

Rancang Bangun Sistem Alarm untuk Mencegah Kavitasi pada *Condensate Extraction Pump* di PT. Indonesia Power Unit Jasa Pembangkit (UJP) Jawa Tengah 2 Adipala

Agus Slamet*, Wahyu Djalmono, Yogi Prakasa, Farika Tono Putri
Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang
Jl. Prof. Sudarto, Tembalang, Kec. Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah
*E-mail: agusmg13@gmail.com

Received: 23-03-2020; Accepted: 16-04-2020; Published online: 23-04-2020

Abstrak

PT Indonesia Power Unit Jasa Pembangkit (UJP) Jawa Tengah 2 Adipala merupakan perusahaan yang bergerak dalam bidang pembangkitan energi listrik dengan daya uap. Untuk memenuhi kebutuhan produksi sebesar 1 x 660 MW, unit-unit pada PLTU ini bekerja secara kontinyu dan saling terhubung salah satunya yaitu *Condensate Extraction Pump* (CEP). Permasalahan yang ada yaitu bila terjadi kavitasi pada CEP ini sering terlambat untuk diketahui. Hal ini disebabkan karena tidak adanya sistem peringatan atau deteksi terjadinya kavitasi pada CEP. Mengingat dampak kavitasi yang sangat merugikan, mulai dari berkurangnya performa pompa hingga rusaknya komponen pompa, maka terjadinya kavitasi pada pompa ini harus dicegah. Tujuan dari penelitian ini adalah merancang sebuah sistem alarm untuk mencegah kavitasi. Perancangan suatu program alarm saat muncul potensi kavitasi pada pompa dengan konsep dasar menggunakan *Net Positive Suction Head required* (NPSHr) sebagai ambang batas diharapkan dapat mencegah terjadinya kerusakan pompa akibat kavitasi. Memanfaatkan nilai NPSHr untuk mencegah kavitasi merupakan metode yang berbeda bila dibandingkan dengan penelitian lain yang menggunakan sinyal getaran. Metode penelitian meliputi, identifikasi masalah, studi pustaka, analisis perancangan, pembuatan program dan pengujian. Program dibuat menggunakan aplikasi *Visual Basic*. Untuk memvalidasi program bekerja sesuai perencanaan dilakukan pengujian dengan memasukkan variasi parameter berupa temperatur air dan ketinggian air sesuai data aktual dengan *range* masing – masing yaitu 25°C hingga 60°C dan 300 mm-1300 mm. Tekanan dalam kondensor nilainya tetap -80 kPa atau 21.325 kPa dalam tekanan absolut. Head loss dalam instalasi perpipaan dihitung nilainya didapatkan 0.7196 m. Hasil pengujian program alarm mampu mengolah nilai NPSHa dan menampilkannya dalam bentuk grafik yang fluktuatif sesuai dengan tingkat keadaannya serta alarm berbunyi saat nilai *Net Positive Suction Head available* (NPSHa) dibawah nilai NPSHr atau pompa beroperasi dalam kondisi kavitasi.

Kata kunci: alarm; condensate extraction pump; kavitasi

Abstract

PT Indonesia Power is power plant located in Central Java Adipala engaged in electric plant utilizing steam power. To meet the production requirement of 1x660 MW, units at the PLTU work continuously and interconnected and one of them is *Condensate Extraction Pump* (CEP). Late detection of cavitation in CEP become a problem. The problem happen because lack of alarm system and cavitation detection in CEP. Given the damage of cavitation which range from pump performance reduction to pump component damage, therefore cavitation occurrence should be prevented. The aim of this research is to design an alarm system for cavitation prevention. Design of an alarm program when there are possibility of cavitation arise using *Net Positive Suction Head required* (NPSHr) as threshold to prevent pump damage due to cavitation. NPSHr value to prevent cavitation is a different method from other research which use vibration signal. Research method consist of problem identification, literature review, design analysis, program design and testing. Program is made using *Visual Basic*. Testing with actual parameter variation like water temperature value 25°C to 60°C and water level value 300 mm to 1300 mm is done to validate program design. Condensor pressure on steady value -80 kPa or 21.325 kPa on absolute pressure conversion. Calculated head loss in piping installation value 0.7196 m. Alarm testing result that it is capable to process and display NPSHa value in form of fluctuate graphic and alarm is activated when *Net Positive Suction Head available* (NPSHa) value below NPSHr or when cavitation occur.

