Studi Karakteristik Volume Tabung Udara dan Beban Katup Limbah Terhadap Efisiensi Pompa *Hydraulic Ram*

Gan Shu San
Dosen Fakultas Teknologi Industri Jurusan Teknik Mesin – Universitas Kristen Petra

Gunawan Santoso
Alumnus Fakultas Teknologi Industri Jurusan Teknik Mesin – Universitas Kristen Petra

Abstrak

Pada masyarakat yang bertempat tinggal jauh dari jangkauan sumber energi listrik terdapat kendala untuk memindahkan air dari tempat rendah ke tempat yang lebih tinggi. Salah satu cara yang dapat digunakan adalah dengan pompa *hydraulic ram* yang energi atau tenaga penggeraknya berasal dari tekanan atau hantaman air yang masuk ke dalam pompa melalui pipa.

Pada makalah ini ingin diketahui pengaruh faktor volume tabung udara dan beban katup limbah pompa hydram terhadap efisiensi serta menentukan pengaturan yang paling optimal untuk mendapatkan efisiensi terbaik.

Dari hasil percobaan dan analisa varians serta regresi *response surface* diperoleh hasil bahwa faktor volume tabung udara dan beban katup limbah berpengaruh pada efisiensi pompa, begitu pula interaksi antara kedua faktor. Pengaturan optimal untuk mendapatkan efisiensi terbaik adalah saat volume tabung 1300 ml dan beban 400 gram untuk mendapatkan efisiensi 42,9209%.

Kata kunci: Pompa *hydraulic ram*, efisiensi, metode r*esponse surface.*

Abstract

A community that live far away from electricity power source has a problem in moving water from low to a higher location. One option for solving this problem is using hydraulic ram whose energy is the pressure that resulted from water hammer of water that flows into the pump through pipes.

In this paper, a study on the effects of air-tube volume and disposal valve weight to the pump efficiency will be conducted and further the optimal setting for those factors that will gain the best efficiency will be determined..

After the experiments and analysis of variance and also response surface regression, resulting that both factors, air-tube volume and disposal valve weight, influence the efficiency as well as interaction between them. The optimal setting for best efficiecy is at 1300 ml tube volume and 400 gram weight to get efficiency of 42.9209%.

Keywords: Hydraulic ram pump, efficiency, response surface method.

1. Pendahuluan

Salah satu upaya untuk memenuhi kebutuhan air di lokasi yang posisinya lebih tinggi dari sumber air adalah dengan menggunakan pompa air. Jenis pompa air yang lazim digunakan adalah saat ini adalah pompa air bertenaga motor listrik, yang tentunya untuk daerah-daerah pedesaan atau di daerah terpencil yang tidak ada sumber listrik akan timbul banyak masalah.

Catatan : Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Februari 2003. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Mesin Volume 5 Nomor 1 April 2003.

Untuk mengatasi hal ini, diperlukan pompa air yang tidak menggunakan motor, sehingga tidak memerlukan listrik. Salah satu pilihan adalah pompa *hydraulic ram* (hydram), yaitu pompa yang energi atau tenaga penggeraknya berasal dari tekanan atau hantaman air yang masuk ke dalam pompa melalui pipa.

Pada studi literatur yang telah dilakukan, diketahui bahwa faktor yang mempengaruhi efisiensi pompa hydram adalah kapasitas pompa yang dihasilkan, kapasitas yang terbuang serta perbandingan *head* hantar dan *head* suplai. Namun dalam pengoperasian pompa hydram sering dijumpai kejadian bahwa katup limbah tidak mau bekerja dengan baik,

yang disebabkan oleh beban katup terlalu ringan maupun terlalu berat. Disamping itu, dalam mekanisme kerja pompa hydram terjadi proses perubahan energi kinetik menjadi tekanan dinamis di dalam tabung udara yang berfungsi sebagai penguat tekanan, sehingga mampu mengangkat air dalam pipa *discharge.* Dari pemikian ini diduga bahwa faktor beban katup limbah dan volume tabung udara berpengaruh terhadap efisiensi pompa hydram.

