

BAB IV

HASIL DAN ANALISA PENGUJIAN

THERMOELECTRIC GENERATOR

4.1 HASIL DAN ANALISA PENGUJIAN

Pengujian yang dilakukan menghasilkan data-data berupa waktu, arus *output*, tegangan *output*, daya *output*, temperature sisi panas *peltier*, dan temperatur sisi dingin *peltier*. Data berupa angka tersebut dikonversikan kedalam bentuk grafik sehingga dapat lebih mudah dipahami, dibandingkan, dan dianalisa lebih lanjut.

4.2 PENGUJIAN DENGAN VARIASI TEGANGAN *INPUT HEATER*, SUSUNAN *PELTIER*, DENGAN *FAN*

Pengujian dilakukan dengan variasi tegangan *input heater* 110V dan 220V dengan *voltage regulator AC* yang memiliki alat ukur pengatur nilai tegangan sehingga nilai tegangannya dapat diubah sesuai kebutuhan. Sedangkan nilai arusnya mengikuti perubahan nilai tegangan yang diberikan. Nilai arus diukur dengan multimeter.

Tabel 4.2 Pengaturan *power supply*

| Tegangan (V) | Arus (A) | Daya (Watt) |
|---------------------|-----------------|--------------------|
| 110 V | 0,4 | 44 Watt |
| 220V | 0,7 | 154 Watt |

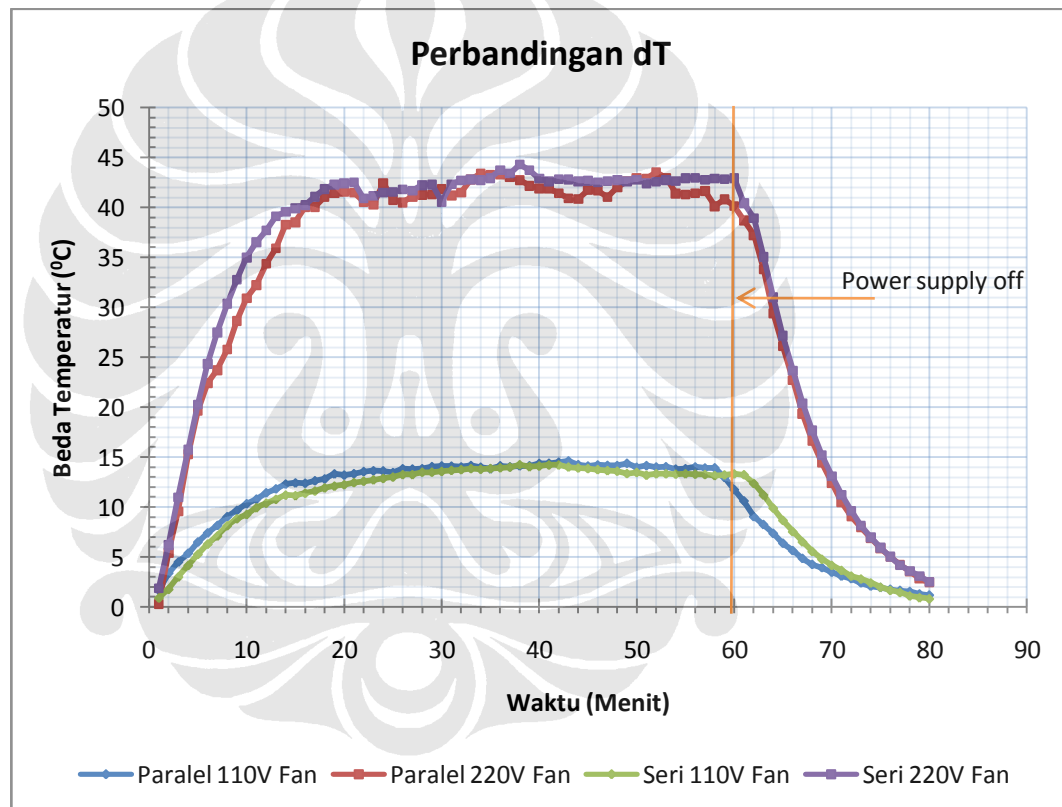
Sumber : Pengujian di Lab. Heat Transfer DTM FTUI

Waktu pengambilan data selama 60 menit dengan *power supply* heater dinyalakan dan 60 menit dimatikan. Data temperatur pada 8 channel direkam tiap 1 menit bersamaan dengan pengambilan data nilai arus dan tegangan *output*.

Pengujian menggunakan 12 *peltier* yang susunannya memiliki dua variasi yaitu seri dan paralel. Tiap variasi daya yang diberikan pada *heater*, seluruh *peltier* disusun 12 *peltier* seri atau 12 *peltier* paralel. Kemudian selama pengujian dinyalakan *fan* untuk memberikan hembusan angin dari arah depan body aluminium.

4.2.1 Analisa Perbedaan Temperatur

Grafik perbedaan temperatur yang didapat dari data hasil pengujian terlihat pada gambar 4.1 di bawah ini :