Keywords: alarm; condensate extraction pump; cavitation

1. Pendahuluan

PT Indonesia Power UJP Jawa Tengah 2 Adipala merupakan perusahaan yang bergerak dalam bidang pembangkitan energi listrik yang memanfaatkan daya uap. Untuk menghasilkan energi listrik, unit-unit saling terhubung dan bekerjasama membentuk suatu sistem. Salah satu unit tersebut yaitu CEP. Kavitasi merupakan permasalahan yang sering

ditemui pada unit instalasi pompa CEP, seringkali kavitasi yang terjadi terlambat untuk dideteksi. Penyebab permasalahan tersebut karena tidak adanya sistem alarm sebagai peringatan dan deteksi dini adanya kavitasi di unit CEP PT Indonesia Power Adipala. Kasus kavitasi di PT Indonesia Power Adipala berdampak pada timbulnya suara bising dari pompa yang bekerja sampai dengan menurunnya unjuk kerja pompa. Apabila kavitasi dibiarkan terus menerus tanpa deteksi maka akan merusak bagian vital pada pompa terutama *impeller* pompa.

Kajian deteksi kavitasi telah banyak dilakukan dengan berbagai macam variasi metode antara lain dengan metode analisa getaran [1], metode spektrum getaran dan spektrum *envelope* menggunakan *fast fourier transform* (FFT) [2] dan metode kecerdasan buatan dengan teori *Principal Component Analysis*(PCA) dari ekstraksi domain waktu dan domain frekuensi getaran [3]. Metode lain yang dilakukan oleh peneliti luar negeri antara lain deteksi kavitasi dengan teori *Probability Density Analysis* (PDA), *Root Mean Square* (RMS) dan standar deviasi pada data getaran [4]. Penelitian lain menggabungkan analisa spektrum getaran dengan spektrum suara akustik untuk mendeteksi adanya kavitasi pada pompa dengan variasi kecepatan [5]. Gabungan metode kecerdasan buatan *wavelet packet decomposition* (WPD), PCA dan *Radial Basic Function* (RBF) untuk menganalisa sinyal gangguan pada pompa [6]. Sedangkan pada penelitian ini mendeteksi kavitasi pompa dengan metode perbandingan nilai NPSHa dan NPSHr pada sistem CEP kemudian hasil deteksi tersebut diterjemahkan ke dalam sistem alarm dengan basis *software* Visual Basic. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem *alarm* kavitasi pada unit CEP PT Indonesia Power Adipala. Metode pada penelitian ini sangat sederhana dan dapat dibuat dengan biaya yang sangat murah apabila dibandingkan dengan metode-metode deteksi kavitasi lain yang telah dijelaskan di atas sehingga mudah untuk diaplikasikan.

2. Material dan metodologi

Penelitian dilakukan di PT Indonesia Power Adipala pada unit CEP. CEP merupakan unit pompa yang berfungsi untuk menyalurkan air hasil kondensasi uap dalam kondensor menuju *deaerator*. Tabel 1 menunjukkan spesifikasi pompa yang ada di unit CEP PT Indonesia Power Adipala.

Tabel 1. Spesifikasi unit pompa CEP di PT Indonesia Power Adipala [7]

Data	Keterangan
<i>Pump Type</i>	<i>Vertical, multi stage, centrifugal</i>
<i>Pump Model</i>	C720III-4
<i>Quantity</i>	1823 t/h
<i>Pumping Head</i>	325m
<i>Efficiency</i>	84%
<i>Net Positive Suction Head Required at the Centerline of the first-stage Impeller (NPSHr)</i>	5.5 mH ₂ O
<i>Guarantee Value of Vibration at the Bearing Seat (Double-amplitude Value)</i>	0.05 mm (pada kondisi operasi normal)
<i>Rotating Speed</i>	1480r/min
<i>Pump Shaft Power</i>	1922 kW
<i>Manufature</i>	Hunan Xiangdian Changsha Water Pumps Co., Ltd.

