385 in. Panjang *crack* yang ditemukan tersebut mengharuskan *engine* untuk dilakukan *overhoul*.



Gambar 4.2 Diagram P-v ESN 195231

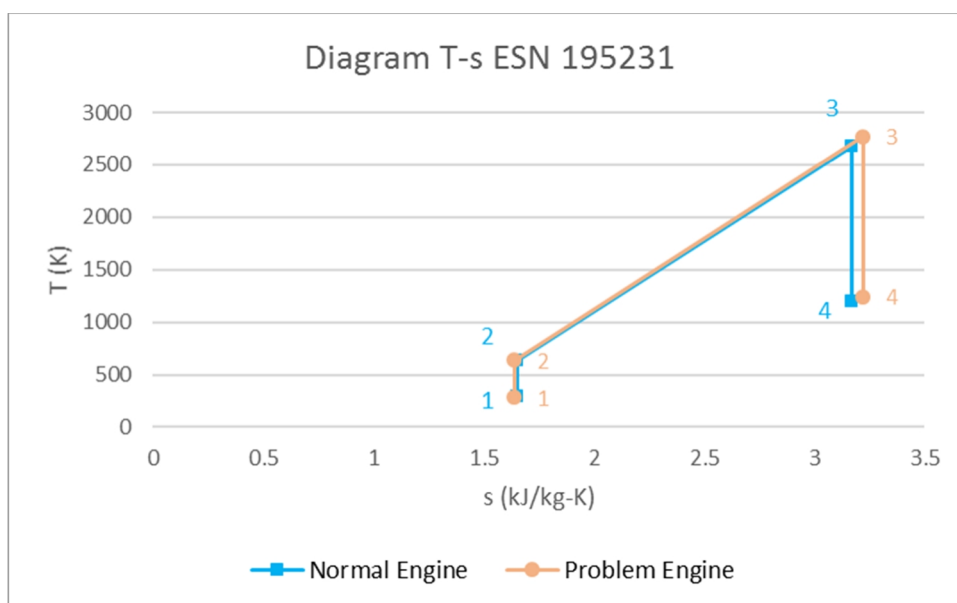
Pada gambar 4.2 terdapat 2 grafik yaitu normal *engine* dan *problem engine*. Normal *engine* merupakan grafik yang menggambarkan nilai tekanan P dan volum spesifik v yang ditinjau dari *engine* yang digunakan dalam keadaan tidak mengalami kerusakan/baik pada LPT *blade*. *Problem engine* merupakan grafik yang menggambarkan nilai tekanan P dan volum spesifik v yang ditinjau dari *engine* yang digunakan pada LPT *blade* dalam keadaan mengalami kerusakan yang terdiri dari *crack*, *scratch*, dan *dent*. Pada gambar 4.2 dapat diketahui merupakan diagram dari hasil penerapan siklus Brayton, menggunakan mesin *turbofan* pesawat.

Pada normal *engine* gambar 4.2 proses 1-2 merupakan kompresi secara isentropik yang terjadi di kompresor dengan nilai pada titik 1 yaitu 98,87 kPa, 0,832 m³/kg dan titik 2 yaitu 1631,35 kPa, 0,112 m³/kg. Proses 2-3 merupakan penambahan kalor dengan tekanan konstan dengan nilai pada titik 2 yaitu 1631,35 kPa, 0,112 m³/kg dan titik 3 yaitu 1631,35 kPa, 0,469 m³/kg. Proses 3-4 yaitu merupakan ekspansi secara isentropik yang terjadi di turbin dengan nilai pada titik 3 yaitu 1631,35 kPa, 0,469 m³/kg dan titik 4 98,87 kPa, 6,588 m³/kg. Proses 4-1 yaitu merupakan pelepasan kalor dengan tekanan konstan dengan nilai pada titik 4 yaitu 98,87 kPa, 6,588 m³/kg dan titik 1 yaitu 98,87 kPa, 0,832 m³/kg.