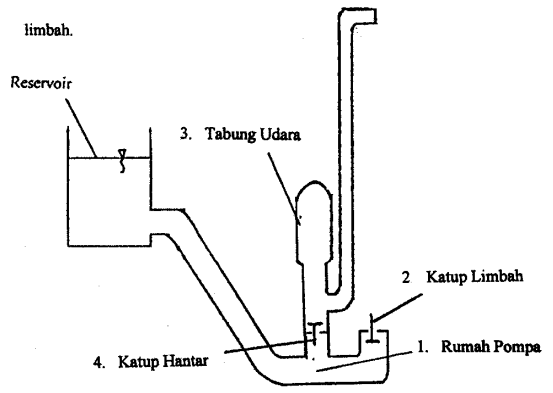
Untuk dapat mengetahui pengaruh faktor-faktor tersebut maka dilakukan percobaan dengan variable volume tabung udara dan beban katup limbah. Lebih jauh lagi dilakukan analisa *response surface* untuk mengetahui pengaturan optimal untuk menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi.

Percobaan ini dilakukan dengan batasan fluida yang digunakan adalah air dan sirkulasi menggunakan pompa Wooley 175A dengan kapasitas 86 liter/menit, sedangkan instalasi pompa hydram dibuat tidak lebih dari 3 m disesuaikan dengan kapasitas ruang laboratorium tempat dilakukannya percobaan ini. Perbandingan *head* hantar dan *head* suplai tidak divariasikan.

2. Teori Pompa *hydraulic ram*

Pompa *Hydraulic ram* (hydram) digunakan untuk memindahkan fluida dari tempat tinggi ke tempat yang lebih tinggi. Mekanisme kerja pompa hydram adalah melipat-gandakan kekuatan pukulan air pada tabung udara, dimana terjadi perubahan energi kinetik air menjadi tekanan dinamik yang menimbulkan *water hammer.* Tekanan dinamik akan diteruskan ke dalam tabung udara yang berfungsi sebagai penguat. Akan tetapi kerja pompa ini tidak dapat memompa semua air yang masuk. Jadi sebagian air terpompa dan sebagian dibuang melalui katup limbah.

Bagan pompa hydram dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Bagan Rumah Pompa

Bagian-bagian pompa hydram adalah sebagai berikut :

1. Rumah pompa
   Merupakan ruang utama tempat terjadinya proses pemompaan
2. Katup Limbah
   Merupakan tempat keluarnya air yang berfungsi memancing gerakan air yang berasal dari *reservour*, sehingga dapat menimbulkan aliran air yang bekerja sebagai sumber tenaga pompa.
3. Tabung Udara
   Tabung ini berfungsi untuk memperkuat tekanan dinamik.
4. Katup Hantar
   Katup yang menghantarkan air dari rumah pompa ke tabung udara, serta menahan air yang telah masuk agar tidak kembali masuk ke rumah pompa.

Cara kerja pompa hydram adalah dimulai dari air yang turun dari *reservoir* melalui pipa dengan kecepatan tertentu masuk ke rumah pompa. Karena katup limbah yang berada dalam pompa awalnya terbuka, maka gerakan air dari *reservoir* tadi akan terpancing untuk melalui katup limbah. Dengan air dari *reservoir* yang mengalir terus menerus, maka tekanan dalam rumah pompa akan meningkat, sehingga katup limbah akan tertutup. Hal ini akan menyebabkan katup hantar terbuka akibat dari tekanan air di rumah pompa sehingga air akan naik melalui pipa hantar. Selanjutnya, air yang bertekanan ini akan menekan udara dalam tabung udara. Karena udara bersifat *compressible* maka volume udara akan mengecil akibat tekanan air. Pada saat aliran dari rumah pompa sudah mengecil maka udara akan menekan air ke pipa *discharge* dan juga akan menekan katup hantar sehingga tertutup. Karena berat katup limbah, maka katup limbah akan terbuka sehingga air mengalir melalui katup limbah. Pompa hydram tidak menggunakan sumber energi dari luar untuk bekerja, tetapi pompa ini menggunakan pukulan atau hantaman air itu sendiri sebagai tenaga penggeraknya. Karena itu, masuknya air ke dalam ruang pompa harus secara kontinyu.

Dalam menentukan efisiensi pompa hydram digunakan rumus *D'Aubuisson*

$$\eta_D = \frac{Q_d H_d}{(Q_d + Q_b) H_s} \cdot 100\%$$

dimana:

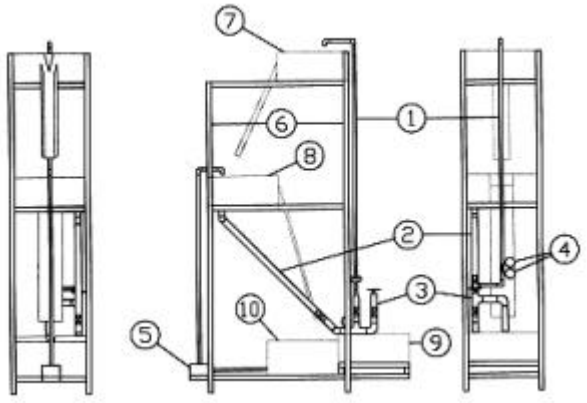
η_D = efisiensi *D'Aubuisson* dari pompa (%)