Metode penelitian terdiri dari beberapa langkah antara lain identifikasi masalah, identifikasi solusi masalah, pengumpulan data-data penelitian dari lapangan dan karya ilmiah, analisa data perhitungan NPSHa dan *head loss*,

pembuatan program (desain *interface* dan *coding* program) serta pengujian yang terdiri dari pengujian program dan validasi nilai tekanan jenuh. Kavitasasi yang terlambat dideteksi pada unit CEP PT Indonesia Power Adipala adalah permasalahan yang telah diidentifikasi oleh peneliti. Dari permasalahan tersebut diperoleh solusi untuk membuat sistem *alarm* deteksi dini kavitasasi dengan menggunakan perbandingan nilai NPSHa dan NPSHr. Pengumpulan data dilakukan untuk analisa perhitungan yang diperlukan. Data dikumpulkan dengan metode studi lapangan untuk mengetahui instalasi perpipaan untuk menghitung *head loss mayor*, *head loss minor*, *head* absolut pada permukaan fluida, *head static suction*, tekanan uap jenuh dan NPSHr. Penelitian dilakukan dalam jangka waktu 8 bulan dari bulan Juni 2018 sampai dengan Febuari 2019. Pada timeline waktu tersebut data yang berhasil dikumpulkan antara lain tekanan pada kondensor dengan nilai 80 KPa pada *pressure gauge* atau 21.325 KPa absolut, temperatur air pada kondensor antara 25°C sampai dengan 60°C, ketinggian air pada kondensor berkisar antara 300 mm sampai dengan 1300 mm serta data instalasi perpipaan yang bisa dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi perpipaan unit pompa CEP di PT Indonesia Power Adipala

Pipa	Panjang (m)	Diameter (m)	Material
Pipa A-B, H-I	0.8	0.6	Carbon Steel
Pipa C-G	3.6	0.6	Carbon Steel
Pipa F-J	3.3	0.6	Carbon Steel
Pipa K-L	1.6	0.6	Carbon Steel
Pipa M-N	2.6	0.6	Carbon Steel
Pipa O-P	0.3	0.6	Carbon Steel
Pipa V-S	1.6	0.6	Carbon Steel
Pipa T-U, W-X	0.8	0.6	Carbon Steel

Selain panjang dan diameter pipa pada instalasi pipa dilengkapi juga dengan komponen-komponen lain seperti *elbow*, *pipe exit*, *gate valve*, *strainer* dan *tees*. Spesifikasi dan jumlah komponen tersebut dapat dilihat pada Tabel 3. Gambar 1 menunjukkan instalasi perpipaan dari outlet kondensor sampai dengan inlet CEP. Instalasi tersebut menggambarkan spesifikasi perpipaan pada data Tabel 2 dan Tabel 3.

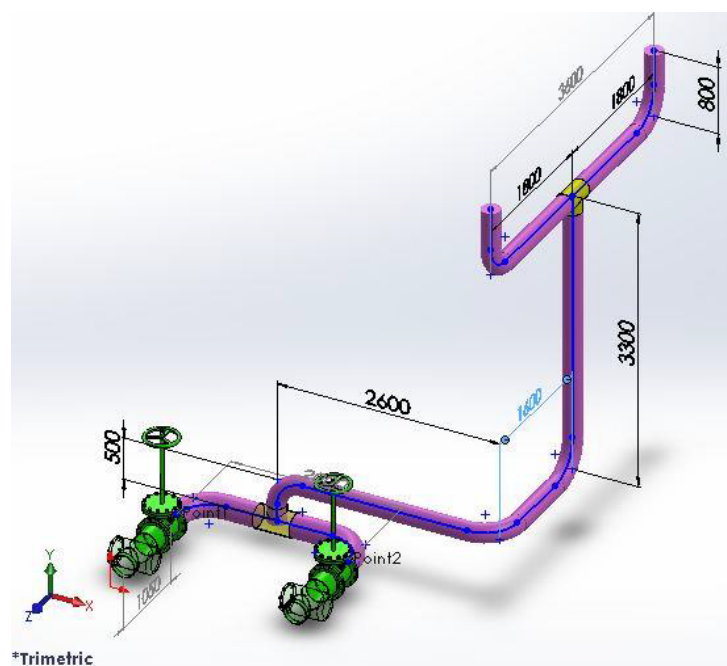
Tabel 3. Spesifikasi komponen perpipaan unit pompa CEP di PT Indonesia Power Adipala

Komponen	Jumlah	Minor Loss Coefficient (K _L)
Elbow 90 ⁰	7	0.9
Pipe Exit	2	1.0
Gate Valve Fully Open	1	0.2
Strainer	1	1.72
Tees	2	2.0

Data spesifikasi perpipaan tersebut dapat digunakan untuk menghitung nilai *head loss mayor* dan *head loss minor*. Nilai hasil perhitungan *head loss mayor* pada instalasi CEP PT Indonesia Power Adipala sebesar 0.0176 m sedangkan hasil perhitungan *head loss minor* sebesar 0.702 m. Nilai *head loss* total diperoleh dari penjumlahan antara *head loss mayor* dengan *head loss minor* dan diperoleh nilai sebesar 0.7196 m.

