

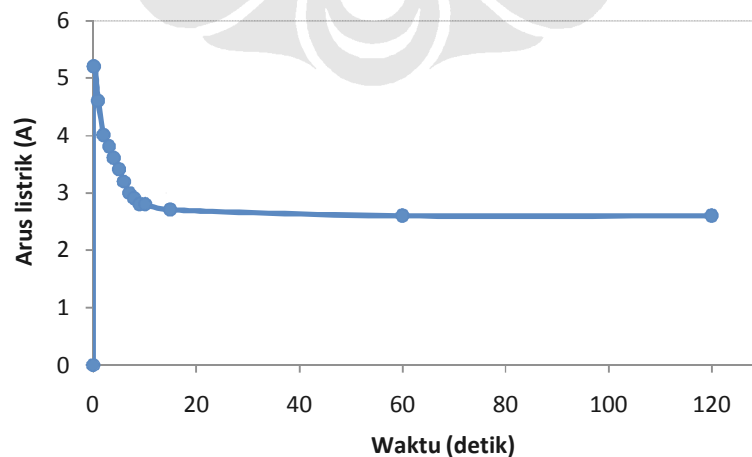
# BAB V

## HASIL DAN ANALISIS

### 5.1 HASIL PENGUJIAN KESTABILAN SISTEM *CASCADE*

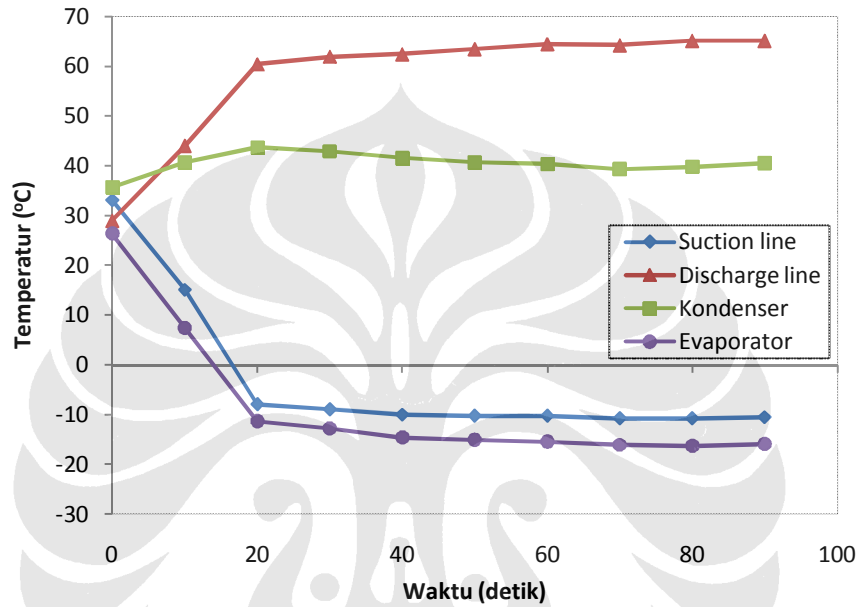
Dalam proses pengujian pada saat menyalakan sistem untuk pertama kali, diperlukan waktu oleh sistem supaya dapat bekerja dengan stabil. Data yang diambil saat kondisi sistem belum stabil berarti belum valid karena masih mungkin terjadi perubahan yang cukup besar. Saat sistem dinyatakan stabil adalah ketika angka yang ditunjukkan pada alat ukur, yakni tekanan dan temperatur tidak berubah atau hanya sedikit mengalami perubahan yang masih dapat ditoleransi. Pada saat sistem dalam kondisi mati, tekanan pada *suction line* dan *discharge line* kompresor menjadi kurang lebih sama.

Percobaan untuk mengetahui waktu *steady* ini dilakukan pada sistem *high-stage* dengan menggunakan R22 terlebih dulu, karena sesuai prosedur penyalaan sistem *cascade*, sistem *high-stage* harus terlebih dulu dinyalakan supaya kondenser pada sistem *low-stage* dapat menerima kalor yang berasal dari evaporator sistem *high-stage*. Keadaan sistem *high-stage* pada saat dalam keadaan mati memiliki tekanan pada *discharge line* 6,4 bar dan tekanan pada *suction line* 6,2 bar, dengan temperatur *discharge line* 29°C, pada *suction line* 33,1°C, pada kondenser 35,7°C, dan pada evaporator 26,4°C.

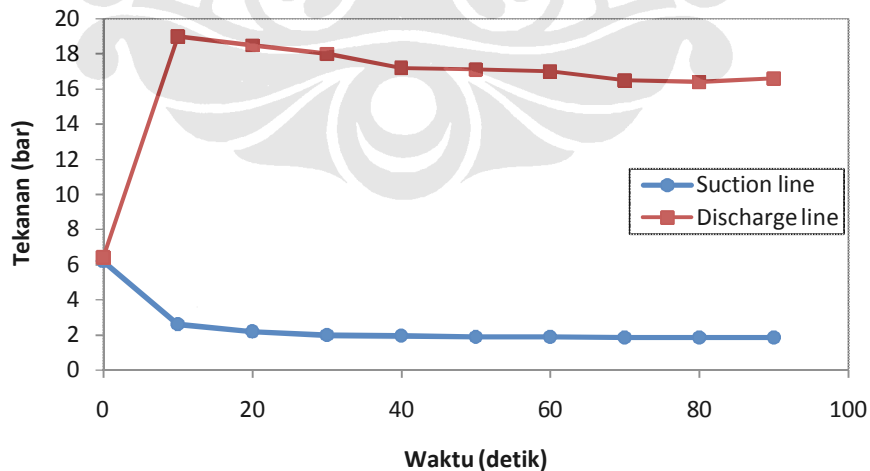


Gambar 5.1 Grafik perubahan arus listrik terhadap waktu

Grafik diatas menunjukkan perubahan arus listrik yang diterima kompresor pada saat *start-up* hingga sistem berjalan stabil. Arus listrik mengalami penurunan yang cukup besar hingga 6 detik pertama, setelah itu perlahan-lahan arus listrik mulai stabil, hingga pada saat sistem sudah berjalan selama 1 menit, arus listrik mengalir secara konstan.