Q_d = kapasitas pompa yang dihasilkan tiap siklus (m^3/detik)

Q_b = kapasitas yang terbuang tiap siklus (m^3/detik)
H_d = *head* hantar (m)
H_s = *head* suplai (m)

3. Perancangan Instalasi Pompa untuk Percobaan

Gambar sistem instalasi pompa hydram untuk percobaan ini dapat dilihat di gambar 2.



Keterangan:
1. Pipa PVC 1”
2. Pipa PVC 2”
3. Pompa hydram
4. *Pressure Gauge*
5. Pompa Wooley 175 A
6. Kerangka
7. Bak *discharge*
8. *Reservoir*
9. Bak buangan
10. Bak sirkulasi

Gambar 2. Instalasi Pompa Hydram Untuk Percobaan

3.1 Sistem siklus pompa hydram

Pada pompa hydram, air masuk (*suction*) berasal dari *reservoir* yang permukaannya tidak berubah, oleh karena itu direncanakan sebuah bak yang bila diisi dapat membuang air sehingga menjaga permukaan tetap stabil. Bak tersebut dinamakan bak *reservoir*. Dari bak *reservoir* air disalurkan melalui pipa menuju pompa hydram yang letaknya lebih rendah. Dalam proses pemompaan oleh pompa hydram terbagi dua aliran. Aliran yang berguna adalah aliran air yang dipompa oleh pompa hydram dan ditampung dalam sebuah bak untuk diukur debitnya. Bak yang menampung air *discharge* disebut bak *discharge.* Sedangkan aliran air yang lainnya tidak dapat terpompa, sehingga ditampung di bak limbah untuk dikur juga debitnya. Karena air yang dipompa mempunyai letak yang paling tinggi, maka letak bak *discharge* di paling atas, kemudian bak *reservoir* di tengah dan bak limbah paling bawah. Supaya aliran air dapat berputar sehingga terbentuk siklus, maka air dari bak *discharge*, bak *reservoir*, dan bak limbah ditampung pada sebuah bak sirkulasi. Karena letak bak *discharge* dan bak *reservoir* dekat dan air yang melimpah dari *reservoir* tidak dihitung debitnya, maka air dari bak *discharge* diperbolehkan jatuh ke *reservoir*. Sedangkan air dari *reservoir* tidak boleh jatuh ke bak limbah, karena bak limbah digunakan untuk mengukur aliran buang dari pompa hydram. Jadi, air dari *reservoir* dan air dari bak limbah masuk ke bak sirkulasi untuk dipompa kembali ke *reservoir* oleh pompa sirkulasi.

3.2 Dimensi sistem

Perbandingan ketinggian antara *head* hantar dan *head* suplai dipilih sebesar 2. *Head* hantar (H_d) adalah ketinggian air yang keluar dari pipa *discharge* dan *head* suplai (H_s) adalah ketinggian permukaan air *reservoir* yang mensuplai pompa hydram.

3.3 Pemilihan Alat Ukur

Alat ukur tekanan yang digunakan adalah manometer dengan skala paling kecil, yaitu 0-2,5 kg/cm^2 karena pompa hydram hanya memanfaatkan energi air jatuh.

Sedangkan untuk alat ukur debit, karena pompa hydram tidak menggunakan tenaga dari luar, maka debit yang dihasilkan sangat kecil dan tekanan kerjanya sangat rendah. Pada waktu pompa hydram bekerja tidak dapat diketahui kecepatan aliran air di dalam rumah pompa, sehingga tidak dapat diketahui bilangan Reynold-nya. Berdasarkan dua alasan diatas, maka alat ukur debit yang dapat digunakan adalah *V-Notch Sharp Crested Weir* yang dilakukan dengan mengukur ketinggian air yang keluar melalui *V-Notch*.

4. Percobaan dan analisa

Percobaan ini dilakukan dengan memvariasikan volume tabung udara dan beban katup limbah pada pengoperasian pompa hydram kemudian mengambil data ketinggian bak *discharge* (h_d) dan data ketinggian bak limbah (h_b). Data ini akan dipakai untuk menghitung kapasitas pompa yang dihasilkan tiap siklus, Q_d (m^3/detik), dan kapasitas pompa yang terbuang tiap siklus, Q_b (m^3/detik), sehingga dapat dihitung efisiensi pompa, ς_D (%).