Data yang diperlukan untuk analisa NPSHa antara lain *head* absolut pada permukaan fluida (h_a), *head static suction* (h_s), *head loss total* (h_l) dan tekanan uap jenuh (h_{vap}). Berdasarkan data yang diperoleh nilai h_a dikonversikan dari tekanan rata-rata kondensor sebesar 80 KPa *pressure gauge* kedalam satuan meter yaitu sebesar 2.17 m. Nilai h_s diperoleh dari penjumlahan antara tinggi pipa CEP dengan level air rata-rata sehingga diperoleh nilai h_s sebesar 5.3 m. Tekanan uap jenuh berdasarkan temperatur kondensat di lapangan berkisar antara 25°C sampai 60°C didapatkan dari tabel air jenuh. Untuk temperatur kondensat 25°C besarnya tekanan jenuhnya 3.169 kPa atau dalam satuan *head* besarnya h_{vap} adalah 0,32 m. Data-data tersebut kemudian dimasukkan dalam persamaan (1) untuk menghitung nilai NPSHa [8]. Dari hasil perhitungan didapat nilai NPSHa unit CEP PT Indonesia Power Adipala sebesar 6.4303 m.

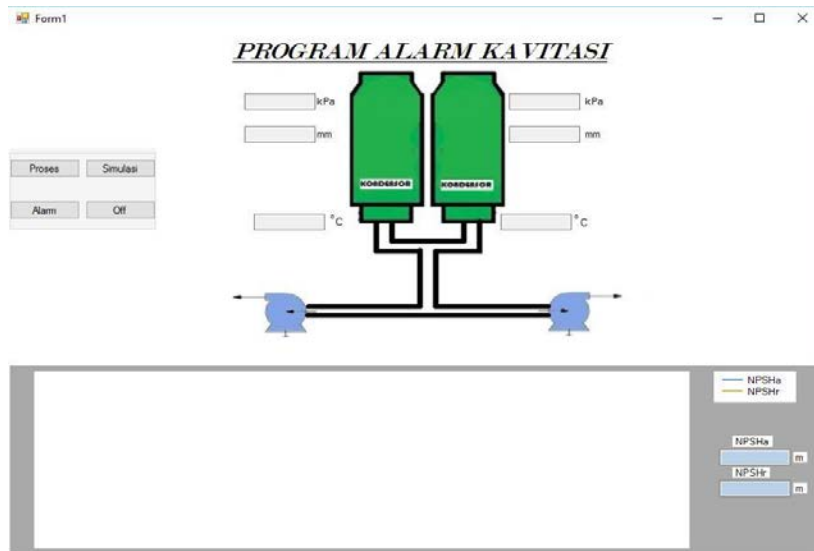
$$NPSHa = h_a + h_s - h_l - h_{vap} \quad (1)$$



Gambar 1. Ilustrasi spesifikasi perpipaan pada unit CEP PT Indonesia Power Adipala

Program sistem alarm disusun dengan menggunakan *software* Visual Basic. Program ini terdiri dari 1 *form* utama (*form* 1) dan 3 *form* pendukung (*form* 2, *form* 3 dan *form* 4) serta 2 *module* yaitu *module* untuk koneksi ke *database* dan *module* untuk simulasi program.

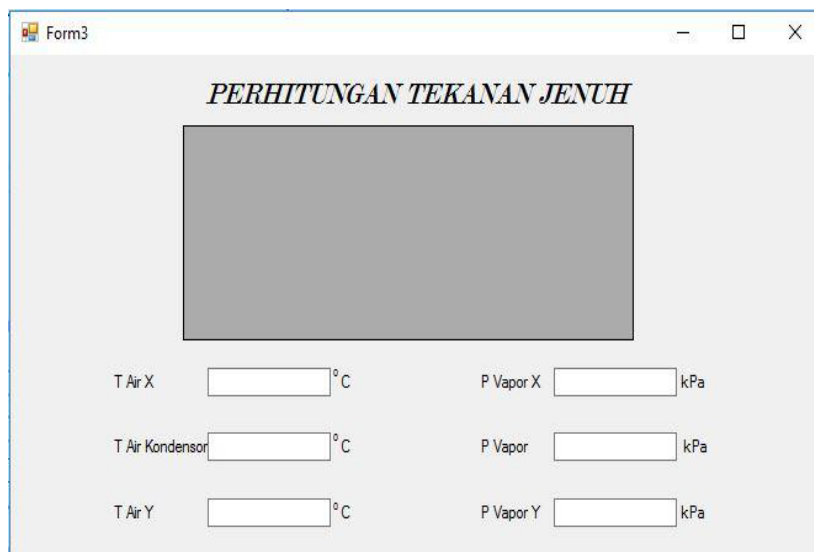
Gambar 2 menunjukkan *form* utama yang berfungsi sebagai muka dalam program alarm untuk mencegah kavitasi pada CEP yang dibuat. *Form* ini menampilkan data-data parameter (data pengukuran) untuk perhitungan NPSH secara *real time*. Selain itu *form* ini juga menampilkan grafik hasil perhitungan NPSH yang telah diolah pada *form* yang lain. *Form* 2 merupakan salah satu *form* pendukung yang memiliki fungsi menghitung nilai NPSH dapat dilihat pada Gambar 3. *Form* 3 yang memiliki fungsi untuk melakukan perhitungan nilai tekanan jenuh berdasarkan nilai temperatur air dan *form* 4 yang berfungsi untuk menghasilkan bunyi alarm apabila hasil perhitungan nilai NPSHa dari *Form* 2 dibawah NPSHr dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 2.Form utama sistem alarm kavitasi