Pada *problem engine* gambar 4.2 memiliki proses 1-2 merupakan kompresi secara isentropik yang terjadi di kompresor dengan nilai pada titik 1 yaitu 99,04 kPa, 0,839 m³/kg dan titik 2 yaitu 1634,16 kPa, 0,112 m³/kg. Proses 2-3 merupakan penambahan kalor dengan tekanan konstan dengan nilai pada titik 2 yaitu 1634,16

kPa, $0,112 \text{ m}^3/\text{kg}$ dan titik 3 yaitu $1634,16 \text{ kPa}$, $0,489 \text{ m}^3/\text{kg}$. Proses 3-4 yaitu merupakan ekspansi secara isentropik yang terjadi di turbin dengan nilai pada titik 3 yaitu $1634,16 \text{ kPa}$, $0,489 \text{ m}^3/\text{kg}$ dan titik 4 $99,04 \text{ kPa}$, $6,956 \text{ m}^3/\text{kg}$. Proses 4-1 yaitu merupakan pelepasan kalor dengan tekanan konstan dengan nilai pada titik 4 yaitu $99,04 \text{ kPa}$, $6,956 \text{ m}^3/\text{kg}$ dan titik 1 yaitu $99,04 \text{ kPa}$, $0,839 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Normal *engine* dengan *problem engine* pada gambar 4.2 memiliki kecenderungan yang hampir sama dan saling berimpit, namun dengan melihat dari angka pada tiap titik dari 1 hingga 4 terdapat perbedaan. Perbedaan yang terlihat cukup signifikan yaitu pada proses 3-4 dengan menghasilkan tekanan dan volum spesifik yang lebih besar pada *problem engine* dibandingkan dengan *normal engine* dengan peningkatan sebesar $5,29\%$ volum spesifik. Hal ini dikarenakan kerusakan yang terdapat pada LPT *blade* dengan ditemukannya *crack* yang mendekati *safety limit* $0,4 \text{ in}$ memberikan pengaruh peningkatan temperatur yang cukup signifikan di ruang turbin sehingga meningkatkan volume spesifik. Peningkatan volume spesifik sebesar $5,29\%$ membuktikan bahwa kerusakan pada *blade* LPT mempengaruhi diagram P-v.



Gambar 4.3 Diagram T-s ESN 195231

Pada gambar 4.3 memiliki 2 grafik yaitu *normal engine* dan *problem engine*. *Normal engine* merupakan grafik yang menggambarkan nilai temperatur T dan entropi s yang ditinjau dari *engine* yang digunakan dalam keadaan tidak mengalami kerusakan/baik. *Problem engine* merupakan grafik yang menggambarkan nilai

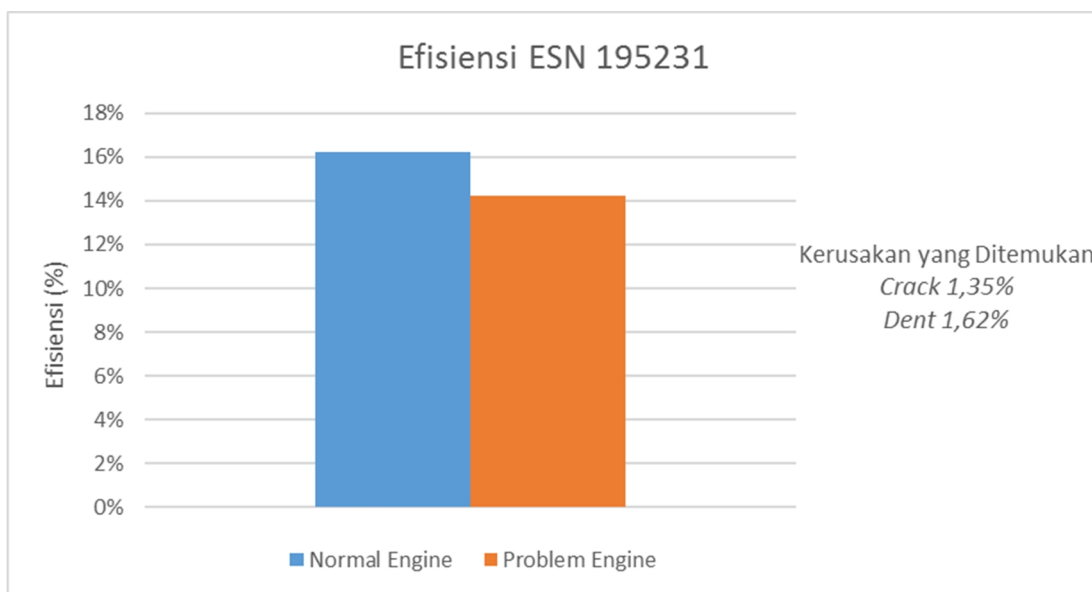
temperatur T dan entropi s yang ditinjau dari *engine* yang digunakan pada bagian LPT *blade* dalam keadaan mengalami kerusakan yang terdiri dari *crack*, *scratch*, dan *dent*.