4.1 Prosedur dan hasil percobaan

Persiapan :
- Mengisi bak *discharge*, bak limbah, dan bak sirkulasi

- Memeriksa pompa sirkulasi (Wooley 175A) sehingga siap dioperasikan
- Mengisi bak *reservoir* dengan menjalankan pompa sirkulasi
- Memasang tabung udara yang akan diukur pada pompa hydram
- Meletakkan beban pada katub limbah (beban awal katup : 50 gram)

Percobaan

- Membuka *gate valve discharge & suction* supaya air masuk pada pompa hydram
- Menunggu sampai air yang keluar dari pipa *discharge* steady
- Mengambil data ketinggian (h_d) pada bak *discharge* dan ketinggian pada bak limbah (h_b) sebanyak 3 kali untuk tiap selang waktu 3 menit.
- Memberi beban tambahan pada katub limbah sesuai yang diperlukan
- Menutup *gate valve discharge & suction*
- Mengganti tabung udara untuk variasi volume.
- Mengulangi kembali prosedur diatas sampai semua data percobaan diperoleh.

Tabel 1. Data Percobaan dan Perhitungan

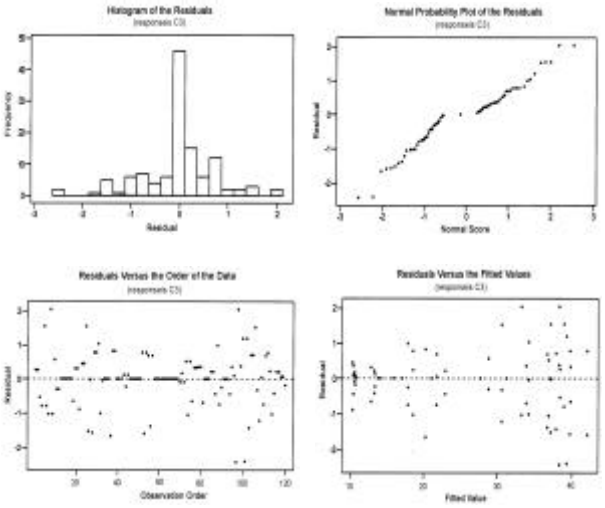
Data Percobaan					Perhitungan		
Data ke	A(beban) gram	B(volume) ml	hd cm	hb cm	Qd ltr/menit	Qb ltr/menit	Eff.D'Abuisson %
1	200	800	2.5	4.6	2.58783	10.78308	38.70834905
2	200	800	2.5	4.6	2.58783	10.78308	38.70834905
3	200	800	2.5	4.65	2.58783	11.06444	37.91062701
4	400	800	3.1	5.7	4.25386	18.01339	38.2073271
5	400	800	3.2	5.7	4.580648	18.01339	40.54741038
6	400	800	3.1	5.7	4.25386	18.01339	38.2073271
7	600	800	3.2	6.4	4.580648	23.81119	32.26735575
8	600	800	3.3	6.3	4.922053	22.9232	35.35290789
9	600	800	3.2	6.4	4.580648	23.81119	32.26735575
10	800	800	3.3	6.9	4.922053	28.55907	29.40195818
11	800	800	3.3	7	4.922053	29.57129	28.53915111
12	800	800	3.3	7	4.922053	29.57129	28.53915111
13	1000	800	3.1	7.6	4.25386	36.0954	21.08519106
14	1000	800	3.1	7.6	4.25386	36.0954	21.08519106
15	1000	800	3.1	7.6	4.25386	36.0954	21.08519106
16	1200	800	3	8.1	3.941474	42.13827	17.10718919
17	1200	800	3	8.1	3.941474	42.13827	17.10718919
18	1200	800	3	8.1	3.941474	42.13827	17.10718919
19	1400	800	2.8	8.8	3.359035	51.55891	12.23292312
20	1400	800	2.9	8.8	3.643273	51.55891	13.1997424
21	1400	800	2.9	8.8	3.643273	51.55891	13.1997424
22	1600	800	2.7	9.5	3.088535	62.14179	9.469629512
23	1600	800	2.9	9.6	3.643273	63.75111	10.81180078
24	1600	800	2.9	9.6	3.643273	63.75111	10.81180078
25	200	1050	2.5	4.6	2.58783	10.78308	38.70834905
26	200	1050	2.5	4.8	2.58783	11.93474	35.63873077