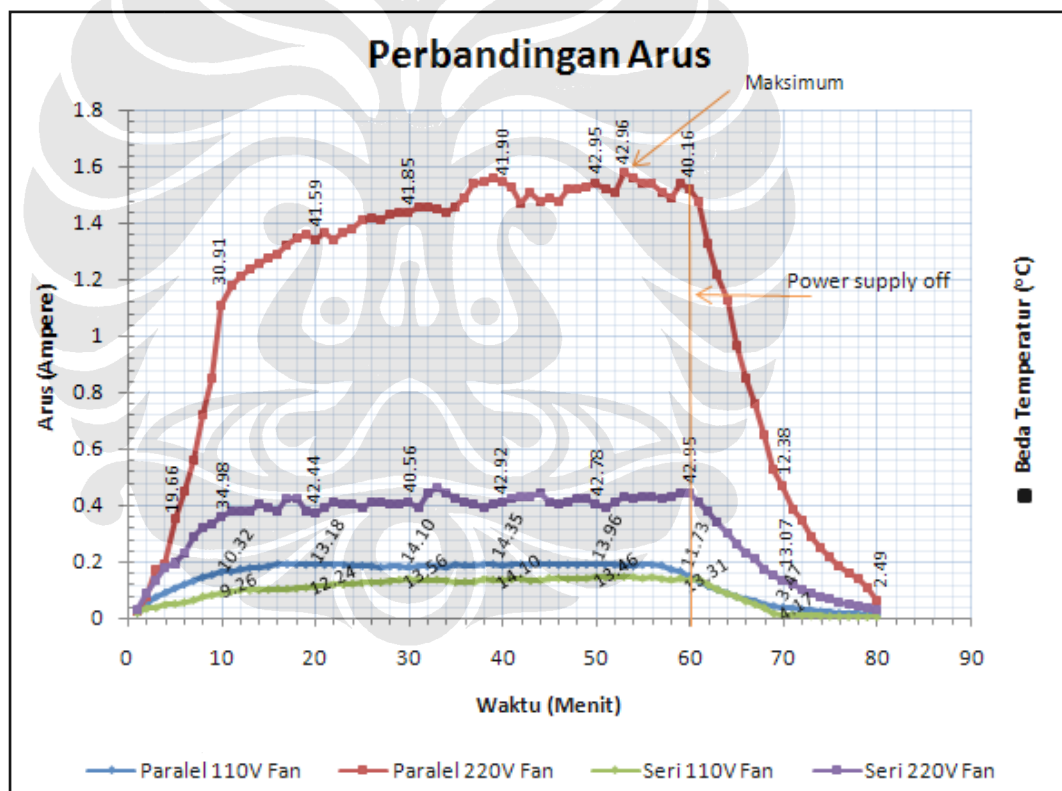
Gambar 4.1 Grafik perbandingan dT dengan variasi tegangan *input heater*, susunan *peltier*, dengan *fan*

Jika tegangan *input* yang diberikan pada *heater* 110V dan *fan* dinyalakan maka temperatur *heater* memiliki *range* antara 30-70⁰C, sedangkan dengan tegangan *input* 220V memiliki *range* antara 30-150⁰C. Nilai temperatur ini juga dipengaruhi oleh temperatur ambient.

Dari grafik pada gambar 4.1 terlihat dengan *power supply* 110V memiliki *range* beda temperatur (dT) antara 0-15°C, sedangkan dengan supply 220V memiliki *range* beda temperatur (dT) 0-45 °C. Namun selama 20 menit setelah *power supply* dimatikan beda temperatur hampir mendekati 0°C. Jadi pada pengujian dengan *fan* ini dilakukan hingga menit 80 (60 menit *power supply on*, 20 menit *off*). Beda temperatur (dT) ini merupakan beda temperatur rata-rata dari 3 *peltier* (dT_1 , dT_2 , dan dT_3) yang diketahui nilainya.

4.2.2 Analisa Arus Output

Grafik yang didapat dari data hasil pengujian tertera pada gambar 4.2 di bawah ini :



Gambar 4.2 Grafik perbandingan arus *output* dengan variasi tegangan *input heater*, susunan *peltier*, dengan *fan*

Dari grafik pada gambar 4.2 terlihat bahwa secara garis besar selama *power supply heater* dinyalakan maka terjadi kenaikan arus *output* dari menit 1 hingga menit 60. Temperatur *heater* pun akan naik selama periode waktu tersebut.

Hal ini membuktikan dengan adanya panas yang diterima pada sisi panas peltier dan adanya beda temperatur maka akan terjadi aliran arus pada kopel-kopel semikonduktor *peltier*.

Pada pengujian ini nilai arus *output* paling tinggi dicapai dengan susunan *peltier* paralel 220V, kemudian susunan seri 220V pada posisi kedua, susunan paralel 110V pada posisi ketiga, dan susunan seri 110V pada posisi terakhir. Detilnya :

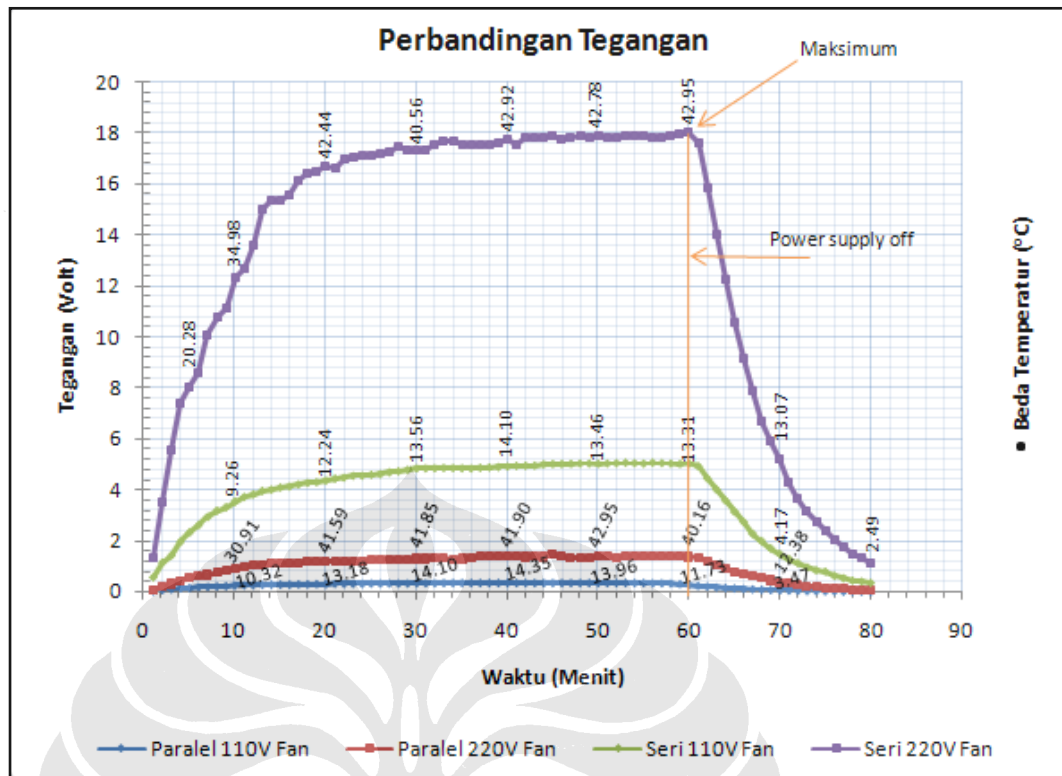
1. Paralel 220V, yaitu : 1,58 A (menit 53), dT 42.96 °C
2. Seri 220V , yaitu : 0,46 A (menit 33), dT 42.82 °C
3. Paralel 110V , yaitu : 0.19A (menit 45), dT 14.09 °C
4. Seri 110V , yaitu : 0,14A (menit 53), dT 13,32 °C