Pada normal *engine* gambar 4.3 proses 1-2 merupakan kompresi secara isentropik yang terjadi di kompresor dengan nilai pada titik 1 yaitu 286,66 K, 1,65 kJ/kg.K dan titik 2 yaitu 638,58 K, 1,65 kJ/kg.K. Proses 2-3 merupakan penambahan kalor dengan tekanan konstan dengan nilai pada titik 2 yaitu 638,58 K, 1,65 kJ/kg.K dan titik 3 yaitu 2675,1 K, 3,17 kJ/kg.K. Proses 3-4 yaitu merupakan ekespansi secara isentropik yang terjadi di turbin dengan nilai pada titik 3 yaitu 2675,1 K, 3,17 kJ/kg.K dan titik 4 yaitu 1200,85 K, 3,17 kJ/kg.K. Proses 4-1 yaitu merupakan pelepasan kalor dengan tekanan konstan dengan nilai pada titik 4 yaitu 1200,85 K, 3,17 kJ/kg.K dan titik 1 yaitu 286,66 K, 1,65 kJ/kg.K.

Pada *problem engine* gambar 4.3 proses 1-2 merupakan kompresi secara isentropik yang terjadi di kompresor dengan nilai pada titik 1 yaitu 286,75 K, 1,64 kJ/kg.K dan titik 2 yaitu 638,78 K, 1,64 kJ/kg.K. Proses 2-3 merupakan penambahan kalor dengan tekanan konstan dengan nilai pada titik 2 yaitu 638,78 K, 1,64 kJ/kg.K dan titik 3 yaitu 2769,82 K, 3,22 kJ/kg.K. Proses 3-4 yaitu merupakan ekespansi secara isentropik yang terjadi di turbin dengan nilai pada titik 3 yaitu 2769,82 K, 3,22 kJ/kg.K dan titik 4 yaitu 1243,37 K, 3,22 kJ/kg.K. Proses 4-1 yaitu merupakan pelepasan kalor dengan tekanan konstan dengan nilai pada titik 4 yaitu 1243,37 K, 3,22 kJ/kg.K dan titik 1 yaitu 286,75 K, 1,64 kJ/kg.K.

Normal *engine* dengan *problem engine* pada gambar 4.3 memiliki kecenderungan yang hampir sama dan saling berimpit, namun dengan melihat dari nilai pada tiap titik dari 1 hingga 4 terdapat perbedaan. Dengan melihat pengaruh kerusakan pada LPT *blade* pada *problem engine*, perbedaan yang dapat terlihat yaitu nilai kenaikan yang dihasilkan pada temperatur T dan entropi s pada titik 3 dan 4 dengan temperatur T dan s yang lebih tinggi dibandingkan dengan normal *engine*. Peningkatan yang dihasilkan sebesar 1,55% entropi dan 3,42% temperatur. Hal ini dikarenakan kerusakan yang terdapat pada LPT *blade* dengan ditemukannya *crack* yang mendekati *limit safety* sehingga meningkatkan temperatur diruang turbin serta meningkatkan entropi. *Crack*, *scratch*, dan *dent* yang terdapat pada LPT *blade* dengan melihat diagram T-s (gambar 4.3) mempengaruhi temperatur diruang turbin yang dikarenakan munculnya ketidakberaturan aliran gas panas yang kemudian

menimbulkan peningkatan temperatur hingga mendekati dan melebihi *engine operation limit* ruang turbin yaitu 973°C.



Gambar 4.4 Efisiensi ESN 195231

Dalam proses perhitungan kinerja mesin dengan menggunakan perbandingan normal *engine* dengan *problem engine* ditemukan penurunan kinerja mesin yang ditandai dengan *thrust*, *power*, dan efisiensi yang rendah dibandingkan dengan normal *engine* seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.6. Pada tabel 4.6 dapat dilihat nilai *thrust* yang dihasilkan pada normal *engine* yaitu sebesar 50.265,4 N sedangkan pada *problem engine* menghasilkan *thrust* sebesar 48.223,2 N dengan menghasilkan penurunan sebesar 4,06%. Pada nilai *power* normal *engine* menghasilkan *power* sebesar 4,18 MW sedangkan pada *problem engine* menghasilkan *power* sebesar 3,92 MW dengan menghasilkan penurunan sebesar 6,03%. Pada nilai efisiensi *propulsive* normal *engine* menghasilkan efisiensi sebesar 16,2% sedangkan pada *problem engine* menghasilkan efisiensi sebesar 14,22% dengan menghasilkan penurunan sebesar 1,98% seperti yang terlihat pada gambar 4.4.