Gambar 5.2 Grafik perubahan temperatur *high-stage* terhadap waktu



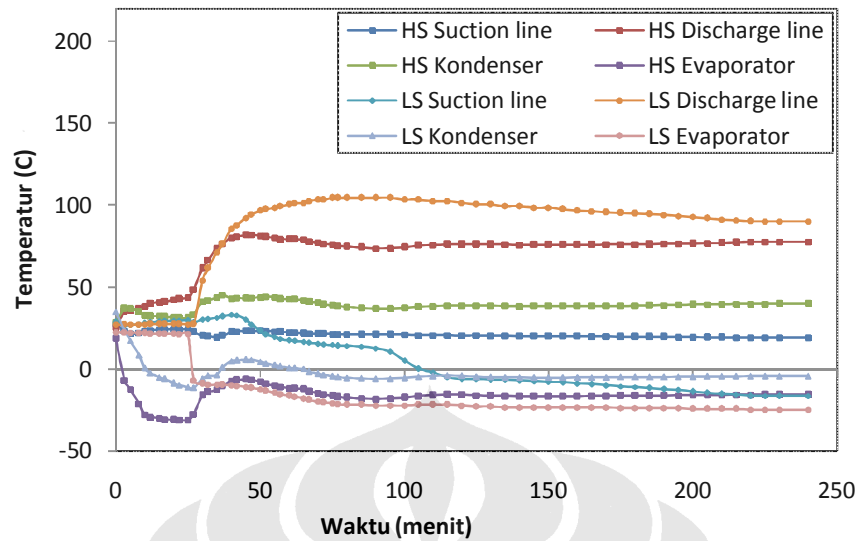
Gambar 5.3 Grafik perubahan tekanan *high-stage* terhadap waktu

Gambar 5.2 diatas menunjukkan perubahan temperatur yang diukur pada 4 titik yaitu *suction line*, *discharge line*, kondenser, dan evaporator. Berdasarkan grafik diatas, perubahan temperatur terjadi secara signifikan hingga 20 menit pertama sejak sistem dinyalakan. Setelah itu dapat dikatakan sistem cenderung menuju stabil, hal tersebut dapat dilihat dari perubahan temperatur yang tidak terlalu besar.

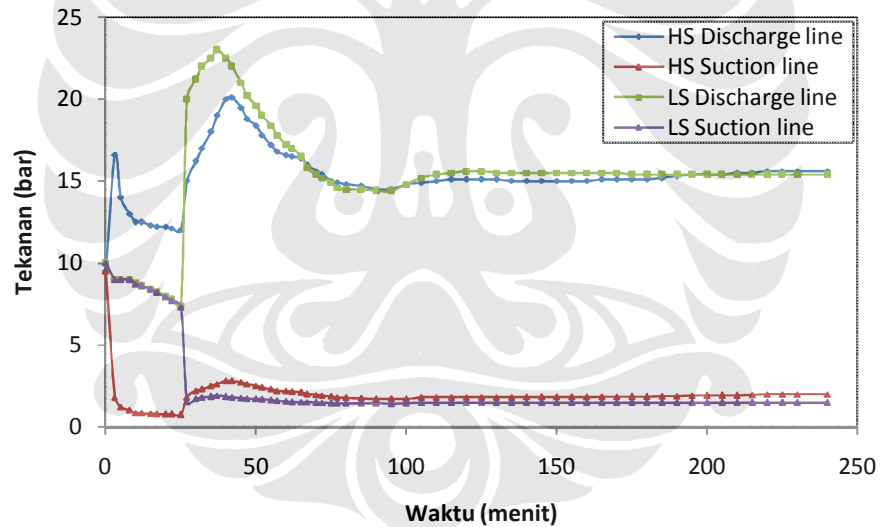
Sedangkan gambar 5.3 menunjukkan perubahan tekanan pada *suction line* dan *discharge line* dari mulai sistem dinyalakan. Perubahan signifikan terjadi pada 10 menit pertama, setelah itu sistem masih cenderung berubah dan baru menunjukkan kestabilan tekanan pada saat sistem sudah berjalan minimal selama 70 menit. Berdasarkan hasil ini, maka sistem *high-stage* baru dinyatakan stabil jika sudah berjalan selama kurang lebih 70 menit, setelah rentang waktu sedemikian, data yang diambil dapat dinyatakan valid.

Waktu yang dibutuhkan sistem refrigerasi *casacde* agar berjalan stabil lebih lama dibandingkan sistem satu tingkat, sistem *cascade* berjalan dengan menyalakan terlebih dulu sistem *high-stage* hingga stabil, baru kemudian menyalakan sistem *low-stage*, sehingga proses hingga menuju kestabilan melibatkan 2 sistem. Untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan hingga sistem berjalan stabil dapat memperhatikan parameter yang diukur pada sistem *high-stage*.

Untuk melakukan pengujian pada sistem refrigerasi *cascade*, keadaan sistem *high-stage* dibuat berbeda. Pada saat belum dinyalakan adalah tekanan pada *discharge line* 9,5 bar, pada *suction line* 9,5 bar, dengan temperatur *suction line* 29,4°C, temperatur *discharge line* 29,3°C, kemudian pada temperatur kondenser 28,9°C dan temperatur evaporatornya 23°C. Sedangkan keadaan sistem *low-stage*-nya pada saat sistem mati adalah dengan tekanan pada *discharge line* 10 bar, tekanan pada *suction line* 10 bar, dengan temperatur pada *discharge line* 29,6°C dan *suction line* 29,7°C, kemudian temperatur kondenser 22,9°C dan temperatur evaporator 22,3°C.



Gambar 5.4 Grafik perubahan temperatur sistem terhadap waktu



Gambar 5.5 Grafik perubahan tekanan sistem terhadap waktu

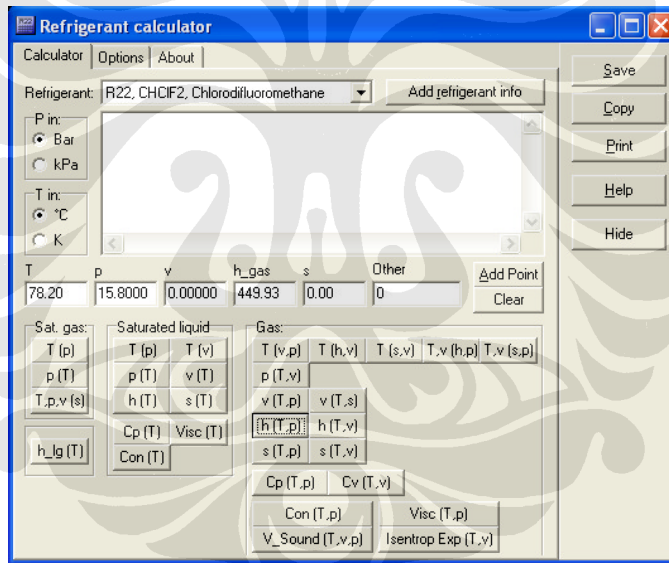
Berdasarkan grafik diatas, ternyata waktu yang dibutuhkan hingga sistem *cascade* berjalan stabil jauh lebih lama dibandingkan hanya sistem *high-stage* saja. Ketika sistem *high-stage* berjalan sendirian, dibutuhkan waktu sekitar 70 menit supaya sistem berjalan stabil. Pada pengujian sistem *cascade*, sistem *low-stage* baru dinyalakan setelah temperatur *high-stage* evaporator cukup rendah dan dirasakan dapat memberikan kalor pendinginan yang cukup kepada *low-stage*

evaporator. Pada temperatur *high-stage* evaporator mencapai  $-26,7^{\circ}\text{C}$ , sistem low-stage baru dinyalakan.

Tekanan dan temperatur pada kedua sistem berubah dengan signifikan pada 15 menit pertama. Tekanan pada kedua sistem tidak banyak mengalami perubahan pada saat sistem sudah berjalan selama sekitar 120 menit, sedangkan temperatur sistem mencapai titik dimana tidak mengalami perubahan berarti saat sudah berjalan selama 220 menit, hal itu dapat dilihat dari tidak berubahnya temperatur meskipun sudah berjalan 20 menit setelah itu.