Catatan : nilai dT diperoleh dari gambar 4.1

Jika diperhatikan dengan lebih spesifik untuk *power supply* 110V, baik itu seri atau paralel, arus *output* mengalami kenaikan yang cepat dari menit 1 hingga sekitar menit 20. Kemudian dari menit 20 hingga menit 60, arus *output* relatif mengalami kenaikan yang lambat bahkan memiliki nilai yang hampir stabil. Jadi setelah nilai arus *output* maksimum dicapai, nilai arus tersebut mungkin saja dapat terulang kembali pada beberapa menit berikutnya karena nilai dT setelah menit 20 hampir stabil antara 13-14,5°C. Sedangkan untuk *power supply* 220V, baik itu seri atau paralel, terjadi kenaikan nilai arus *output* yang cepat dari menit 1 hingga menit 20. Namun setelah menit 20 kenaikan arus mulai melambat. Nilai arus pun sangat fluktuatif sama halnya dengan nilai dT nya antara 42-44,3 °C. Meskipun terlihat fluktuatif, jika dilihat dari skala nya hanya pada *range* yang relatif kecil yaitu $\pm 0-0,1$ A.

4.2.3 Analisa Tegangan Output

Grafik perbandingan tegangan *output* terlihat pada grafik 4.3 berikut ini :



Gambar 4.3 Grafik perbandingan tegangan *output* dengan variasi tegangan *input* heater, susunan *peltier*, dengan *fan*

Dari grafik pada gambar 4.3 diatas, terlihat ada kenaikan tegangan *output* seiring dengan pertambahan waktu. Kenaikan tegangan ini juga disebabkan oleh kenaikan beda temperatur pada modul *thermoelectric*. Hal ini sesuai dengan teori *seebeck effect* yaitu ketika terjadi perbedaan temperatur pada *junction* pada material semikonduktor yang berbeda, maka akan terjadi beda potensial listrik diantara *junction* tersebut. Beda potensial listrik ini meningkat dengan semakin meningkatnya perbedaan temperatur.[7]

Urutan nilai tegangan tegangan *output* terbesar yang dihasilkan hingga terkecil adalah:

1. Seri 220V , yaitu : 18,0 V (menit 60), dT 42,95 °C
2. Seri 110V , yaitu : 5,02 V (menit 53), dT 13,32 °C
3. Paralel 220V, yaitu : 1,40 V (menit 39), dT 42,17 °C
4. Paralel 110V, yaitu : 0,35 V (menit 33), dT 14,13 °C

Catatan : nilai dT diperoleh dari gambar 4.1

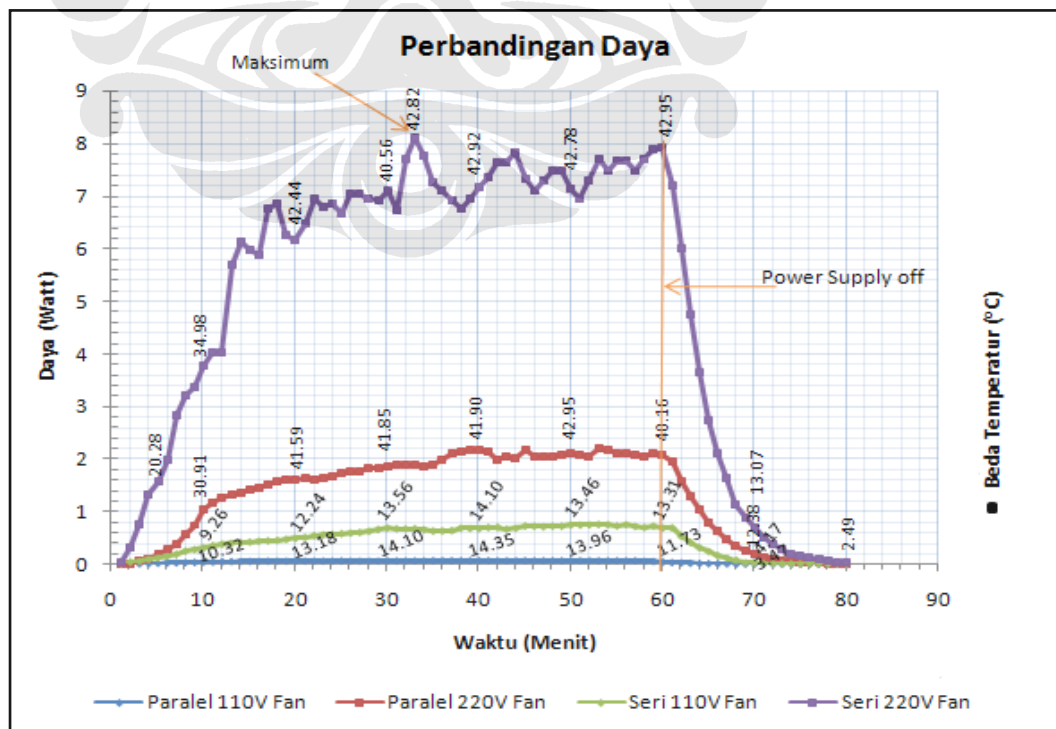
Dari ke 4 variasi yang diberikan, setelah menit 20 hingga menit 60 nilai tegangan *output* yang dihasilkan relatif stabil. Jika ada perbedaan nilai tegangan

pun sangat kecil nilainya. Hal ini menandakan bahwa ada batas maksimum dari modul *thermoelectric* untuk membangkitkan tegangan *output*, artinya beda potensial antara dua *junction* sudah mencapai nilai maksimum sehingga tidak terjadi kenaikan beda potensial lagi.