27	200	1050	2.5	4.7	2.58783	11.35015	37.13350315
28	400	1050	3.1	5.7	4.25386	18.01339	38.2073271
29	400	1050	3.2	5.7	4.580648	18.01339	40.54741038
30	400	1050	3.2	5.7	4.580648	18.01339	40.54741038
31	600	1050	3.3	6.3	4.922053	22.9232	35.35290789
32	600	1050	3.2	6.3	4.580648	22.9232	33.30914231
33	600	1050	3.3	6.4	4.922053	23.81119	34.26033783
34	800	1050	3.4	6.9	5.278288	28.55907	31.19798803
35	800	1050	3.4	6.9	5.278288	28.55907	31.19798803
36	800	1050	3.4	6.9	5.278288	28.55907	31.19798803
37	1000	1050	3	7.8	3.941474	38.4453	18.59765949
38	1000	1050	3.1	7.6	4.25386	36.0954	21.08519106
39	1000	1050	3.1	7.6	4.25386	36.0954	21.08519106
40	1200	1050	2.9	8.1	3.643273	42.13827	15.91590494
41	1200	1050	2.9	8.1	3.643273	42.13827	15.91590494
42	1200	1050	2.9	8.1	3.643273	42.13827	15.91590494
43	1400	1050	2.9	8.7	3.643273	50.143	13.54722251
44	1400	1050	2.9	8.8	3.643273	51.55891	13.1997424
45	1400	1050	2.9	8.7	3.643273	50.143	13.54722251
46	1600	1050	2.9	9.6	3.643273	63.75111	10.81180078
47	1600	1050	2.9	9.6	3.643273	63.75111	10.81180078
48	1600	1050	2.9	9.6	3.643273	63.75111	10.81180078
49	200	1300	2.5	4.7	2.58783	11.35015	37.13350315
50	200	1300	2.5	4.7	2.58783	11.35015	37.13350315
51	200	1300	2.5	4.7	2.58783	11.35015	37.13350315
52	400	1300	3.3	5.7	4.922053	18.01339	42.92094176
53	400	1300	3.2	5.7	4.580648	18.01339	40.54741038
54	400	1300	3.3	5.7	4.922053	18.01339	42.92094176
55	600	1300	3.4	6.3	5.278288	22.9232	37.43269094
56	600	1300	3.3	6.3	4.922053	22.9232	35.35290789
57	600	1300	3.4	6.3	5.278288	22.9232	37.43269094
58	800	1300	3.2	6.9	4.580648	28.55907	27.64445682
59	800	1300	3.2	6.9	4.580648	28.55907	27.64445682
60	800	1300	3.2	6.9	4.580648	28.55907	27.64445682
61	1000	1300	3.1	7.6	4.25386	36.0954	21.08519106
62	1000	1300	3.1	7.6	4.25386	36.0954	21.08519106
63	1000	1300	3.1	7.6	4.25386	36.0954	21.08519106
64	1200	1300	3	8.1	3.941474	42.13827	17.10718919
65	1200	1300	3	8.1	3.941474	42.13827	17.10718919
66	1200	1300	3	8.1	3.941474	42.13827	17.10718919
67	1400	1300	3	8.9	3.941474	52.99855	13.84430218
68	1400	1300	3	8.9	3.941474	52.99855	13.84430218
69	1400	1300	3	8.9	3.941474	52.99855	13.84430218
70	1600	1300	2.9	9.7	3.643273	65.38518	10.55585986
71	1600	1300	2.9	9.6	3.643273	63.75111	10.81180078
72	1600	1300	2.9	9.7	3.643273	65.38518	10.55585986
73	200	1950	2.4	4.5	2.357156	10.23337	37.44333428