## 5.2 PROSES PERHITUNGAN

Perhitungan terhadap besarnya entalpi dilakukan melalui software coolpack melalui menu *refrigerant calculator* yang ada didalamnya.



Gambar 5.6 Coolpack *refrigerant calculator*[9]

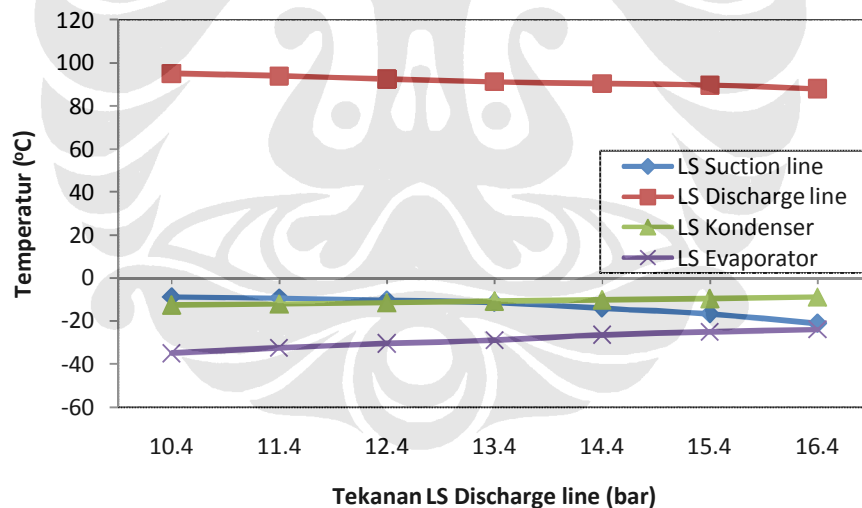
Asumsi yang digunakan adalah :

- Proses kondensasi terjadi tanpa adanya *pressure drop* pada kondenser.
- Temperatur setelah *subcooling* adalah temperatur pada *output* kondenser yang diukur melalui termometer digital.
- Temperatur setelah *superheat* adalah temperatur yang ditunjukkan pada *suction line* yang diukur melalui termometer digital.

- Proses ekspansi terjadi secara adiabatik sehingga entalpi pada kondenser sama dengan entalpi pada evaporator.
- Perbandingan data dilakukan dengan menggunakan data *tekanan low-stage discharge line* sebagai patokan, dengan perbandingan setiap 1 bar.

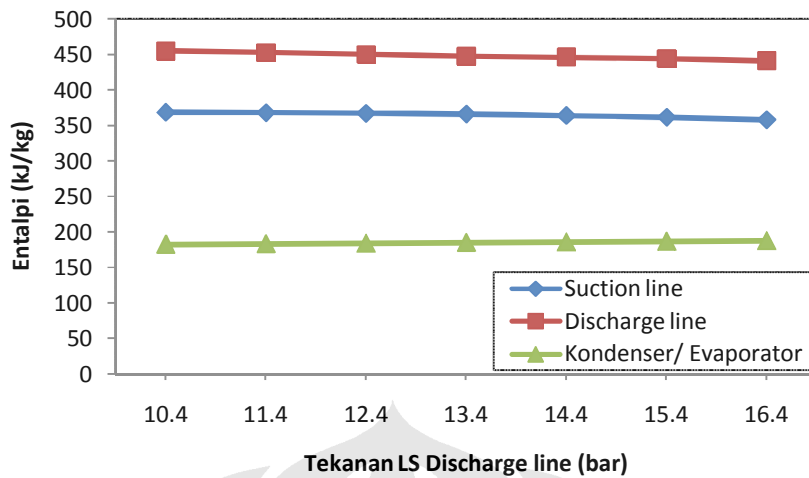
Sedangkan untuk menghitung entalpi pada *suction line* dan *discharge line*, data temperatur dan tekanan yang didapat pada saat pengujian dimasukkan sebagai *input*, sehingga didapat besarnya entalpi pada fase gas. Dengan besarnya entalpi yang diketahui, dan tegangan listrik serta arus listrik yang diketahui dari alat ukur, maka dengan menggunakan rumus-rumus yang telah dijelaskan pada BAB 2, dapat dicari nilai kapasitas kalor ( $Q$ ), laju aliran massa ( $\dot{m}$ ), selisih entalpi kompresi ( $\Delta h_{\text{comp}}$ ), daya kompresor ( $P$ ), kapasitas refrigerasi  $\dot{Q}$ , dan COP.

### 5.3 PENGARUH PERUBAHAN TEKANAN *LOW-STAGE* TERHADAP SISTEM *LOW-STAGE*



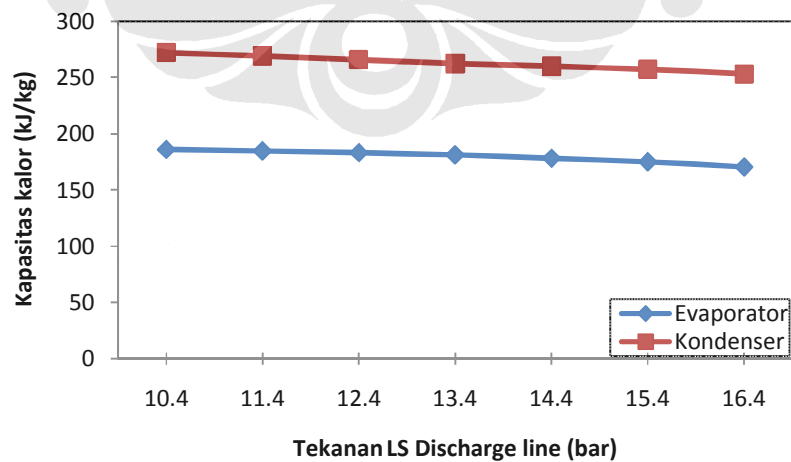
Gambar 5.7 Pengaruh perubahan tekanan *low-stage* terhadap temperatur pada *low-stage*

Dari gambar 5.6 menunjukkan bahwa dengan menaikkan tekanan pada sistem *low-stage* akan mengakibatkan kenaikan temperatur pada kondenser dan evaporator, tapi temperatur pada *suction line* dan *discharge line* kompresor mengalami penurunan.