Jika dibandingkan antara susunan seri dan paralel, maka susunan seri mampu menghasilkan tegangan *output* lebih tinggi dibandingkan dengan susunan paralel. Nilai tegangan *output* susunan seri jauh lebih besar, khususnya pada susunan seri 220V yaitu memiliki kisaran nilai tegangan *output* yang relatif stabil 17-18V. Bahkan untuk susunan seri 110V pun nilai tegangan *output* yang dihasilkan masih lebih besar dibanding susunan paralel 220V. Meskipun dengan *power supply* 220V pada *heater* menghasilkan dT lebih besar daripada 110V, namun susunan paralel tidak memiliki potensi untuk menghasilkan tegangan *output* yang tinggi. Jadi jika ingin memperoleh tegangan yang besar, maka pilihlah susunan seri dengan sumber panas berkisar antara 30-150⁰C.

4.2.4 Analisa Daya Output

Dari kedua grafik perbandingan arus yaitu gambar 4.2 dan grafik perbandingan tegangan yaitu gambar 4.3, maka diperoleh grafik pada gambar 4.4 di bawah ini :



Gambar 4.4 Grafik perbandingan daya *output* dengan variasi tegangan *input heater*, susunan *peltier*, dengan *fan*

Dari grafik perbandingan daya *output* pada gambar 4.4 terlihat bahwa dari ke empat variasi yang diberikan, susunan seri 220 V mampu membangkitkan daya terbesar dibandingkan dengan variasi lainnya. Kemudian disusul oleh susunan paralel 220V, seri 110V, dan paralel 110V. Dengan nilai daya *output* :

1. Seri 220V , yaitu : 8,11 Watt (menit 33), dT 42.82 °C
2. Paralel 220V, yaitu : 2,20 Watt (menit 53), dT 42.96 °C
3. Seri 110V , yaitu : 0,74 Watt (menit 53), dT 13,32 °C
4. Paralel 110V, yaitu : 0,06 Watt (menit 45), dT 14.09 °C

Catatan : nilai dT diperoleh dari gambar 4.1

Pada grafik terlihat bahwa untuk *power supply* 220V baik susunan seri atau paralel lebih fluktuatif dibandingkan dengan *power supply* 110V. Mengapa hal ini dapat terjadi? Pertama, dengan *power supply* heater 110V pada menit 0-20 temperatur *heater* meningkat cepat dari 30-60 °C, selanjutnya dari menit 20-60 temperatur *heater* naik sangat perlahan hingga hampir mendekati 70 °C. Kedua, dengan *power supply* 220V pada menit 0-10 temperatur *heater* dengan cepat mencapai nilai 30-120 °C, selanjutnya dari menit 20-60 temperatur *heater* naik sangat lambat hingga mendekati 150 °C, tetapi kondisi inipun dapat naik turun (fluktuatif). Dari sini dapat dianalisa bahwa karakteristik *heater* mampu menghasilkan panas dengan cepat hingga menit 20 kemudian naik melambat dan terjadi fluktuasi temperatur hingga menit 60. Karakteristik dari heater ini rupanya sangat sangat mempengaruhi perbedaan temperatur yang dicapai antara sisi panas peltier (T_{hot}) dengan sisi dingin (T_{cold}) peltier, dimana $dT = T_{hot} - T_{cold}$. Karena diatas menit 20 beda temperatur ini mengalami fluktuasi, maka aliran arus yang terjadi antara *junction* modul *thermoelectric* mengalami naik-turun juga sehingga daya yang dihasilkan juga mengalami fluktuasi, hal ini sesuai dengan persamaan *generated power* :

$$P_{gen} = I^2 R_{load} = IV \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

P_{gen} = Daya yang dibangkitkan (Watt)

I = Arus (ampere)

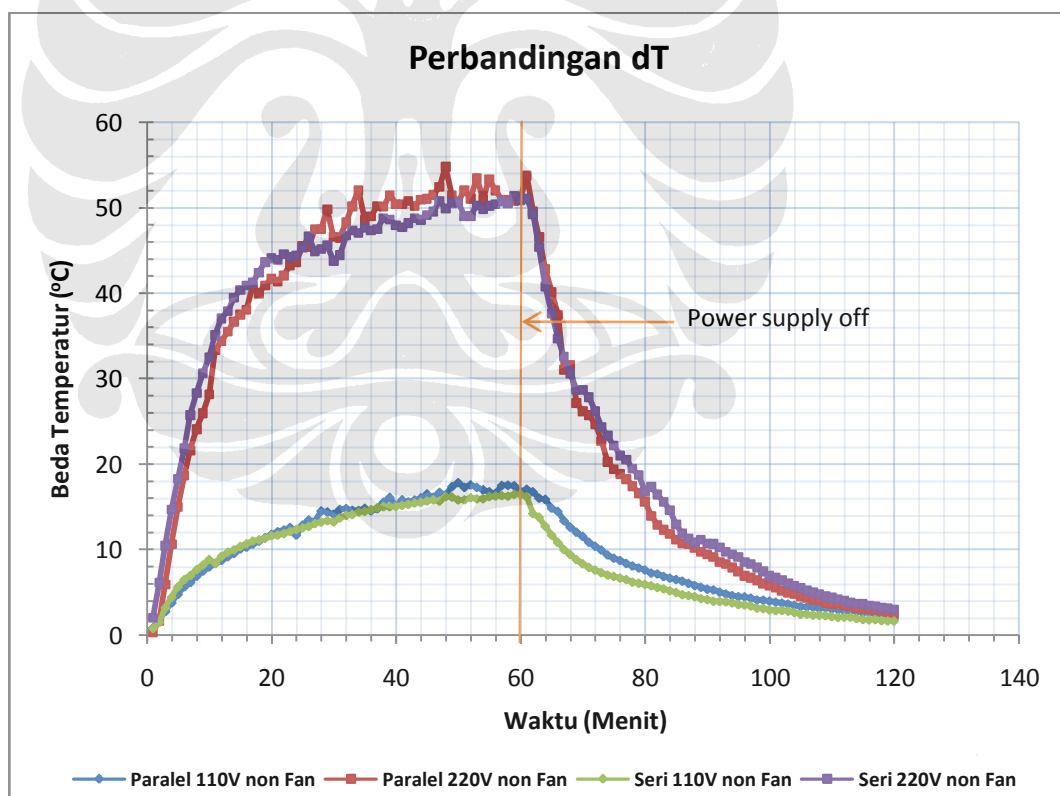
V = Tegangan atau beda potensial (Volt)