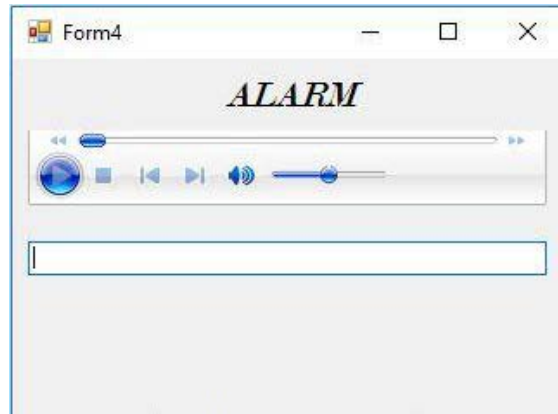


Gambar 3.Form pendukung 2 berfungsi untuk menghitung nilai NPSHa



Gambar 4.Form pendukung 3 berfungsi untuk perhitungan nilai tekanan jenuh

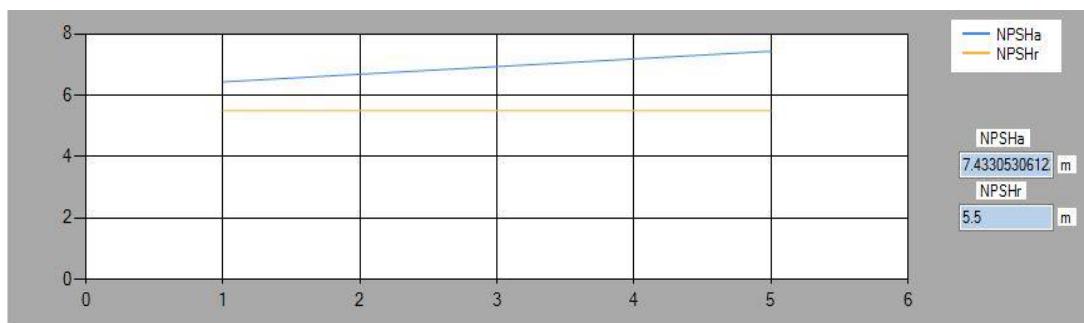
Pengujian pada sistem alarm dilakukan dengan memvariasikan parameter level air dan temperatur air. Level air berkisar antara 300 mm sampai dengan 1300 mm berdasarkan pengamatan di lapangan sedangkan temperatur air bervariasi antara 25°C sampai dengan 60°C. Variasi ketinggian air yang akan digunakan untuk pengujian yaitu 300 mm, 550 mm, 800 mm, 1050 mm dan 1300 m. Sedangkan variasi pada temperatur air 25⁰ C, 35⁰ C, 50⁰ C, dan 60⁰ C.