Pada gambar 4.4 dapat dilihat penurunan efisiensi dengan penurunan sebesar 1,98%. Hal ini dapat diketahui dengan kerusakan yang terdiri dari *crack*, *scratch*, dan *dent* dengan presentasi kerusakan *crack* sebesar 1,35% dan *dent* sebesar 1,62% serta panjang *crack* yang mendekati *limit safety* memberikan kinerja LPT menjadi turun. Kerusakan tersebut memberikan kenaikan temperatur yang cukup signifikan hingga mengakibatkan *engine* menjadi mudah panas. Temperatur yang tinggi pada

ruang turbin mengakibatkan penurunan *thrust* disertai penurunan *power* yang lebih rendah dari yang seharusnya dihasilkan diikuti dengan peningkatan *fuel flow*. Hal ini mengakibatkan efisiensi pada *engine* ini mengalami penurunan dikarenakan nilai dari *thrust* dan *power* memberikan pengaruh yang besar terhadap efisiensi mesin.

ESN 195231 merupakan *engine* yang harus dilakukan *overhoull* dikarenakan terdapat 1 *blade* memiliki *crack* yang panjangnya 0,385 in, dan ukuran panjang *crack* ini mendekati *limit safety* 0,4 in (lampiran). *Overhoull* pada mesin ini harus dilakukan untuk menjaga keamanan dan keselamatan penumpang serta mencegah kerusakan yang lebih dalam meskipun penurunan kinerja yang dihasilkan tidak terlalu signifikan. Peningkatan EGT dalam satu bulan terakhir juga ditemukan temperatur yang sangat tinggi mendekati dan melebihi *engine operation limit* yang sudah ditentukan, yaitu 973°C. ITT probe yang ditemukan patah yaitu berjumlah 9 ITT dari 10 ITT probe. Pada *engine* ini belum ditemukan tanda *blade* mengalami *creep* dikarenakan telah dilakukan tindakan untuk melakukan *overhoull* meskipun *crack* yang ditemukan mendekati *limit safety*.

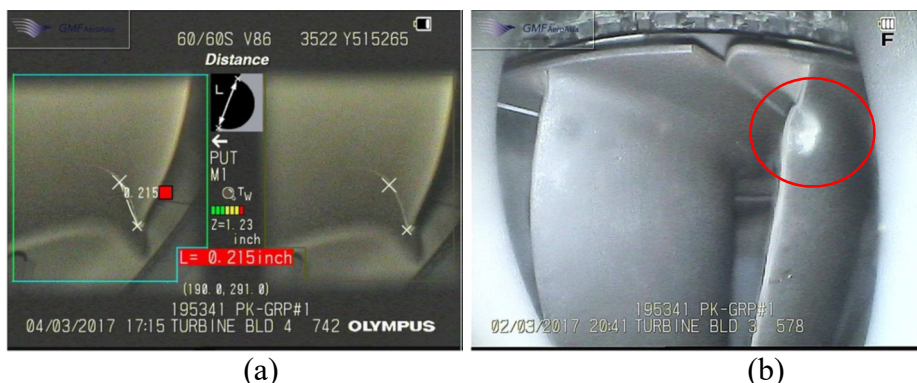
4.2.2 Analisa ESN 195341

Kerusakan pada LPT *Blade* khususnya dari *stage* 3 hingga 6 yaitu sebagai berikut:

- Stage 3 (90 *blade*)
1 *blade crack*, 7 *blade dent*
Presentase kerusakan yaitu 8,89%
- Stage 4 (94 *blade*)
2 *blade crack*, 2 *blade dent*; 1 *blade crack* dengan panjang 0,215 in dan *maintenance cycle* berubah dari 500 *cycle* menjadi 250 *cycle*
Presentase kerusakan yaitu 5,32%
- Stage 5 (92 *blade*)
1 *Blade missing material*
Presentase kerusakan yaitu 1,09%
- Stage 6 (94 *blade*)
3 *blade dent*
Presentase kerusakan yaitu 3,19%