4.3 PENGUJIAN DENGAN VARIASI TEGANGAN *INPUT HEATER*, SUSUNAN *PELTIER*, TANPA *FAN*

Pengujian dilakukan dengan variasi tegangan input heater 110V dan 220V dengan voltage regulator AC. Waktu pengambilan data selama 60 menit dengan power supply heater dinyalakan dan 60 menit dimatikan. Data temperatur pada 8 channel direkam tiap 1 menit bersamaan dengan pengambilan data nilai arus dan tegangan keluaran. Pengujian menggunakan 12 peltier yang susunannya adalah seluruh peltier disusun 12 peltier seri atau 12 peltier paralel. Parameter pengujian kali sama dengan pengujian sebelumnya, perbedaannya adalah pada pengujian ini tidak diberikan hembusan angin oleh *fan* atau *fan* dimatikan.

4.3.1 Analisa Perbedaan Temperatur

Perbedaan temperatur pada pengujian ini dapat dilihat dari grafik 4.5 berikut ini :



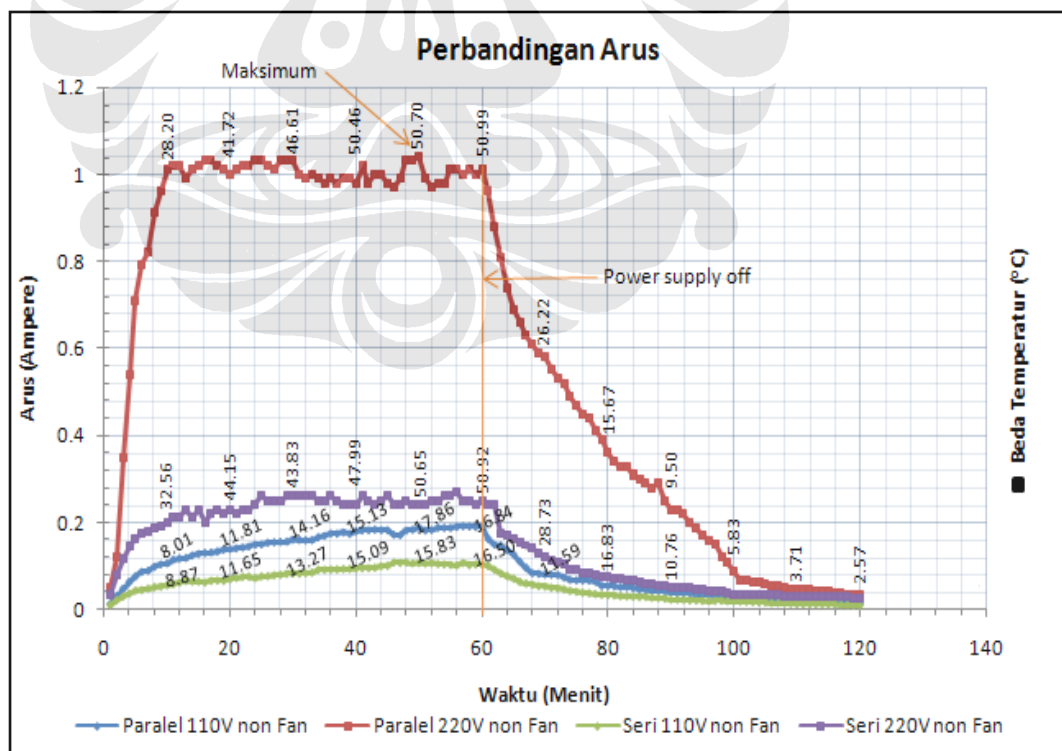
Gambar 4.5 Grafik perbandingan dT dengan variasi tegangan *input heater*, susunan *peltier*, tanpa *Fan*

Pada *power supply heater* 110V tanpa *fan*, temperatur heater memiliki *range* 30-107 °C. Sedangkan pada *supply heater* 220V tanpa *fan*, temperatur *heater* memiliki kisaran 30-234 °C. Kisaran temperatur *heater* ini lebih tinggi nilainya dibandingkan dengan pengujian dengan *fan* yang dinyalakan. Akibat dari nilai capaian temperatur *heater* yang berbeda dari pengujian sebelumnya, tentunya akan terjadi perbedaan hasil yang diperoleh.

Dari grafik pada gambar 4.5 terlihat dengan *supply* 110V memiliki kisaran beda temperatur dT antara 0-18°C, sedangkan dengan *supply* 220V memiliki kisaran beda temperatur 0-55 °C. Pada pengujian ini dibutuhkan waktu 60 menit setelah *power supply* dimatikan hingga beda temperatur hampir mendekati 0°C. Jadi pada pengujian dengan *fan* ini dilakukan hingga menit 120 (60 menit *power supply on*, 60 menit *off*). Beda temperatur (dT) ini merupakan beda temperatur rata-rata dari 3 *peltier* ($dT1$, $dT2$, dan $dT3$).