Gambar 5. Form pendukung 4 yang berfungsi untuk menampilkan alarm

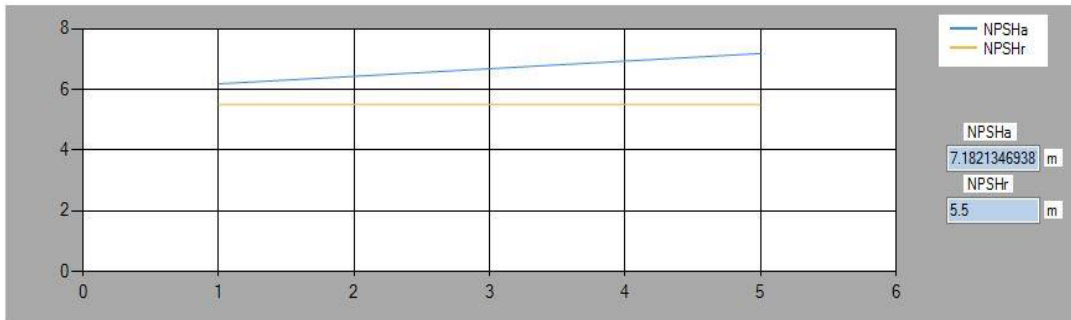
3. Hasil dan pembahasan

Kavitasi pada pompa disebabkan oleh nilai NPSHa kurang dari nilai NPSHr [9]. Nilai NPSHr pada unit CEP PT Indonesia Power Adipala sebesar 5.5 m. Data hasil pengujian pada temperatur kondensat 25⁰C dengan variasi level air 300 mm, 550 mm, 800 mm, 1050 mm dan 1300 mm dalam program sistem alarm kavitas menghasilkan tampilan grafik seperti pada Gambar 6.



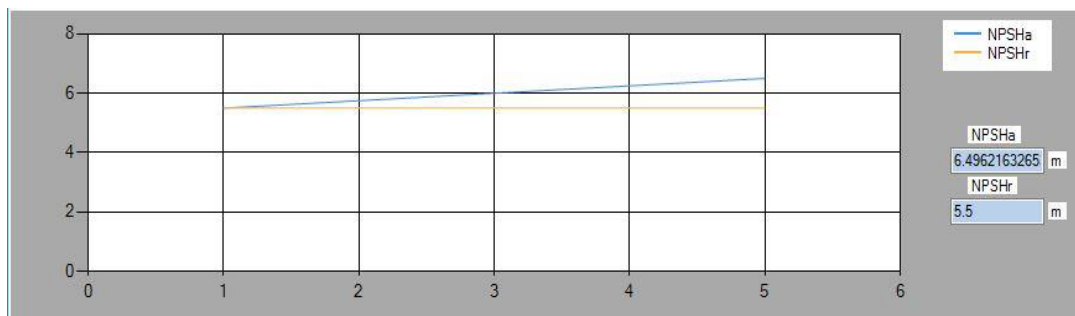
Gambar 6. Tampilan Grafik Hasil Pengujian Pada Temperatur Kondensat 25⁰ C

Dari grafik tersebut dapat dibaca bahwa kenaikan level air maka nilai NPSHa juga naik. Pada temperature kondensat 250C dengan level air 300 mm hingga 1300 mm nilai NPSHa berada diatas nilai NPSHr yaitu 5,5 m dan alarm tidak berbunyi, ini menunjukkan bahwa pada tingkat keadaan tersebut *Condensate Extraction Pump* beroperasi dengan normal tidak berpotensi terjadinya kavitasi. Data hasil pengujian pada temperatur kondensat 35⁰C dengan variasi level air 300 mm, 550 mm, 800 mm, 1050 mm dan 1300 mm dalam program sistem alarm kavitas menghasilkan tampilan grafik seperti pada Gambar 7.



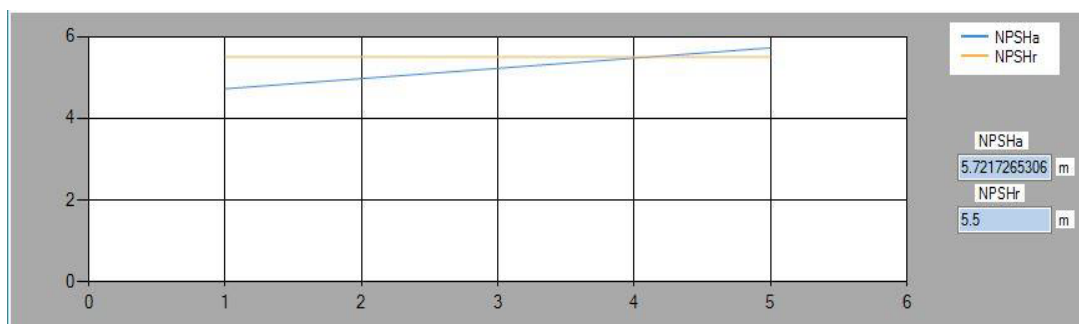
Gambar 7.Tampilan Grafik Hasil Pengujian Pada Temperatur Kondensat 35⁰ C

Kenaikan temperatur kondensat menjadi 35⁰ C, dari grafik tersebut juga dapat dibaca bahwa kenaikan level air maka nilai NPSHa juga naik. Pada level air 300 mm hingga 1300 mm nilai NPSHa juga berada diatas nilai NPSHr yaitu 5,5 m dan alarm tidak berbunyi. Data hasil pengujian pada temperatur kondensat 50⁰C dengan variasi level air 300 mm, 550 mm, 800 mm, 1050 mm dan 1300 mm dalam program sistem alarm kavitas menghasilkan tampilan grafik seperti pada Gambar 8.