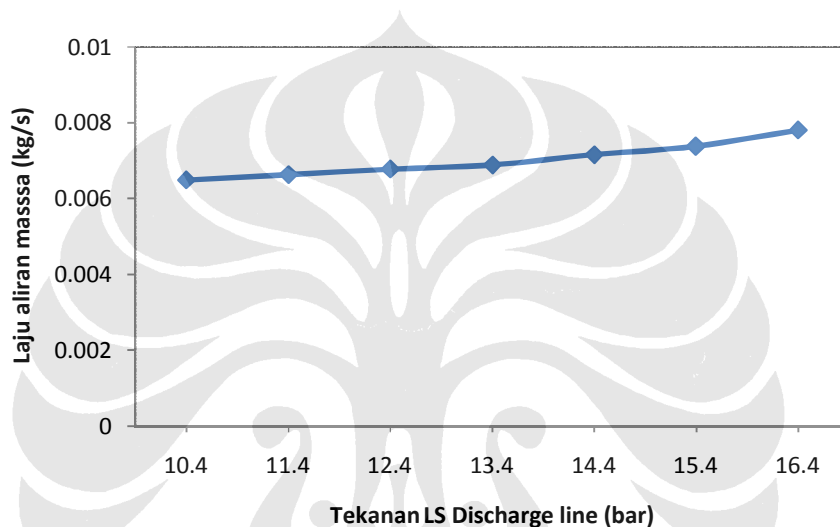
Gambar 5.8 Pengaruh perubahan tekanan *low-stage* terhadap entalpi pada *suction line*, *discharge line*, dan kondenser/evaporator pada *low-stage*

Berdasarkan grafik diatas, perubahan pada tekanan *low-stage* hanya mengakibatkan entalpi pada sistem hanya mengalami sedikit perubahan. Kenaikkan tekanan pada *discharge line* yang menyebabkan penurunan temperatur membuat entalpi pada *suction* dan *discharge line* juga mengalami penurunan meskipun tidak penurunannya tidak besar. Sedangkan entalpi pada output kondenser juga mengalami sedikit peningkatan bila tekanannya naik, hal tersebut karena peningkatan tekanan menyebabkan temperatur output kondenser juga mengalami kenaikan.



Gambar 5.9 Pengaruh perubahan tekanan *low-stage* terhadap kapasitas kalor pada *low-stage*

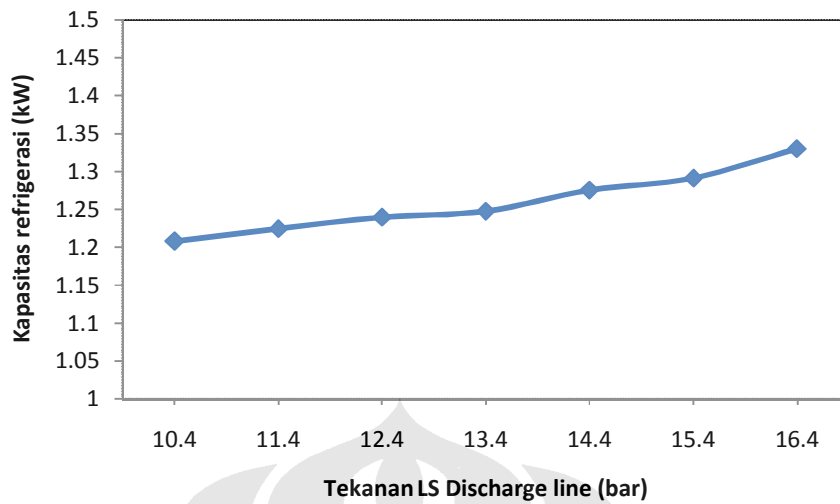
Dari gambar diatas, diketahui bahwa peningkatan kapasitas kalor terjadi jika tekanan dinaikkan, hal tersebut terjadi karena dengan meningkatnya tekanan, maka selisih antara temperatur dan entalpi pada titik saturasi fase gas ke fase cair akan semakin kecil, hal ini dapat dilihat lebih lanjut pada diagram p-h. Yang menyebabkan jumlah kalor yang dibutuhkan untuk mengubah fase dari gas ke cair atau sebaliknya menjadi semakin sedikit.



Gambar 5.10 Pengaruh perubahan tekanan *low-stage* terhadap laju aliran massa pada *low-stage*

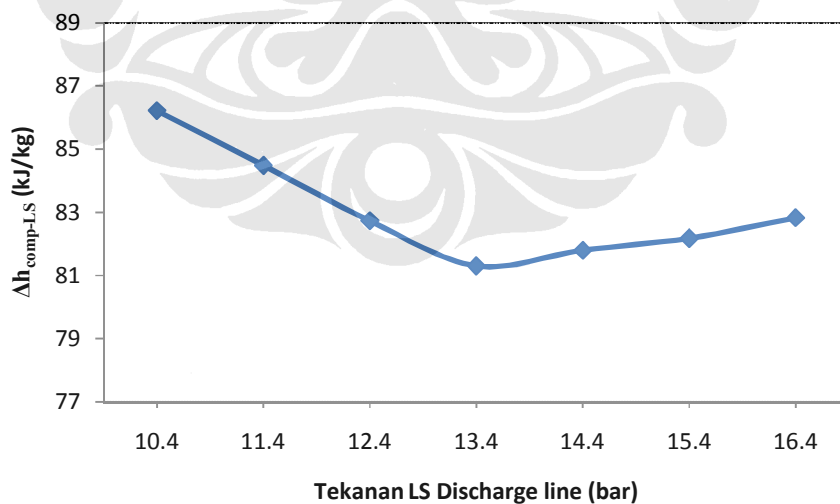
Laju aliran massa didapat dari persamaan daya kompresor dibagi dengan selisih entalpi kompresi. Kedua parameter tersebut dapat diketahui dari alat ukur yang ada, yaitu melalui tekanan, temperatur, dan besarnya arus listrik yang diberikan ke kompresor. Peningkatan arus listrik terjadi apabila tekanan dinaikkan, dan kenaikannya cukup signifikan. Karena pada percobaan ini pengaturan tekanan dilakukan dengan cara menambah dan mengurangi refrigeran, dimana tekanan dibuat lebih tinggi dengan cara menambah massa refrigeran yang mengalir dalam sistem atau sebaliknya. Peningkatan tekanan disebabkan oleh massa yang bertambah sehingga laju aliran massa juga ikut bertambah.





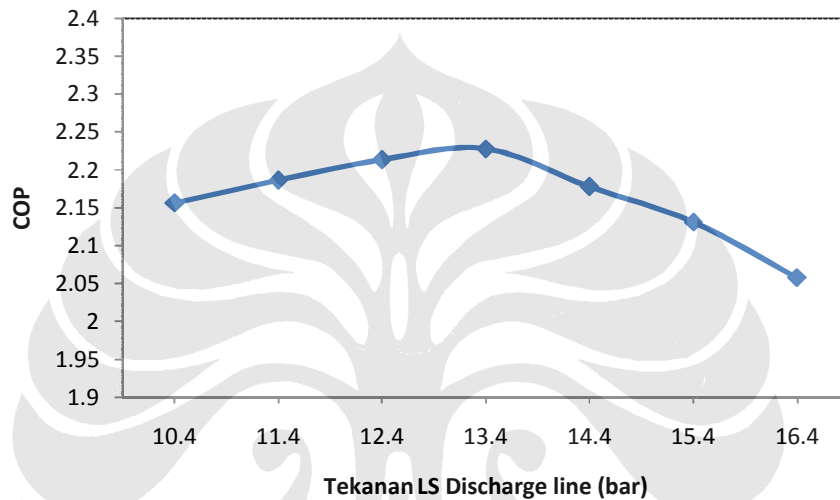
Gambar 5.11 Pengaruh perubahan tekanan *low-stage* terhadap kapasitas refrigerasi pada *low-stage*

Berdasarkan grafik diatas, ternyata menaikkan tekanan justru meningkatkan kapasitas refrigerasi. Hal tersebut terjadi karena adanya peningkatan dari laju aliran massa refrigeran yang lebih signifikan dibandingkan dengan penurunan kapasitas kalor evaporator.