4.3.2 Analisa Arus Output

Grafik yang didapat dari data hasil pengujian tertera pada gambar 4.5 di bawah ini :



Gambar 4.6 Grafik perbandingan arus *output* dengan variasi tegangan *input heater*, susunan *peltier*, tanpa *fan*

Dari grafik pada gambar 4.6 terlihat bahwa susunan paralel 220V memiliki nilai arus *output* yang paling besar, kemudian diikuti dengan susunan lainnya, yaitu :

1. Paralel 220V, yaitu : 1,04 A (menit 50), dT 50,70 °C
2. Seri 220 V, yaitu : 0,27 A (menit 56), dT 50,45 °C
3. Paralel 110V, yaitu : 0,19 A (menit 57), dT 17,53 °C
4. Seri 110 V, yaitu : 0,10 A (menit 48), dT 16,22 °C

Catatan : nilai dT diperoleh dari gambar 4.5

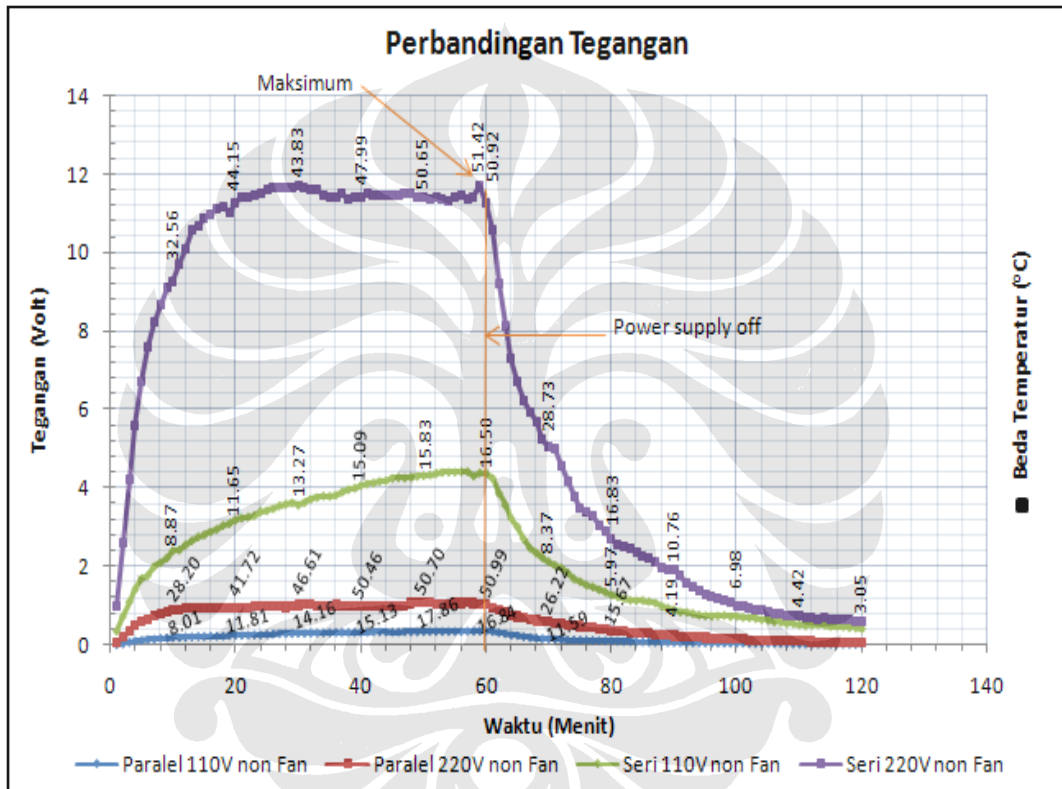
Sama seperti pengujian sebelumnya dengan *power supply heater* yang sama susunan paralel modul *thermoelectric* mampu membangkitkan arus listrik *output* lebih besar dari susunan seri. Namun fenomena yang terjadi adalah pada pada pengujian tanpa *fan* ini nilai perbedaan temperatur yang terjadi lebih besar dari pengujian dengan *fan*, tetapi mengapa arus listrik yang dibangkitkan nilainya lebih kecil dibandingkan pengujian dengan *fan*? Jika dibandingkan, pengujian dengan *fan* menghasilkan arus terbesar 1,58 A, dT 42,96 °C (susunan paralel 220V), sedangkan terkecil 0,14A , dT 13,32 °C (susunan seri 110V). Nilai ini jauh lebih besar dari pengujian tanpa *fan*.

Hal ini dapat dianalisa bahwa pada pengujian ada 6 termokopel di pasang pada 3 *peltier* yang berada pada sisi atas *body* aluminium, yaitu pada sisi panas *peltier* pertama (Thot1), sisi dingin *peltier* pertama (Tcold1), sisi panas *peltier* kedua (Thot2), sisi dingin *peltier* kedua (Tcold2), sisi panas *peltier* ketiga (Thot3), dan sisi dingin *peltier* ketiga (Tcold3). Kemudian dari 6 nilai ini diperoleh dT1, dT2, dan dT3. Lalu diambil nilai dT rata-rata dari ketiga nilai dT tersebut. Karena pengujian yang dilakukan adalah tanpa *fan* artinya tidak ada hembusan udara ke arah alat penguji. Lalu jika *heater* dipanaskan dengan *range* temperatur 30-234 °C, secara konveksi alami aliran udara panas akan mengarah ke atas karena massa jenis (ρ) udara panas lebih kecil dari udara di atasnya. Jadi 3 sisi panas *peltier* yang dipasang pada sisi atas *body* aluminium akan menerima panas lebih besar daripada 9 *peltier* lainnya yang berada pada sisi samping kanan dan kiri juga dan sisi bawah *body*. Jadi beda temperatur yang diperoleh lebih besar pada sisi atas. Lalu mengapa arus yang dibangkitkan kecil? Untuk menganalisa hal ini perlu mengetahui secara keseluruhan beda temperatur dari ke 12 *peltier* yang

digunakan, kemungkinan yang terjadi adalah dT pada sisi atas *body* besar dan dT pada sisi samping dan bawah sangat kecil akibat aliran konveksi alami yang terjadi. Jadi arus *output* yang dibangkitkan secara keseluruhan lebih kecil dari pengujian dengan *fan*.