Gambar 8.Tampilan Grafik Hasil Pengujian Pada Temperatur Kondensat 50⁰ C

Dari grafik tersebut juga dapat dibaca bahwa kenaikan level air maka nilai NPSHa juga naik pada temperatur kondensat menjadi 50⁰ C, kecuali saat level air 300 mm nilai NPSHa di temperature 50⁰C ini dibawah nilai NPSHr sebesar 5,5 m. Pada tingkat keadaan tersebut alarm berbunyi menunjukkan bahwa *Condensate Extraction Pump* beroperasi dalam kondisi kavitasi. NPSHa nilainya diatas NPSHr saat level air 550 mm, 800 mm, 1050 mm dan 1300 mm sehingga CEP beroperasi dalam kondisi normal dan alarm berhenti berbunyi. Data hasil pengujian pada temperatur kondensat 60⁰C dengan variasi level air 300 mm, 550 mm, 800 mm, 1050 mm dan 1300 mm dalam program sistem alarm kavitas menghasilkan tampilan grafik seperti pada Gambar 9.



Gambar 9. Tampilan Grafik Hasil Pengujian Pada Temperatur Kondensat 60⁰ C

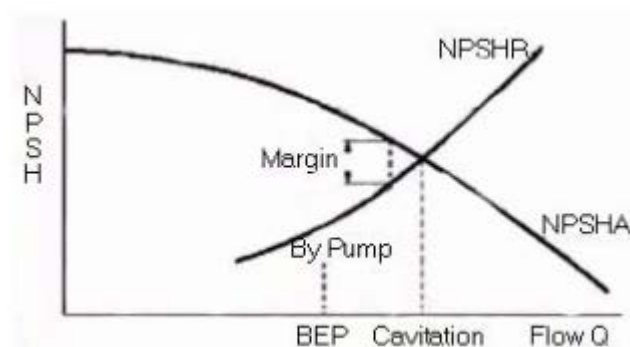
Pada grafik temperatur kondensat 60°C terlihat bahwa pada saat level air 300 mm sampai 1050 mm nilai NPSHa berada di bawah nilai NPSHr yaitu 5.5 m dan alarm berbunyi. Data ini menunjukkan bahwa pada temperatur 60°C *Condensate Extraction Pump* beroperasi dalam kondisi kavitas, kecuali pada saat level air pada posisi 1300 mm pompa beroperasi dalam kondisi normal. Hasil pengujian simulasi dengan memasukkan data meliputi tekanan dalam kondensor sebesar - 80 KPa pada *pressure gauge* atau 21.325 KPa absolut, level air kondensat dari 300 mm sampai 1300 mm , temperature air kondensat dari 25°C sampai 60°C dan pada setiap tingkat keadaan dikondisikan sebagai fungsi waktu, dalam program sistem alarm kavitas menghasilkan tampilan grafik seperti pada Gambar 10.



Gambar 10. Tampilan Grafik Hasil Pengujian Simulasi Pada Temperatur Kondensat 25°C sampai 60°C

Berdasarkan simulasi pada program sistem alarm kavitas dengan menggunakan data seperti tersebut di atas dengan interval waktu 1 detik didapatkan hasil grafik fluktuasi nilai NPSHa seperti pada Gambar 10. Program mampu mengolah data parameter – parameter perhitungan pada tingkat keadaan yang bervariasi untuk perhitungan NPSHa. Nilai NPSHa yang dihasilkan ditampilkan dalam bentuk nominal juga dalam bentuk grafik untuk membandingkan dengan NPSHr *Condensate Extraction Pump*. Perubahan tingkat keadaan mempengaruhi perubahan nilai NPSHa bergantung besarnya perubahan nilai pada masing – masing parameter. Pada saat nilai NPSHa turun hingga dibawah nilai NPSHr program mampu membunyikan alarm yang baru akan berhenti saat nilai NPSHa-nya berada diatas nilai NPSHr. Bunyi alarm ini menandakan bahwa pada tingkat keadaan tersebut *Condensate Extraction Pump* beroperasi dalam kondisi kavitas.