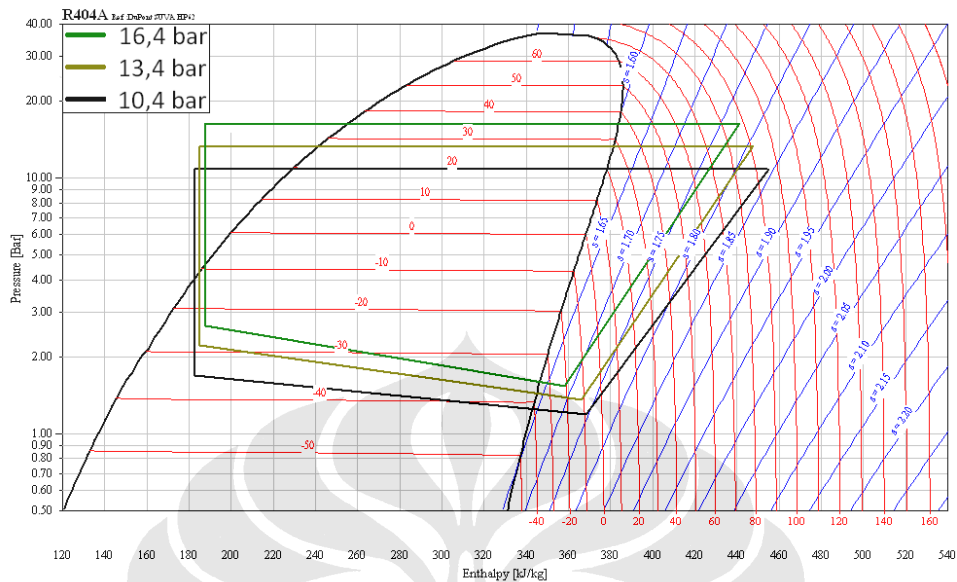
Gambar 5.12 Pengaruh perubahan tekanan *low-stage* terhadap selisih entalpi kompresi per kilogram pada *low-stage*

Gambar diatas menunjukkan bahwa peningkatan tekanan akan mengubah besarnya selisih entalpi kompresi. Kenaikkan tekanan hingga 13,4 bar menyebabkan selisih entalpi kompresi mengalami penurunan, namun pada tekanan diatas 13,4 bar, selisih entalpi kompresi mengalami peningkatan. Hal tersebut menunjukkan bahwa selisih entalpi kompresi sensitif terhadap jumlah massa refrigeran yang mengalir dalam sistem.



Gambar 5.13 Pengaruh perubahan tekanan *low-stage* terhadap COP pada *low-stage*

Berdasarkan grafik diatas, peningkatan tekanan akan menyebabkan perubahan pada nilai koefisien kinerja. Yang terjadi pada COP adalah kebalikan dari selisih entalpi kompresi, hal tersebut karena COP adalah fungsi yang berbanding terbalik dengan selisih entalpi kompresi. Grafik diatas dapat menunjukkan bahwa keadaan sebelum 13,4 bar adalah *undercharged* atau jumlah massa refrigeran kurang, sedangkan setelah 14,4 bar adalah *overcharged* atau jumlah massa refrigeran yang berlebihan. Pada saat *undercharged*, sistem mengalami *losses* yang lebih besar pada alat ekspansi dan alat penukar kalor pada *cascade*, sedangkan pada saat *overcharged*, *losses* sebagian besar terjadi pada evaporator dan kondenser. Kenaikkan dampak refrigerasi secara perlahan pada saat sistem mengalami *undercharged* dan *overcharged* menyebabkan nilai COP yang naik hingga titik tertentu dan kemudian turun.

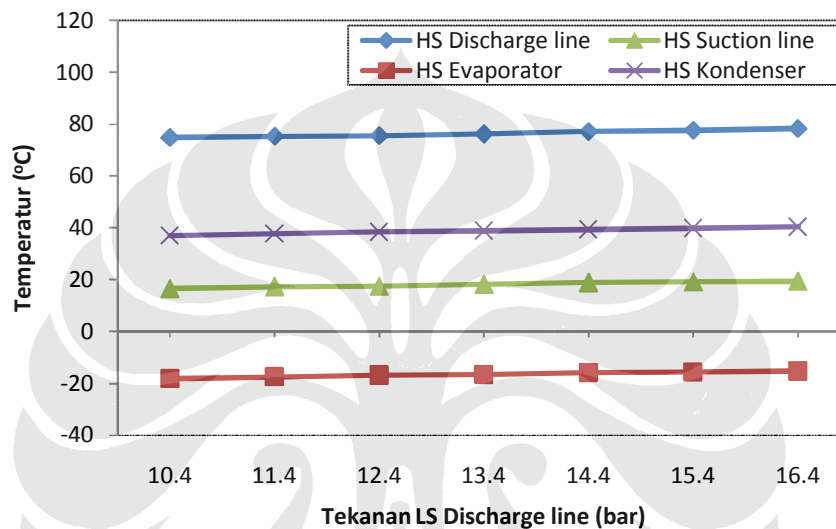


Gambar 5.14 Pengaruh perubahan tekanan *low-stage* terhadap diagram p-h sistem *low-stage*

Pada plot diagram p-h, diambil 3 sampel data, yaitu pada saat tekanan *low-stage discharge line* kompresor 10,4 bar, 13,4 bar, dan 16,4 bar. Perubahan yang terjadi memiliki tren yang sama. Semakin tinggi tekanan pada sistem *low-stage*, maka grafik akan cenderung bergerak keatas, hal tersebut dikarenakan oleh meningkatnya temperatur dan tekanan. Perubahan tersebut cukup besar sehingga dapat terlihat melalui diagram p-h. Dapat diamati bahwa penurunan entalpi pada titik *suction line* dari tekanan *low-stage discharge line* 10,4 bar ke 13,4 bar jauh lebih rendah dibandingkan penurunan entalpi dari tekanan *low-stage discharge line* 13,4 bar ke 16,4 bar. Sementara penurunan entalpi pada titik *discharge line* cenderung merata. Hal tersebut menyebabkan selisih entalpi pada saat tekanan LS *discharge line* 13,4 bar adalah yang paling rendah. Sementara dampak refrigerasi pada saat tekanan *discharge line* 13,4 bar dengan 16,4 bar tidak jauh berbeda karena entalpi pada titik *suction line* dan akhir ekspansi yang tidak jauh berbeda. Kedua hal tersebut menyebabkan nilai COP sistem *low-stage* pada saat tekanan *low-stage discharge line* 13,4 bar menjadi paling tinggi.