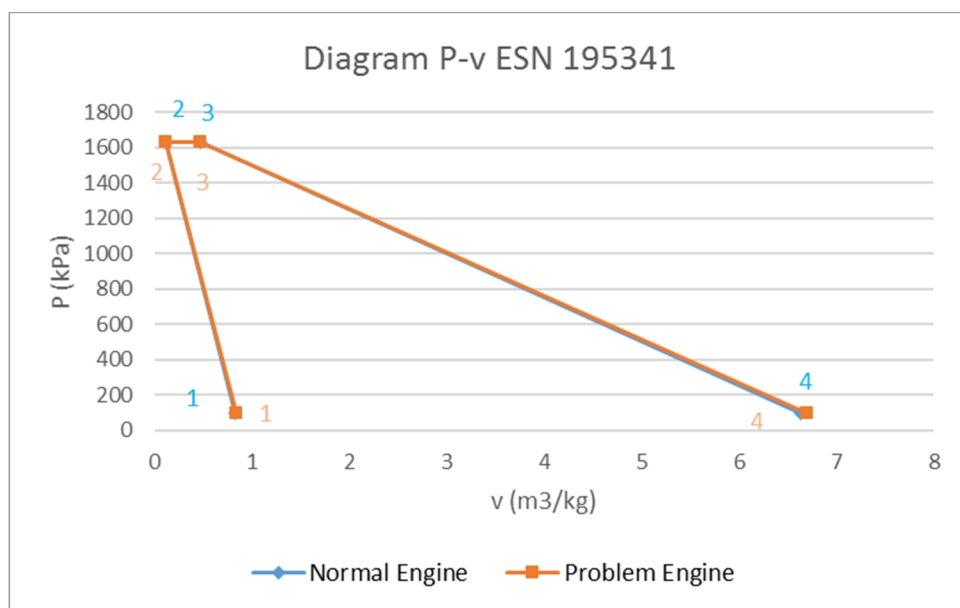
Tabel 4.9
Presentase Kerusakan ESN 195341

| Engine Serial Number | Jumlah Blade | Presentase Kerusakan | | | |
|----------------------------|-----------------|----------------------|------|-------|------|
| | | Crack | Bend | Dent | Tear |
| 195341 | 370 | 0.81% | - | 3.24% | - |



Gambar 4.5 Kerusakan Pada ESN 195341 yang Terdiri Dari (a) *Blade Crack*; (b) *Blade Dent*
Sumber: GMF AeroAsia

Pada ESN 195341 ditemukan kerusakan pada LPT *blade* (gambar 4.5) yang terdiri dari *crack* dan *dent*. Kerusakan-kerusakan ini ditemukan di semua *stage* LPT dengan hanya beberapa *blade* yang mengalami kerusakan. Kerusakan pada *stage* 3 ditemukan 8,89%, *stage* 4 ditemukan 5,32%, *stage* 5 ditemukan 1,09%, dan *stage* 6 ditemukan 3,19%. Presentase jumlah *crack* yang terdapat pada LPT *blade* yaitu sebesar 0,81% dan presentase jumlah *dent* yang terdapat pada LPT *blade* yaitu sebesar 3,24% seperti yang terlihat pada tabe 4.9. Pada *engine* ini ditemukan *crack* dengan panjang 0,215 in dan panjang *crack* ini belum mendekati *limit safety*. Namun pada *engine* ini dilakukan pencegahan dengan memberlakukan penurunan *cycle maintenance* dari 500 *cycle* menjadi 250 *cycle* untuk menjaga panjang *crack* tidak mendekati *limit safety*. Khusus *engine* 195341 masih dapat dapat beroperasi dan aman digunakan hingga saat ini.