Gambar 11 menunjukkan hasil perhitungan NPSHa dan NPSHr pada penelitian yang dilakukan oleh penelitian lain. Gambar 11 menunjukkan karakter NPSH dimana mewakili perbedaan antara suction head dengan tekanan uap pada suhu yang diberikan. Nilai NPSHr tergantung dari jenis pompa yang digunakan, desain pompa dan diperoleh dari uji pompa sentrifugal [10].



Gambar 11. Grafik karakteristik NPSHa dan NPSHr [10]

4. Kesimpulan

Kesimpulan dapat diambil dari hasil penelitian di atas model program alarm pendeteksi kavitasi pada *Condensate Extraction Pump* dibuat menggunakan aplikasi *Visual Basic* berfungsi sesuai dengan yang direncanakan. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diperoleh hasil yang dapat dilihat pada Tabel 4. Tabel 4 menjelaskan tentang hasil pengujian *alarm* yang telah dipasang. Semakin tinggi nilai temperatur kondensat maka nilai NPSHa akan semakin berkurang.

Tabel 4. Hasil Pengujian Sistem *Alarm*

Temperatur	NPSHa (m)	NPSHr (m)	Kesimpulan
25 ⁰ C	7.4	5.5	Tidak terjadi kavitasi
35 ⁰ C	7.2	5.5	Tidak terjadi kavitasi
50 ⁰ C	6.5	5.5	Tidak terjadi kavitasi
60 ⁰ C	5.7	5.5	Tidak terjadi kavitasi

Program mampu mempresentasikan nilai NPSHa sistem di setiap perubahan tingkat keadaan dalam bentuk nominal dan grafik. Alarm pada program mampu berbunyi saat nilai NPSHa dibawah nilai NPSHr yang menandakan bahwa pada tingkat keadaan tersebut *Condensate Extraction Pum* beroperasi dalam kondisi kavitasi.

Daftar Pustaka

- [1] Anta, F., Widodo, A. dan Fajar, B. Deteksi kavitasi pompa sentrifugal dengan Analisi Sinyal Getaran. Indonesia: Universita Diponegoro; 2013. p. 5-6.
- [2] Kamiel, Berli P., Nafsaka, Deby A., Riyanta, B. dan A., Azhim. Deteksi Kavitasi Pada Pompa Sentrifugal Menggunakan Spektrum Getaran dan Spektrum Envelope. *Semesta Teknika*. 2019 Mei; 22(01): p. 1-2.
- [3] Kamiel, Berli P., P., Niko dan Riyanta, B. Ekstraksi Parameter Statistik Domain Waktu dan Domain Frekuensi untuk Mendeteksi Kavitasi pada Pompa Sentrifugal Berbasis *Principal Component Analysis* (PCA). *Rekayasa Mesin*. 2019. 10(02): p. 165-166.
- [4] Al Hasmi, Salem A., R. El-Hesnawi, Mohammed and A. Ball. Processing Vibration Signals For Cavitation Detection. *Journal of Sebaa University--(Pure and Apllied Sciences)*. 2017. 6(02): p.1-2.
- [5] Kotb, Ashraf and Abdulaziz, A.M. Cavitation Detection in Variable Speed Pump by Analyzing the Acoustic and Vibration Spectrums. *Engineering*. 2015 October. 7(10): p. 706-716.
- [6] Dong, L., Wu, K., Zhu, JC., et.al. Cavitation Detection in Centrifugal Pump Based on Interior Flow-Borne Noise Using WPD-PCA-RBF. *Shock and Vibration*. 2019 Mei. p. 1-12.
- [7] PT Indonesia Power Adipala. Datasheet Unit Condensate Extraction Pump (CEP). 2018.
- [8] Gillain & Co. Alfa Laval Pump Handbook Second Edition. Belgium: Boomsesteenweg; 2002. p 157.
- [9] Schiavello, B and Visser, F. C. *Pump Cavitation – Various NPSHR Criteria, NPSHA Margins, and Impeller Life Expectancy*. Proceedings of The Twenty Fifth International Pump Users Symposium; 22 April 2008; New Jersey, United States. Semantic scholar; 2009.
- [10] Al Hasiefni, S. A., et al. *Cavitation Detection Of A Centrifugal Pump Using Instantaneous Angular Speed*. Proceeding of 7th Biennial ASME conference on Engineering Systems Design and Analysis. 2004.