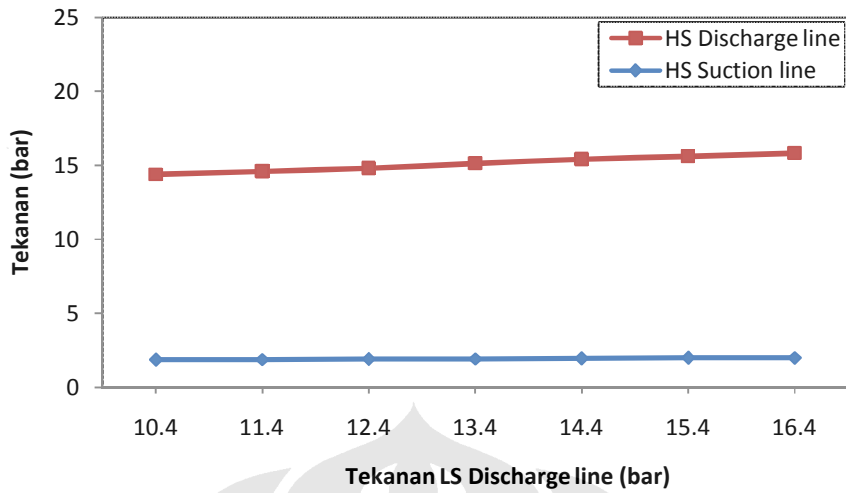
#### 5.4 PENGARUH PERUBAHAN TEKANAN *LOW-STAGE* TERHADAP SISTEM *HIGH-STAGE*

Sistem *low-stage* pada sistem refrigerasi *cascade* mempunyai pengaruh tidak hanya kepada kinerja sistem *low-stage* tetapi juga pada sistem *high-stage*. Perubahan temperatur dan tekanan yang terjadi pada *low-stage* akan mengakibatkan perubahan yang terjadi pada sistem *high-stage*.



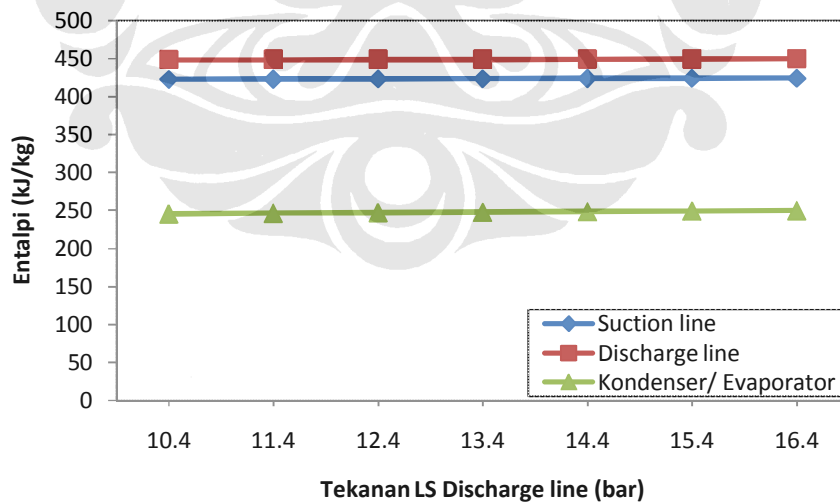
Gambar 5.15 Pengaruh perubahan tekanan *low-stage* terhadap temperatur pada *high-stage*

Grafik diatas menunjukkan bahwa kenaikan tekanan pada sistem *low-stage* menyebabkan kenaikan tekanan pada sistem *high-stage*. Pada dasarnya, temperatur pada sistem *low-stage* akan meningkat jika tekanan padanya ditingkatkan, dengan temperatur *low-stage* kondenser yang meningkat akan menyebabkan beban pendinginan yang diambil oleh *high-stage* evaporator menjadi semakin berat, sehingga temperatur *high-stage* evaporator akan meningkat. Peningkatan temperatur pada evaporator ini akan diikuti oleh peningkatan temperatur pada titik lain di sistem *high-stage* seperti pada kompresor dan kondenser.



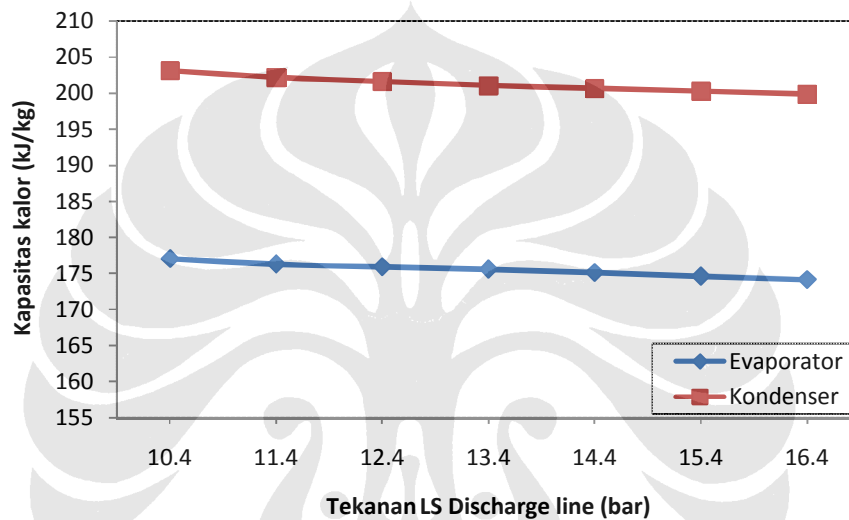
Gambar 5.16 Pengaruh perubahan tekanan *low-stage* terhadap tekanan pada *high-stage*

Grafik diatas menunjukkan peningkatan tekanan pada sistenm *high-stage* jika tekanan pada sistem *low-stage* bertambah. Hal tersebut terjadi karena temperatur pada *high-stage* naik jika tekanan pada *low-stage* meningkat. Peningkatan temperatur pada *high-stage* akan menyebabkan kenaikan tekanan pada sistem *high-stage*.



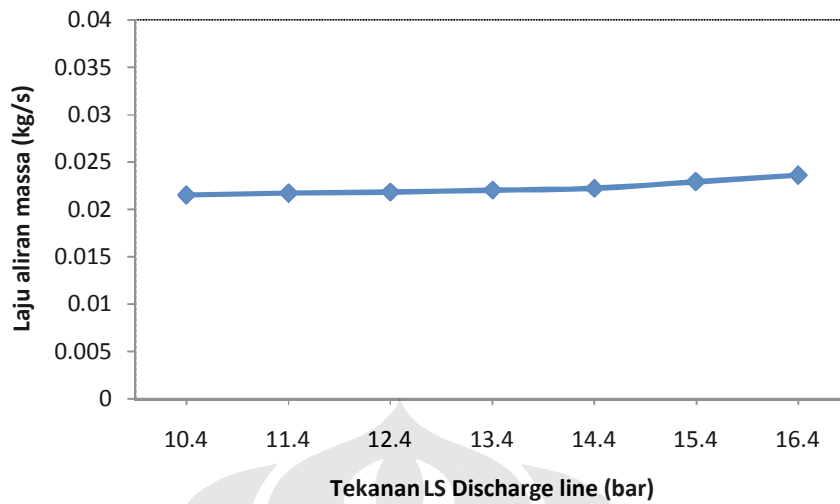
Gambar 5.17 Pengaruh perubahan tekanan *low-stage* terhadap entalpi pada *suction line*, *discharge line*, dan kondenser/evaporator pada *high-stage*

Grafik diatas menunjukkan adanya perubahan entalpi pada keempat titik pada sistem *high-stage* jika tekanan pada sistem *low-stage* dinaikkan. Hanya saja kenaikan entalpi tersebut sangat kecil. Pada dasarnya menaikkan tekanan akan membuat entalpi menjadi lebih kecil, namun yang terjadi justru sebaliknya, hal tersebut dapat terjadi karena peningkatan temperatur yang lebih tinggi dibandingkan kenaikan tekanan.