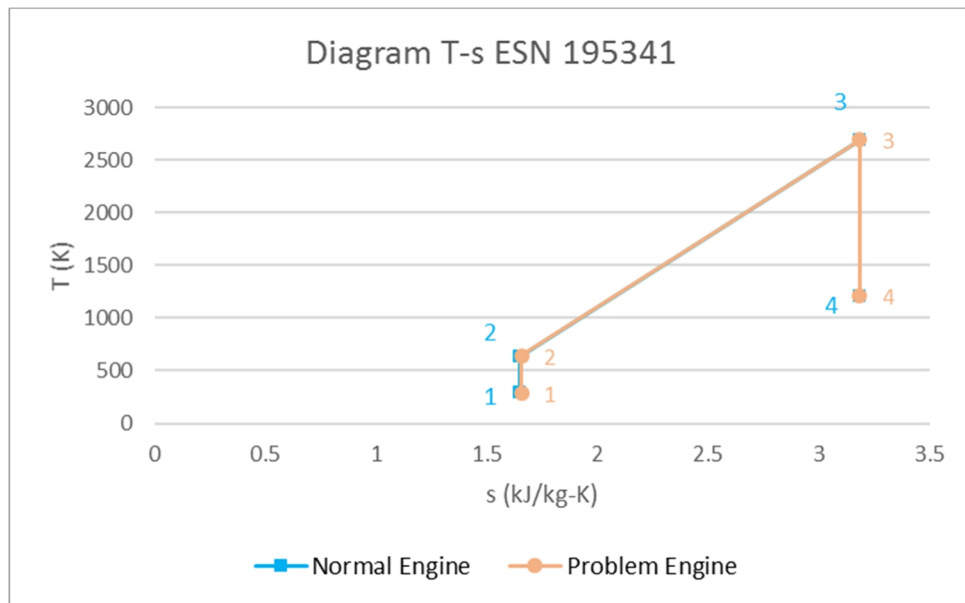
Gambar 4.6 Diagram P-v ESN 195341

Pada gambar 4.6 terdapat 2 grafik yaitu *normal engine* dan *problem engine*. *Normal engine* merupakan grafik yang menggambarkan nilai tekanan P dan volum spesifik v yang ditinjau dari *engine* yang digunakan dalam keadaan tidak mengalami kerusakan/baik pada LPT *blade*. *Problem engine* merupakan grafik yang menggambarkan nilai tekanan P dan volum spesifik v yang ditinjau dari *engine* yang digunakan pada LPT *blade* dalam keadaan mengalami kerusakan yang terdiri dari *crack* dan *dent*. Pada gambar 4.6 dapat diketahui merupakan diagram dari hasil penerapan siklus Brayton, menggunakan mesin *turbofan* pesawat.

Pada normal *engine* gambar 4.6 proses 1-2 merupakan kompresi secara isentropik yang terjadi di kompresor dengan nilai pada titik 1 yaitu 98,85 kPa, 0,832 m³/kg dan titik 2 yaitu 1631,02 kPa, 0,112 m³/kg. Proses 2-3 merupakan penambahan kalor dengan tekanan konstan dengan nilai pada titik 2 yaitu 1631,02 kPa, 0,112 m³/kg dan titik 3 yaitu 1631,02 kPa, 0,471 m³/kg. Proses 3-4 yaitu merupakan ekspansi secara isentropik yang terjadi di turbin dengan nilai pada titik 3 yaitu 1631,02 kPa, 0,471 m³/kg dan titik 4 98,85 kPa, 6,63 m³/kg. Proses 4-1 yaitu merupakan pelepasan kalor dengan tekanan konstan dengan nilai pada titik 4 yaitu 98,85 kPa, 6,63 m³/kg dan titik 1 yaitu 98,85 kPa, 0,832 m³/kg.

Pada *problem engine* gambar 4.6 memiliki proses 1-2 merupakan kompresi secara isentropik yang terjadi di kompresor dengan nilai pada titik 1 yaitu 98,93 kPa, 0,839 m³/kg dan titik 2 yaitu 1632,34 kPa, 0,112 m³/kg. Proses 2-3 merupakan penambahan kalor dengan tekanan konstan dengan nilai pada titik 2 yaitu 1632,34 kPa, 0,112 m³/kg dan titik 3 yaitu 1632,34 kPa, 0,471 m³/kg. Proses 3-4 yaitu merupakan ekspansi secara isentropik yang terjadi di turbin dengan nilai pada titik 3 yaitu 1632,34 kPa, 0,471 m³/kg dan titik 4 98,93 kPa, 6,702 m³/kg. Proses 4-1 yaitu merupakan pelepasan kalor dengan tekanan konstan dengan nilai pada titik 4 yaitu 98,93 kPa, 6,702 m³/kg dan titik 1 yaitu 98,93 kPa, 0,839 m³/kg.

Normal *engine* dengan *problem engine* pada gambar 4.6 memiliki kecenderungan yang hampir sama dan saling berimpit. Selisih nilai yang dihasilkan pada *engine* ini yaitu sangat kecil meskipun terdapat beberapa kerusakan. Namun dari nilai yang dihasilkan pada *problem engine* proses 3-4 memberikan sedikit kenaikan pada volum spesifik yaitu sebesar 1,07%. Peningkatan ini dikarenakan kerusakan yang terdapat pada LPT *blade* sehingga meningkatkan temperatur diruang turbin diikuti dengan peningkatan volum spesifik. Namun pada *engine* ini tidak memiliki perbedaan yang cukup signifikan antara normal *engine* dengan *problem engine* jika dibandingkan dengan mesin sebelumnya dikarenakan selisih antara tekanan P dan volum spesifik v yang sangat kecil meskipun terdapat beberapa kerusakan pada LPT *blade*. Kenaikan volum spesifik sebesar 1,07% tetap membuktikan bahwa kerusakan pada LPT *blade* mempengaruhi nilai dari P dan v.