74	200	1950	2.4	4.6	2.357156	10.78308	35.87690339
75	200	1950	2.4	4.5	2.357156	10.23337	37.44333428
76	400	1950	3.2	5.8	4.580648	18.7827	39.21225864
77	400	1950	3.3	5.9	4.922053	19.57139	40.19077605
78	400	1950	3.3	5.9	4.922053	19.57139	40.19077605
79	600	1950	3.3	6.4	4.922053	23.81119	34.26033783
80	600	1950	3.3	6.4	4.922053	23.81119	34.26033783
81	600	1950	3.3	6.5	4.922053	24.71951	33.21048576
82	800	1950	3.2	6.9	4.580648	28.55907	27.64445682
83	800	1950	3.2	6.9	4.580648	28.55907	27.64445682
84	800	1950	3.2	6.9	4.580648	28.55907	27.64445682
85	1000	1950	3.2	7.5	4.580648	34.95366	23.17302674
86	1000	1950	3.2	7.5	4.580648	34.95366	23.17302674
87	1000	1950	3.2	7.6	4.580648	36.0954	22.52257812
88	1200	1950	3.1	8	4.25386	40.88468	18.84801756
89	1200	1950	3	8.1	3.941474	42.13827	17.10718919
90	1200	1950	3	8	3.941474	40.88468	17.58560133
91	1400	1950	3	8.8	3.941474	51.55891	14.20341165
92	1400	1950	3	8.8	3.941474	51.55891	14.20341165
93	1400	1950	3	8.8	3.941474	51.55891	14.20341165
94	1600	1950	2.8	9.6	3.359035	63.75111	10.01051396
95	1600	1950	2.9	9.6	3.643273	63.75111	10.81180078
96	1600	1950	2.9	9.7	3.643273	65.38518	10.55585986
97	200	2200	2.4	4.6	2.357156	10.78308	35.87690339
98	200	2200	2.5	4.5	2.58783	10.23337	40.36799755
99	200	2200	2.5	4.6	2.58783	10.78308	38.70834905
100	400	2200	3.2	5.7	4.580648	18.01339	40.54741038
101	400	2200	3.1	5.8	4.25386	18.7827	36.93138311
102	400	2200	3.2	5.7	4.580648	18.01339	40.54741038
103	600	2200	3.3	6.2	4.922053	22.05538	36.49015291
104	600	2200	3.4	6.2	5.278288	22.05538	38.62114574
105	600	2200	3.4	6.2	5.278288	22.05538	38.62114574
106	800	2200	3.4	6.8	5.278288	27.56794	32.13938883
107	800	2200	3.3	6.8	4.922053	27.56794	30.2988914
108	800	2200	3.3	6.9	4.922053	28.55907	29.40195818
109	1000	2200	3.2	7.7	4.580648	37.25924	21.89608164
110	1000	2200	3.1	7.6	4.25386	36.0954	21.08519106
111	1000	2200	3.2	7.6	4.580648	36.0954	22.52257812
112	1200	2200	3.1	7.9	4.25386	39.65374	19.37641851
113	1200	2200	3.1	8	4.25386	40.88468	18.84801756
114	1200	2200	3	8	3.941474	40.88468	17.58560133
115	1400	2200	2.9	8.9	3.643273	52.99855	12.86425203
116	1400	2200	3	9	3.941474	54.46203	13.49738906
117	1400	2200	3	9	3.941474	54.46203	13.49738906
118	1600	2200	2.9	9.6	3.643273	63.75111	10.81180078
119	1600	2200	2.9	9.6	3.643273	63.75111	10.81180078
120	1600	2200	2.9	9.7	3.643273	65.38518	10.55585986