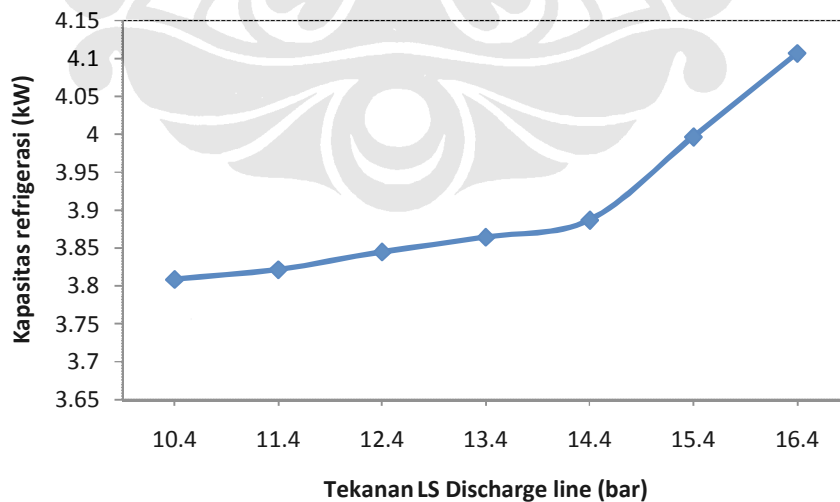
Gambar 5.18 Pengaruh perubahan tekanan *low-stage* terhadap kapasitas kalor pada *high-stage*

Grafik diatas menunjukkan bahwa peningkatan tekanan pada sistem *low-stage* akan cenderung mengurangi kapasitas kalor pada sistem *high-stage* meskipun sangat kecil. Hal tersebut terjadi karena adanya peningkatan tekanan yang menyebabkan jumlah kalor yang dibutuhkan untuk mengubah fase dari gas ke cair atau sebaliknya menjadi lebih sedikit.



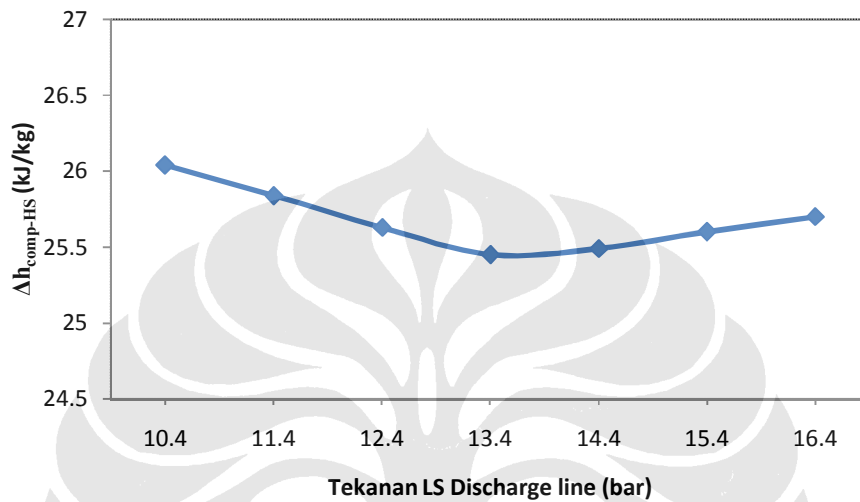
Gambar 5.19 Pengaruh perubahan tekanan *low-stage* terhadap laju aliran massa pada *high-stage*

Grafik diatas menunjukkan bahwa kenaikan tekanan pada sistem *low-stage* akan mengakibatkan meningkatnya laju aliran massa pada sistem *high-stage* meskipun kenaikannya sangat kecil. Hal tersebut terjadi karena adanya kenaikan tekanan pada sistem *high-stage*, meskipun jumlah massa refrigeran dalam sistem *high-stage* tidak bertambah.

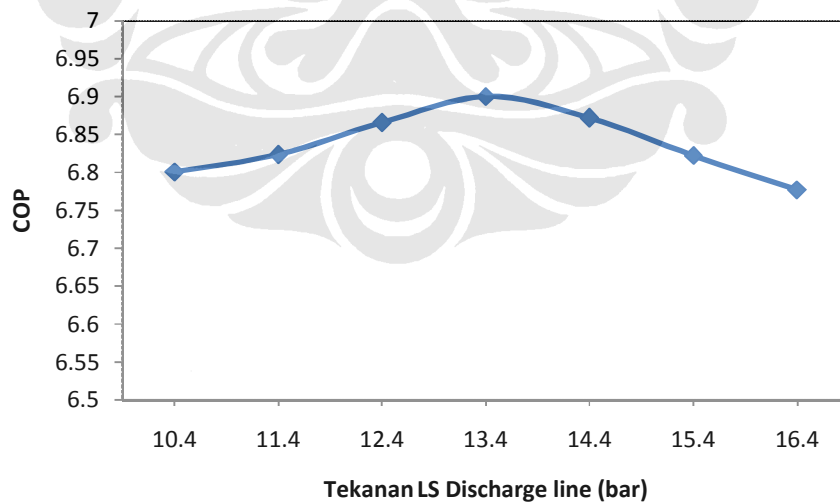


Gambar 5.20 Pengaruh perubahan *low-stage* terhadap kapasitas refrigerasi pada *high-stage*

Berdasarkan grafik diatas, ternyata menaikkan tekanan justru meningkatkan kapasitas refrigerasi. Hal tersebut terjadi karena adanya peningkatan dari laju aliran massa refrigeran yang lebih signifikan dibandingkan dengan penurunan kapasitas kalor evaporator.



Gambar 5.21 Pengaruh perubahan tekanan *low-stage* terhadap selisih entalpi kompresi pada *high-stage*

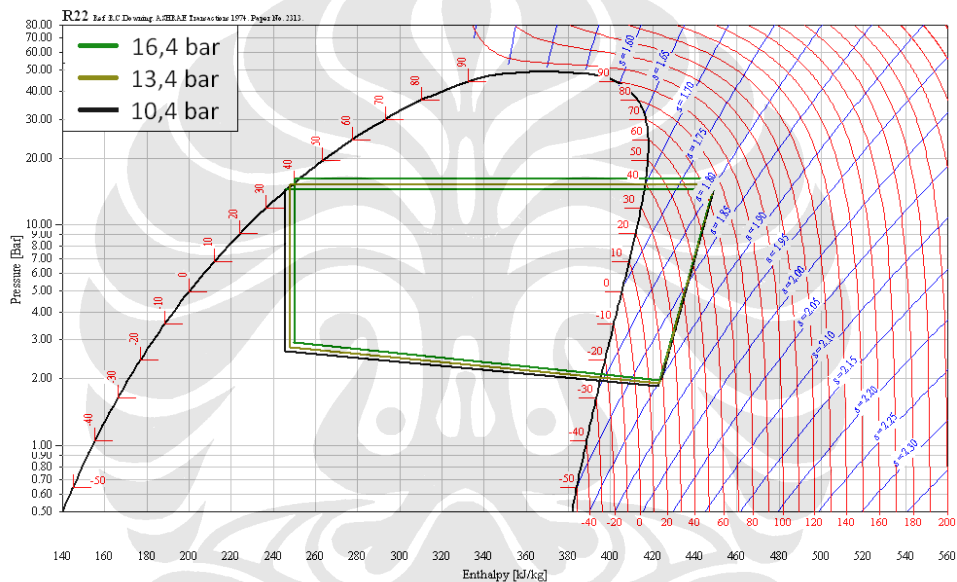


Gambar 5.22 Pengaruh perubahan tekanan *low-stage* terhadap COP pada *high-stage*



Gambar 5.21 diatas menunjukkan bahwa peningkatan tekanan pada sistem *low-stage* akan mengubah besarnya selisih entalpi kompresi. Dapat diketahui bahwa selisih entalpi kompresi pada sistem *high-stage* juga sensitif terhadap perubahan tekanan pada sistem *low-stage*.