Gambar 4.7 Diagram T-s ESN 195341

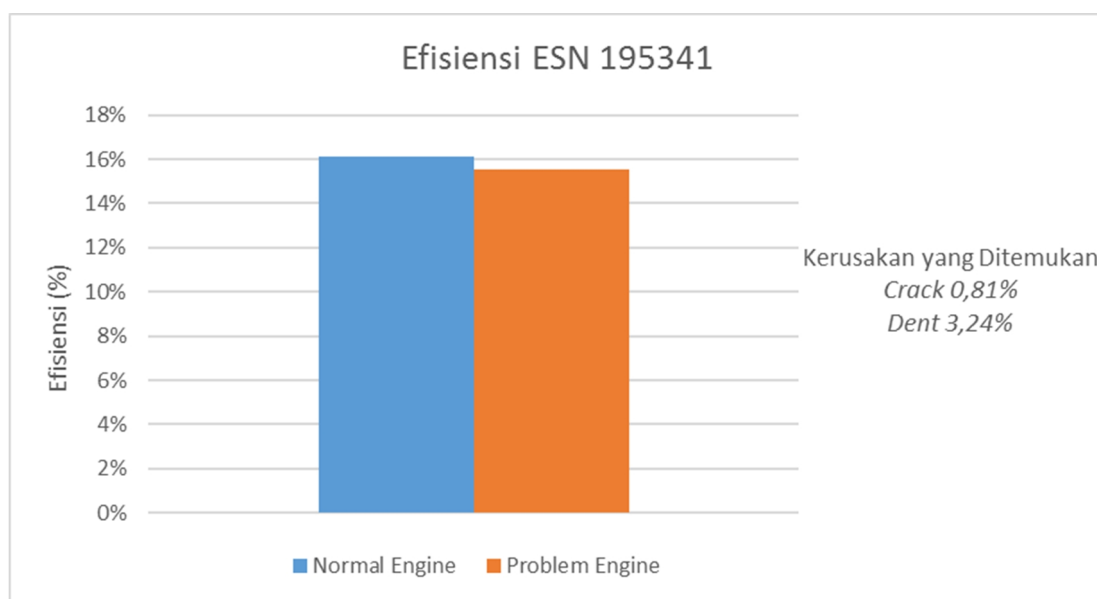
Pada gambar 4.7 dapat dilihat terdapat 2 grafik normal *engine* dan *problem engine*. Normal *engine* merupakan grafik yang menggambarkan nilai temperatur T dan entropi s yang ditinjau dari *engine* yang digunakan dalam keadaan tidak mengalami kerusakan/baik. *Problem engine* merupakan grafik yang menggambarkan nilai temperatur T dan entropi s yang ditinjau dari *engine* yang digunakan pada bagian LPT *blade* dalam keadaan mengalami kerusakan yang terdiri dari *crack* dan *dent*.

Pada normal *engine* gambar 4.7 pada proses 1-2 merupakan kompresi secara isentropik yang terjadi di kompresor dengan nilai pada titik 1 yaitu 286,64 K, 1,65 kJ/kg.K dan titik 2 yaitu 638,54 K, 1,65 kJ/kg.K. Proses 2-3 merupakan penambahan kalor dengan tekanan konstan dengan nilai pada titik 2 yaitu 638,54 K, 1,65 kJ/kg.K dan titik 3 yaitu 2685,42 K, 3,183 kJ/kg.K. Proses 3-4 yaitu merupakan ekspansi secara isentropik yang terjadi di turbin dengan nilai pada titik 3 yaitu 2685,42 K, 3,183 kJ/kg.K dan titik 4 yaitu 1205,48 K, 3,183 kJ/kg.K. Proses 4-1 yaitu merupakan pelepasan kalor dengan tekanan konstan dengan nilai pada titik 4 yaitu 1205,48 K, 3,183 kJ/kg.K dan titik 1 yaitu 286,64 K, 1,65 kJ/kg.K.

Pada *problem engine* gambar 4.7 pada proses 1-2 merupakan kompresi secara isentropik yang terjadi di kompresor dengan nilai pada titik 1 yaitu 286,69 K, 1,656 kJ/kg.K dan titik 2 yaitu 639,74 K, 1,656 kJ/kg.K. Proses 2-3 merupakan penambahan kalor dengan tekanan konstan dengan nilai pada titik 2 yaitu 639,74 K, 1,656 kJ/kg.K dan titik 3 yaitu 2693,31 K, 3,184 kJ/kg.K. Proses 3-4 yaitu

merupakan ekspansi secara isentropik yang terjadi di turbin dengan nilai pada titik 3 yaitu 2693,31 K, 3,184 kJ/kg.K dan titik 4 yaitu 1206,96 K, 3,184 kJ/kg.K. Proses 4-1 yaitu merupakan pelepasan kalor dengan tekanan konstan dengan nilai pada titik 4 yaitu 1206,96 K, 3,184 kJ/kg.K dan titik 1 yaitu 286,69 K, 1,656 kJ/kg.K.