4.2 Pengolahan data

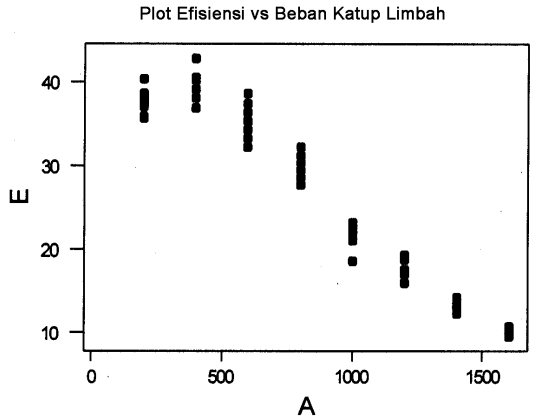
Untuk mengetahui apakah variabel percobaan ini berpengaruh terhadap respon (output) maka dilakukan analisa statistik dengan *Balanced Anova* dengan 2 faktor, yaitu faktor beban katup limbah (A) dan volume tabung (B) dan respon-nya adalah efisiensi *D'Aubuisson* (E). Pengolahan data menggunakan Minitab 11.12.

Analysis of Variance (Balanced Designs)

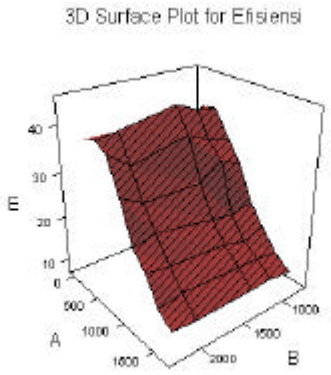
```
Factor   Type Levels Values
A      fixed 8 200 400  600  800  1000 1200 1400 1600
B      fixed 5 800 1050 1300 1950 2200

Analysis of Variance for E

Source      DF         SS         MS       F      P
A            7   13710.14    1958.59 2293.23  0.000
B            4      20.86       5.22    6.11  0.000
A*B         28     111.76       3.99    4.67  0.000
Error       80      68.33       0.85
Total      119   13911.09
```



Gambar 3. Residual Plot dari Anova



Gambar 4. Plot Efisiensi Terhadap Faktor Beban Katup Limbah



Gambar 5. Surface Plot untuk Efisiensi

Dari hasil anova, dengan tingkat signifikansi 5%, maka dapat dilihat bahwa untuk faktor A, B maupun interaksi AB, nilai $F > F_{tabel}$ sehingga dapat disimpulkan bahwa faktor-faktor tersebut berpengaruh secara signifikan terhadap efisiensi.

Untuk mengetahui seberapa banyak variabilitas respon disebabkan oleh faktor-faktor dalam eksperimen, baik itu sebagai *main effect* maupun sebagai *interaction effect* maka dilakukan perhitungan koefisien determinasi (R^2).

$SS_{model} = SS_A + SS_B + SS_{AB} = 13710.14 + 20.86 + 111.76 = 13842.76$

$R^2 = SS_{model} / SS_t = 0.9951 = 99.51\%$

Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa 99.51% dari variabilitas efisiensi *D'Aubuisson* dijelaskan oleh faktor beban katup limbah dan faktor volume tabung serta interaksinya.

Sedangkan dari hasil analisa residual yang ditunjukkan pada gambar 3, dapat dilihat bahwa data sudah random dan sesuai dengan distribusi normal. Plot data pada gambar 4 dan surface plot pada gambar 5 menunjukkan bahwa memang ada perbedaan pada respon untuk tiap variasi perlakuan variabel (faktor).

4.3 Regresi *Response Surface*

Setelah diketahui bahwa kedua faktor beban katup limbah dan volume tabung mempengaruhi efisiensi maka dilakukan analisa *response surface* untuk menentukan nilai faktor tersebut yang paling optimal. Berdasarkan plot data pada gambar 4 dan 5 maka diambil 3 level untuk masing-masing faktor yaitu : 200, 400, 600 untuk faktor A dan 800, 1050, 1300 untuk faktor B dengan 3 replikasi. Hasil pengolahan data adalah sebagai berikut :

Response Surface Regression
Estimated Regression Coefficients for E

Term	Coef	StDev	T	P
Constant	44.9651	9.29662	4.837	0.000
A	0.0504	0.01261	3.994	0.001
B	-0.0298	0.01717	-1.738	0.097
A*A	-0.0001	0.00001	-8.185	0.000
B*B	0.0000	0.00001	1.412	0.173
A*B	0.0000	0.00001	3.342	0.003

S = 1.232 R-Sq = 84.3% R-Sq(adj) = 80.5%

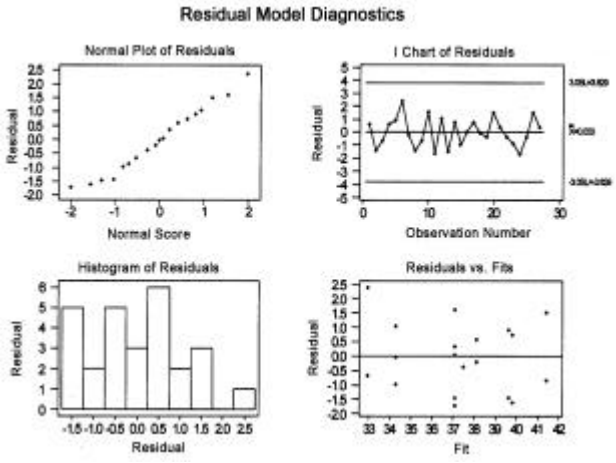
Analysis of Variance for E

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	170.710	170.710	34.142	22.51	0.000
Linear	2	49.148	31.137	15.568	10.27	0.001
Square	2	104.622	104.622	52.311	34.49	0.000
Interaction	1	16.940	16.940	16.940	11.17	0.003
Residual Error	21	31.849	31.849	1.517		
Lack-of-Fit	3	4.333	4.333	1.444	0.94	0.440
Pure Error	18	27.516	27.516	1.529		
Total	26	202.559				