Berdasarkan grafik pada gambar 5.22 diatas, peningkatan tekanan pada sistem *low-stage* akan menyebabkan perubahan pada COP pada sistem *high-stage*. Efek *losses* yang terjadi sepanjang sistem akibat *undercharged* dan *overcharged* pada sistem *low-stage* juga berdampak pada sistem *high-stage*.



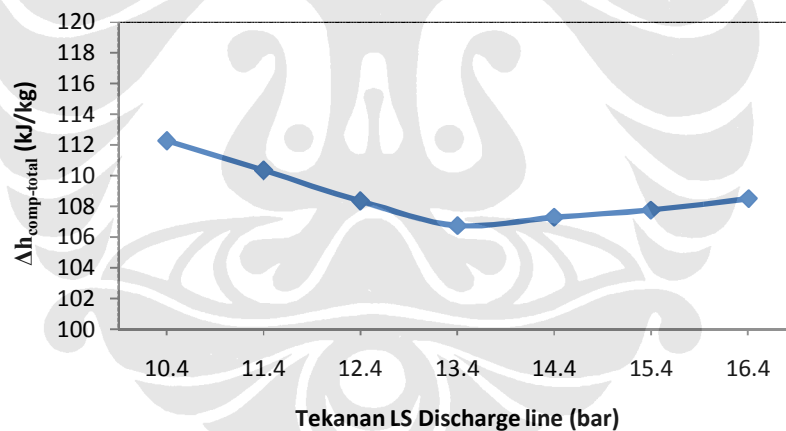
Gambar 5.23 Pengaruh perubahan tekanan *low-stage* terhadap diagram p-h sistem *high-stage*

Gambar diatas menunjukkan tren perubahan diagram siklus kompresi uap pada sistem *high-stage* dengan variasi tekanan pada *low-stage*. Perubahan tekanan *low-stage* akan menyebabkan perubahan temperatur dan tekanan pada sistem *high-stage* meskipun dampak yang ditimbulkan tidak sebesar pada sistem *low-stage*. Tren perubahannya sedikit berbeda dibandingkan pada sistem *low-stage*, meskipun dampak yang ditimbulkan menjadi sama. Penurunan entalpi pada titik *suction line* cenderung merata. Sementara penurunan entalpi pada titik *discharge line* dari tekanan *low-stage discharge line* 10,4 bar ke 13,4 bar lebih rendah

dibandingkan penurunan entalpi dari tekanan *low-stage discharge line* 13,4 bar ke 16,4 bar. Hal tersebut menyebabkan selisih entalpi pada saat tekanan *low-stage discharge line* 13,4 bar adalah yang paling rendah. Sementara dampak refrigerasi ( $Q_e$ ) pada saat tekanan *discharge line* 13,4 bar dengan 16,4 bar tidak jauh berbeda karena entalpi pada titik *suction line* dan akhir ekspansi yang tidak jauh berbeda. Kedua hal tersebut menyebabkan nilai COP sistem *high-stage* pada saat tekanan *low-stage discharge line* 13,4 bar menjadi paling tinggi.

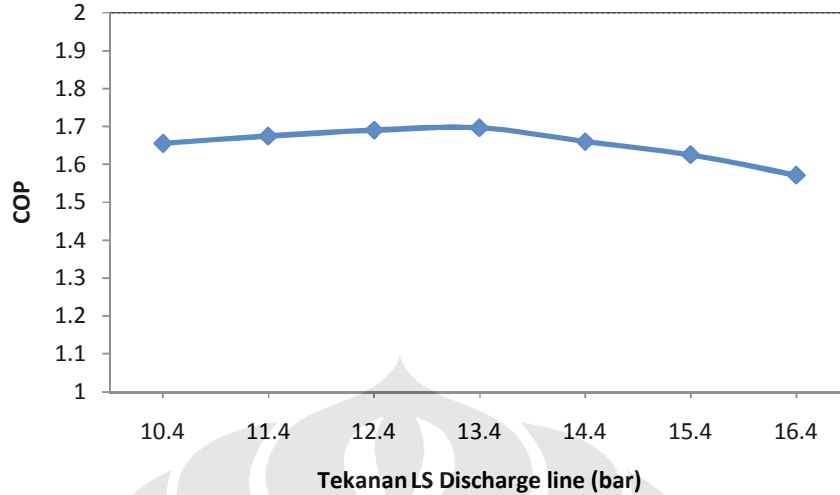
### 5.5 PENGARUH PERUBAHAN TEKANAN *LOW-STAGE* TERHADAP SISTEM *CASCADE*

Dari dua pembahasan diatas, diketahui bahwa perubahan tekanan pada satu sistem saja, yakni sistem *low-stage*, akan berdampak pada performa sistem *high-stage* dan *low-stage*. Hal tersebut tentunya ikut berdampak pada kinerja sistem secara keseluruhan.



Gambar 5.24 Pengaruh perubahan tekanan *low-stage* terhadap selisih entalpi kompresi pada sistem *cascade*

Berdasarkan gambar 5.24 diatas, peningkatan tekanan pada sistem *low-stage* mengakibatkan perubahan pada selisih entalpi kompresi. Tren perubahan selisih entalpi kompresi pada sistem keseluruhan sama seperti pada sistem *low-stage* dan *high-stage*, yaitu mengalami penurunan hingga tekanan 13,4 bar, kemudian naik lagi secara perlahan-lahan.



Gambar 5.25 Pengaruh perubahan tekanan *low-stage* terhadap COP sistem *cascade*

Sedangkan gambar 5.25 adalah grafik perubahan nilai COP sistem secara keseluruhan, yang menunjukkan bahwa kenaikan tekanan pada sistem *low-stage* menyebabkan nilai COP mengalami perubahan. Tren perubahan nilai COP pada sistem secara keseluruhan sama seperti pada sistem *high-stage* dan *low-stage*. Hal tersebut diakibatkan karena COP sistem merupakan fungsi berbanding terbalik dari selisih entalpi kompresi, yang berdasarkan hasil diatas menunjukkan penurunan yang dilanjutkan dengan kenaikan pada saat tekanan dinaikkan. Selisih entalpi kompresi terendah yang juga sekaligus COP tertinggi tercapai pada saat tekanan *low-stage discharge line* 13,4 bar.