4.3.3 Analisa Tegangan Output

Grafik berikut ini menggambarkan perbandingan tegangan *output* dari masing-masing variasi :



Gambar 4.7 Grafik perbandingan tegangan *output* dengan variasi tegang *input* heater, susunan *peltier*, tanpa *fan*

Dari grafik pada gambar 4.7 terlihat bahwa susunan seri 220V memiliki nilai tegangan *output* yang paling besar, urutannya sebagai berikut :

1. Seri 220V , yaitu : 11,68 V (menit 59), dT 51,42 °C
2. Seri 110V , yaitu : 4,43 V (menit 56), dT 16,29 °C
3. Paralel 220V, yaitu : 1,06 V (menit 49), dT 52,43 °C
4. Paralel 110V, yaitu : 0.36 V (menit 60), dT 16,84 °C

Dari hasil pengujian tanpa *fan*, secara keseluruhan diperoleh tegangan *output* yang lebih kecil dibandingkan dengan tegangan *output* pada pengujian dengan *fan*, padahal dT rata-rata dari 3 *peltier* lebih besar dari dT rata-rata pengujian dengan *fan*. Hal ini disebabkan karena termokopel dipasang pada sisi atas yang telah dijelaskan sebelumnya, selain itu juga dipengaruhi oleh nilai Koefisien Seebeck, yaitu :

$$\alpha = \Delta V / \Delta T \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana : α = koefisien seebeck V/K

ΔV = beda potensial (Volt)

ΔT = beda temperatur (K)

Berdasarkan tabel 2.1 *properties* untuk modul *thermoelectric* :

Table 2.1 *Properties* Penting Untuk Modul *Thermoelectric* (n-couple=127 dan G=0.121 cm).

| T [K] | α [10 ⁻⁴ V/K] | ρ [10 ⁻³ Ω -cm] | κ [10 ⁻² W/cm·K] | Z [10 ⁻³ 1/K] |
|-----------------|--|---|---|------------------------------------|
| 273 | 1.94 | 0.92 | 1.61 | 2.54 |
| 300 | 2.02 | 1.01 | 1.51 | 2.68 |
| 325 | 2.07 | 1.16 | 1.53 | 2.44 |
| 350 | 2.10 | 1.28 | 1.55 | 2.22 |
| 375 | 2.00 | 1.37 | 1.58 | 1.88 |
| 400 | 1.96 | 1.48 | 1.63 | 1.59 |
| 425 | 1.90 | 1.58 | 1.73 | 1.32 |
| 450 | 1.86 | 1.68 | 1.88 | 1.06 |
| 475 | 1.79 | 1.76 | 2.09 | 0.87 |

Sumber : *Jurnal Opportunities For Thermoelectric Energy in Hybrid Vehicles*

Berdasarkan tabel di atas nilai koefisien seebeck bergantung pada temperatur pada sisi panas peltier. Koefisien seebeck mencapai nilai maksimum pada T_{hot} 375 K (102 °C), sedangkan di atas 375 K koefisien seebeck menurun. Menurunnya nilai koefisien seebeck ini akan menurunkan tegangan *output* yang dibangkitkan, berdasarkan persamaan: [7]

$$V_{oc} = 127 \times 2 \times \alpha \times dT \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana : V_{oc} = Tegangan open circuit (V)

α = koefisien seebeck (V/K)

dT = beda temperatur (K)

127 = jumlah kopel

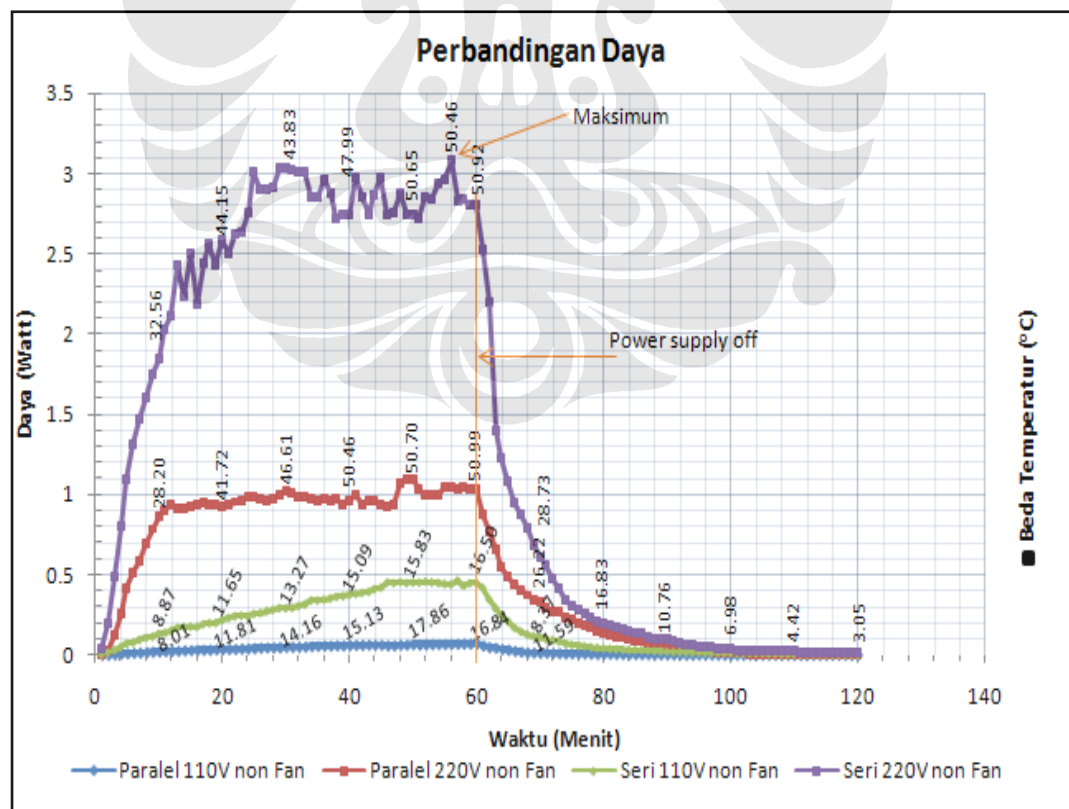
2 = jumlah semikonduktor dalam satu kopel

Persamaan ini untuk satu *peltier* saja, *peltier* yang digunakan dalam pengujian tipe TEC1-12706, artinya memiliki 127 kopel.