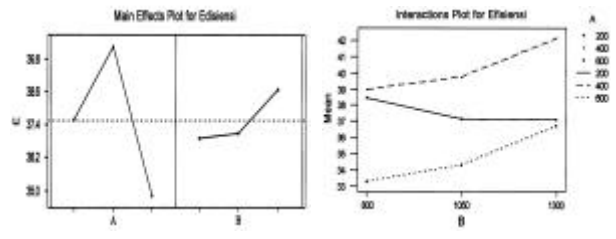
Unusual Observations for E

Obs	y	Fit	StDev Fit	Residual	St Resid
6	35.353	32.950	0.638	2.403	2.28R

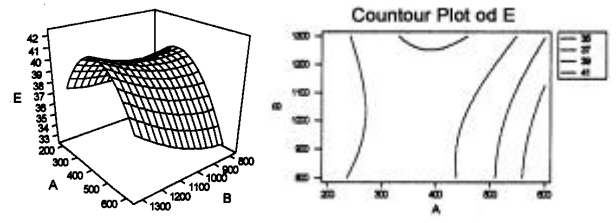
R denotes an observation with a large standardized residual



Gambar 6. *Residual Plot* Untuk *Response Surface Regression*



Gambar 7. *Main Effect* dan Interaksi Plot



Gambar 8. *Contour Plot* dan *3D Surface Plot* untuk Efisiensi

Gambar 6 yaitu *residual plot* menunjukkan bahwa data telah random dan sesuai dengan distribusi normal. Sedangkan grafik *main effect* dan *interactions plot* pada gambar 7 menunjukkan bahwa efisiensi maksimal yang dapat dicapai oleh pompa hydram adalah pada saat beban katup limbah 400 gram dan volume tabung 1300 ml. Hal ini juga didukung oleh visualisasi *contour plot* dan *3D surface plot* pada gambar 8.

Menurut data hasil percobaan dan perhitungan pada tabel 1 saat beban katup 400 gr dan volume tabung 1300 ml diperoleh efisiensi rata-rata sebesar 42,1297%, sedangkan model regresi kuadratik memberikan nilai efisiensi sebesar 41,4109 dengan koefisien determinasi sebesar 84,3%. Memang nilai efisiensi yang diperoleh tidaklah tinggi, tetapi hasil ini sudah sesuai dengan karakteristik pompa hydram yang harus membuang air untuk memancing gerakan air agar timbul aliran air untuk sumber tenaga pompa.

5. Penutup

Dari penelitian ini dan analisis yang telah diberikan dapat ditunjukkan bahwa faktor beban katup limbah dan volume tabung berpengaruh pada variabilitas dari efisiensi pompa hydram, begitu pula interaksi antara kedua faktor itu.

Lebih jauh lagi diperoleh hasil bahwa pengaturan optimal untuk kedua faktor tersebut adalah saat beban katup limbah 400 gram dan volume tabung 1300 ml dengan efisiensi pompa sebesar 42,9209%. Angka efisiensi pada pompa hydram memang relatif rendah mengingat bahwa tidak semua air yang diumpankan dapat disalurkan ke tempat yang dikehendaki karena adanya air yang harus dialihkan/ dibuang.

Studi lebih lanjut tentang karakteristik faktor-faktor lain yang berpengaruh pada efisiensi pompa hydram dapat dilakukan untuk meningkatkan nilai efisiensi ini, misalnya studi pengaruh ketinggian permukaan air *reservoir*, pengaruh jarak bukaan katup hantar maupun katup limbah.

Daftar Pustaka

1. Bos, M.G. *Discharge Measurement Structures*. Netherlands: Internationals Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, 1978.

2. Widarto, L. and Sudarto C, FX. *Membuat Pompa Hydram*, Yogyakarta: Kanisius, 1997.

3. Montgomery, D.C. *Design and Analysis of Experiments*. 4th Edition. New York: John Wiley & Sons, 1997.

4. Belavendram, N. *Quality by Design*. London: Prentice Hall, 1995.

5. Fox, R.W. and Mc. Donald Alan T. *Introduction to Fluid Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 1994.

6. Matt, Robert L. *Applied Fluid Mechanics*. New York: Mac Millan Publishing Company, 1990.

7. Warring R.H. Pumps: *Selections, Systems and Applications*. England: Trade & Technical Press Limited, 1984.

8. http://www.cat.org.uk/information/tipsheets/hydram.html

9. http://lifewater.org/wfw/rws4d5.htm