Normal *engine* dengan *problem engine* pada gambar 4.7 memiliki kecenderungan yang hampir sama dan saling berimpit. Selisih nilai yang dihasilkan pada *engine* ini yaitu sangat kecil meskipun terdapat beberapa kerusakan. Namun dari nilai yang dihasilkan pada *problem engine* proses 3-4 memberikan sedikit kenaikan pada temperatur yaitu sebesar 0,12% dan entropi yaitu sebesar 0,03%. Hal ini dikarenakan kerusakan yang terdapat pada LPT *blade* yang terdiri dari *crack* dan *dent* mempengaruhi ruang turbin sehingga meningkatkan temperatur ruang turbin diikuti dengan peningkatan entropi meskipun belum ditemukan kerusakan yang melebihi dari *safety limit*. Pada *engine* ini tidak memiliki perbedaan yang cukup signifikan antara normal *engine* dengan *problem engine* jika dibandingkan dengan mesin sebelumnya dikarenakan selisih antara temperatur dan entropi yang sangat kecil. Namun meskipun kenaikan yang dihasilkan sangat kecil hal ini tetap membuktikan bahwa kerusakan *crack* dan *dent* pada *blade* LPT mempengaruhi nilai dari T dan s. *Crack* dan *dent* yang terdapat pada LPT *blade* mempengaruhi temperatur di ruang turbin yang dikarenakan munculnya ketidakberaturan aliran gas panas yang kemudian menimbulkan peningkatan temperatur hingga mendekati *engine operation limit* 973°C.



Gambar 4.8 Efisiensi ESN 195341

Dalam proses perhitungan kinerja mesin dengan menggunakan perbandingan normal *engine* dengan *problem engine* ditemukan penurunan kinerja mesin yang ditandai dengan *thrust*, *power*, dan efisiensi yang rendah dibandingkan dengan normal *engine* seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.7. Pada tabel 4.7 dapat dilihat nilai *thrust* yang dihasilkan pada normal *engine* yaitu sebesar 53.244,7 N sedangkan pada *problem engine* menghasilkan *thrust* sebesar 52.209,3 N dengan menghasilkan penurunan sebesar 1,94%. Pada nilai *power* normal *engine* menghasilkan *power* sebesar 4,43 MW sedangkan pada *problem engine* menghasilkan *power* sebesar 4,3 MW dengan menghasilkan penurunan sebesar 2,92%. Pada nilai efisiensi *propulsive* normal *engine* menghasilkan efisiensi sebesar 16,1% sedangkan pada *problem engine* menghasilkan efisiensi sebesar 15,51% dengan menghasilkan penurunan sebesar 0,59% seperti yang terlihat pada gambar 4.8.

Pada gambar 4.8 dapat dilihat penurunan efisiensi yang dihasilkan terbilang sangat kecil dibandingkan dengan *engine* sebelumnya dengan hanya menghasilkan penurunan sebesar 0,59%. Hal ini dapat diketahui dengan kerusakan yang terdiri dari *crack* dan *dent dent* dengan presentase kerusakan *crack* sebesar 0,81% dan *dent* sebesar 3,24% memberikan sedikit pengaruh kinerja LPT menjadi turun. Kerusakan tersebut memberikan sedikit kenaikan temperatur diruang turbin sehingga mengakibatkan *engine* menjadi mudah panas. Temperatur yang tinggi pada ruang turbin mengakibatkan penurunan *thrust* disertai penurunan *power* yang lebih rendah dari yang seharusnya dihasilkan diikuti dengan peningkatan *fuel flow*. Hal ini mengakibatkan efisiensi pada *engine* ini mengalami penurunan dikarenakan nilai dari *thrust* dan *power* memberikan pengaruh yang besar terhadap efisiensi mesin.

ESN 195341 merupakan *engine* yang masih dapat digunakan dikarenakan kerusakan yang dimiliki pada LPT *blade* belum melebihi *limit safety*. Selain itu dari segi kinerja yang masih baik dan penurunan yang tidak terpaut jauh dengan normal *engine*. Namun pada *engine* ini harus melakukan penurunan *cycle* yang sebelumnya dari 500 *cycle* untuk melakukan *maintenance*, kini diturunkan menjadi 250 *cycle*. Hal ini dikarenakan terdapat 1 *blade* yang memiliki *crack* dengan panjang 0,215 in. Pada grafik EGT dalam satu bulan juga ditemukan temperatur yang tinggi hingga mendekati *engine operation limit* yang sudah ditentukan, yaitu 973°C. ITT probe yang ditemukan patah yaitu berjumlah 3 ITT dari 10 ITT probe. Pada *engine* ini

belum ditemukan tanda *blade* mengalami *creep* dikarenakan *crack* yang terdapat masih belum melebihi *limit safety*.