Pada pengujian tanpa *fan*, temperatur *heater* berkisar antara 30-234 °C, dengan temperatur sisi panas ($Thot$) antara 30-180 °C. Jadi dengan nilai $Thot$ yang tinggi maka koefisien seebeck masing-masing *peltier* akan menurun sehingga tegangan *output* pun akan menurun.

4.3.4 Analisa Daya Output

Dari kedua grafik perbandingan arus yaitu gambar 4.6 dan grafik perbandingan tegangan yaitu gambar 4.7, maka diperoleh grafik pada gambar 4.8 di bawah ini :



Gambar 4.8 Grafik perbandingan daya *output* dengan variasi tegangan *input heater*, susunan *peltier*, tanpa *fan*

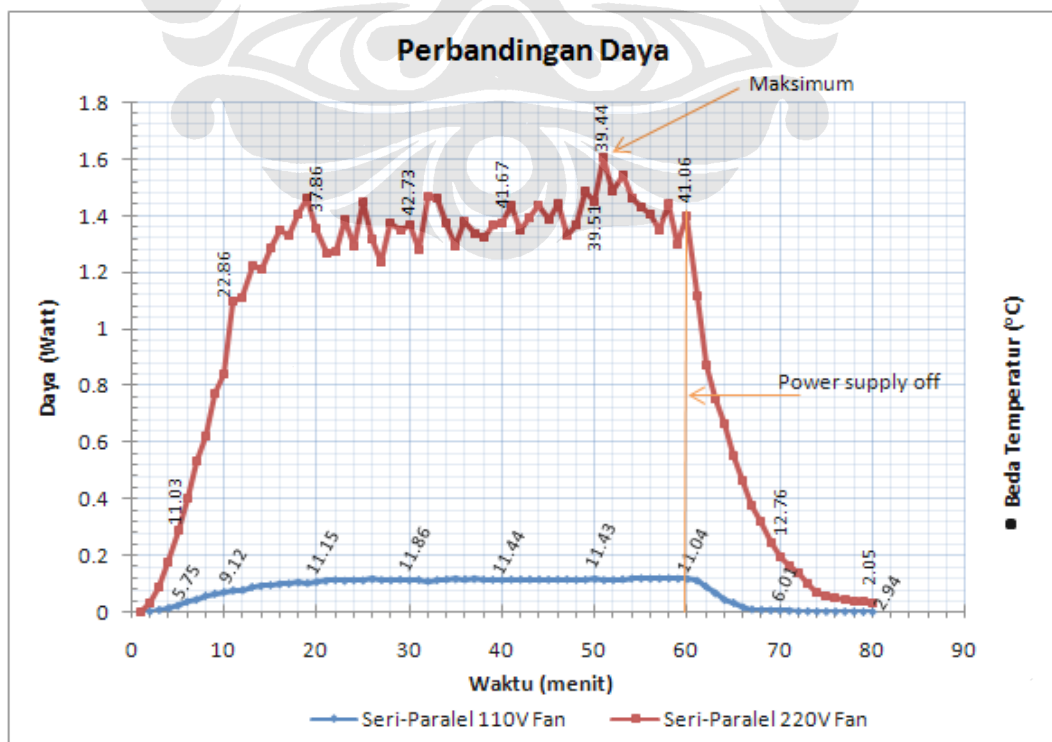
Dari grafik di atas terlihat bahwa daya *output* maksimum dicapai oleh susunan seri 220V yaitu 3.08 Watt dengan beda temperatur dT yaitu $50,46^{\circ}\text{C}$, kemudian paralel 220V yaitu 1,1 Watt, seri 110V yaitu 0,46 Watt, terakhir paralel 110 V yaitu 0,06 Watt. Jadi untuk mendapatkan daya terbesar masih tetap dengan susunan seri 220V. Pengaruh tidak adanya *fan* pada pencapaian nilai daya *output* yang lebih kecil dibandingkan dengan yang menggunakan *fan*.

4.4 PENGUJIAN DENGAN VARIASI TEGANGAN INPUT HEATER, SUSUNAN PELTIER SERI-PARALEL, DENGAN FAN

Pengujian terakhir ini memiliki dua variasi *power supply* untuk *heater* yaitu 110V dan 220V dan susunan *peltier* adalah 6 disusun seri dan 6 disusun paralel dengan *fan* dinyalakan. Setelah data dari pengujian sebelumnya dapat dilihat bahwa untuk membangkitkan daya terbesar dengan susunan seri dan menggunakan *fan*. Kemudian pengujian untuk dilakukan untuk melihat apakah susunan seri-paralel dengan *fan* mampu membangkitkan daya yang lebih besar

4.4.1 Analisa Daya Output

Grafik yang didapat dari data hasil pengujian tertera pada gambar 4.5 di bawah ini :



Gambar 4.9 Grafik perbandingan daya *output* dengan variasi tegangan *input heater*, susunan *peltier*, dengan *fan*

Hasilnya adalah pencapaian daya terbesar 1,60 Watt untuk susunan seri-paralel 220V dan daya terbesar yang dihasilkan susunan seri-paralel 110V yaitu 0,11 Watt. Jadi dari hasil perolehan data susunan seri-paralel tidak mampu membangkitkan daya yang besar. Daya yang dibangkitkan susunan seri-paralel masih jauh lebih kecil dibandingkan dengan susunan seri.

