

Karakteristik Uji Horizontal dan Vertikal Pompa Listrik *Submersible* (*Electric Submersible Pump*) Tipe Sentrifugal Multi Tingkat

Harinaldi

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia
Kampus Baru UI-Depok, Jawa Barat 16424
E-mail: harinald@eng.ui.ac.id

Pungky Hermawan

PT Reda Pump Indonesia, Jl. H.R Rasuna Said Kav.X-6 No.8, Jakarta 12940

Saleh bin Mohammad

Reda Pump Co., 7 Benoi Crescent Jurong, Singapore

Abstrak

Pompa listrik submersible (Electric Submersible Pump/ESP) tipe sentrifugal multi tingkat sangat luas pemakaiannya dalam bidang perminyakan/ pertambangan. Pompa ini digunakan untuk memompa minyak mentah (crude oil) dari dalam perut bumi. Pada pengoperasiannya pompa dipasang secara vertikal pada sumur minyak di bawah tanah dan di desain untuk mampu bekerja dengan kondisi seluruh komponen terendam fluida. Sesuai dengan pengoperasiannya, selama ini terhadap pompa yang diproduksi dilakukan pengujian pada fasilitas pengujian vertikal (Vertical Pump Testing System/VPTS) dengan menggunakan kombinasi peralatan yang sama dengan di lapangan. Untuk itu dibutuhkan sumur dengan diameter casing yang lebih besar daripada diameter maksimum pompa yang dapat diproduksi dan memiliki kedalaman sekitar 45 m. Namun karena kompleks dan mahalnya instalasi pengujian vertikal, maka pada penelitian ini dikembangkan metode pengujian dengan fasilitas pengujian horizontal (Horizontal Pump Testing System/HPTS) yang lebih sederhana dan murah. Karakteristik dari dua jenis metode dan fasilitas pengujian ini dikaji dengan menggunakan sebuah ESP yang sama (REDA Electric Submersible DN3000) dengan mengikuti prosedur uji standard yang direkomendasikan oleh American Petroleum Institute untuk pengujian pompa, API Recommended Practise 11 S2. Dari analisis yang dilakukan diperoleh bahwa hasil-hasil pengujian horizontal dan vertikal menunjukkan perbedaan nilai-nilai head dan daya dan sedikit perbedaan efisiensi. Pengujian horizontal memberikan hasil prestasi pompa yang sedikit lebih baik dibandingkan pengujian vertikal. Namun demikian dengan menetapkan level of significant sebesar 5 % pada uji hipotesis perbedaan dua rata-rata diperoleh bahwa hasil pengujian menunjukkan nilai rata-rata yang sama. Lebih lanjut lagi, penelitian ini merekomendasikan beberapa persamaan regresi yang menghubungkan hasil kedua metode pengujian yang dapat dimanfaatkan oleh berbagai pusat perbaikan (service center) pompa jenis ini yang tidak memiliki fasilitas pengujian vertikal.

Kata Kunci : pompa submersible, pengujian pompa, uji statistik

1. Pendahuluan

Industri pertambangan, khususnya perminyakan banyak menggunakan pompa-pompa yang harus beroperasi pada kondisi yang ekstrim karena cadangan-cadangan minyak mentah yang dihisap melalui sumur-sumur minyak di bawah tanah yang letaknya sangat dalam. Salah satunya adalah pompa listrik submersible (*Electric Submersible Pump/ESP*) tipe sentrifugal multi tingkat yang pada pengoperasiannya dipasang secara vertikal pada sumur minyak di bawah tanah dan di desain untuk mampu bekerja dengan kondisi seluruh komponen terendam fluida. *ESP* dapat diaplikasikan pada sistem pemompaan fluida yang membutuhkan tekanan tinggi dan laju aliran yang besar seperti pada *water injection*, *water supply booster service*, *salt water disposal*, *crude oil transfer*, *amine service*, dll (Hicks and Edward, 1971). Sistem *ESP* ini tersusun atas downhole equipments yang terdiri dari motor listrik, pelindung, saluran hisap dan pompa serta surface equipment yang terdiri dari wellhead, junction box, switchboard dan transformer. Sistem ini dikembangkan sebagai salah satu metode pemindahan fluida yang cukup efektif dan efisien pada kondisi kerja yang ekstrim. Suhu di dalam sumur dapat mencapai 200 °C, sedangkan komposisi kimia fluida mengandung bahan-bahan korosif seperti sulfur, gas H₂S, dan CO₂ (Wacker, et al., 1999). Karena merupakan sebuah sistem yang efisien

dan efektif untuk memindahkan fluida dari sebuah sumur ke permukaan dengan kedalaman yang besar, sistem *ESP* telah sukses dipakai di seluruh dunia selama lebih dari 60 tahun. Selama periode tersebut, telah banyak usaha pengembangan pompa ini untuk mengoptimalkan kinerja, daya tahan dan kelayakannya. Beberapa perlengkapan tambahan (*auxiliary equipments*) telah dirancang untuk meningkatkan kinerja sistem *ESP* ini. Kemampuan sistem *ESP* sebagai sebuah pompa *heavy duty* ditunjang oleh penggerak utamanya yang berupa motor *REDA* (*Russian Electrical Dynamo of Arutonoff*) yang merupakan motor listrik yang dirancang khusus untuk dapat bekerja dalam kondisi terendam dalam fluida. Motor ini biasanya dipasang di bagian bawah unit pemompaan dan memiliki poros yang dihubungkan pada pelindung poros yang terletak di atasnya.

Salah satu masalah yang dihadapi oleh industri pompa jenis ini adalah pada saat pengujian kinerja pompa (pump performance test) yang ditunjukkan dengan kurva-kurva tekanan (head), efisiensi, dan daya sebagai fungsi dari kapasitas aliran. Masalah tersebut terutama dihadapi oleh pusat-pusat perbaikan (*service center*) dari pembuat pompa jenis ini. Sesuai dengan pengoperasiannya, selama ini terhadap pompa yang diproduksi dilakukan pengujian pada fasilitas pengujian vertikal (*Vertical Pump Testing System/VPTS*) dengan menggunakan kombinasi peralatan yang sama dengan di lapangan. Untuk itu dibutuhkan sumur dengan diameter casing yang lebih besar daripada diameter maksimum pompa yang dapat diproduksi dan memiliki kedalaman sekitar 45 m. Pada fasilitas pengujian standard ini air dipakai sebagai fluida kerja karena sifat-sifatnya yang lebih menguntungkan. Hasil pengujian kemudian berupa kurva-kurva kinerja pompa standard yang kemudian menjadi kelengkapan dokumentasi teknik yang menyertai pompa saat dipasarkan. Fasilitas ini biasanya hanya ada di pabrik pusat (*main factory*) dan beberapa pusat perbaikan utama (*main service center*) yang hanya ada di beberapa tempat. Kesulitan dihadapi oleh pusat-pusat perbaikan yang tidak memiliki fasilitas ini jika harus menangani perbaikan dan menguji kembali kinerja pompa yang telah diperbaiki. Karena kompleks dan mahalnya instalasi pengujian vertikal, maka beberapa pembuat pompa jenis ini mengembangkan metode pengujian dengan fasilitas pengujian horizontal (*Horizontal Pump Testing System/HPTS*) yang lebih sederhana dan murah. Secara khusus, dalam makalah ini kami melaporkan bagian yang mendiskusikan karakteristik dari dua jenis metode dan fasilitas pengujian ini digunakan untuk menguji sebuah *ESP* yang sama dengan mengikuti prosedur uji standard yang direkomendasikan.

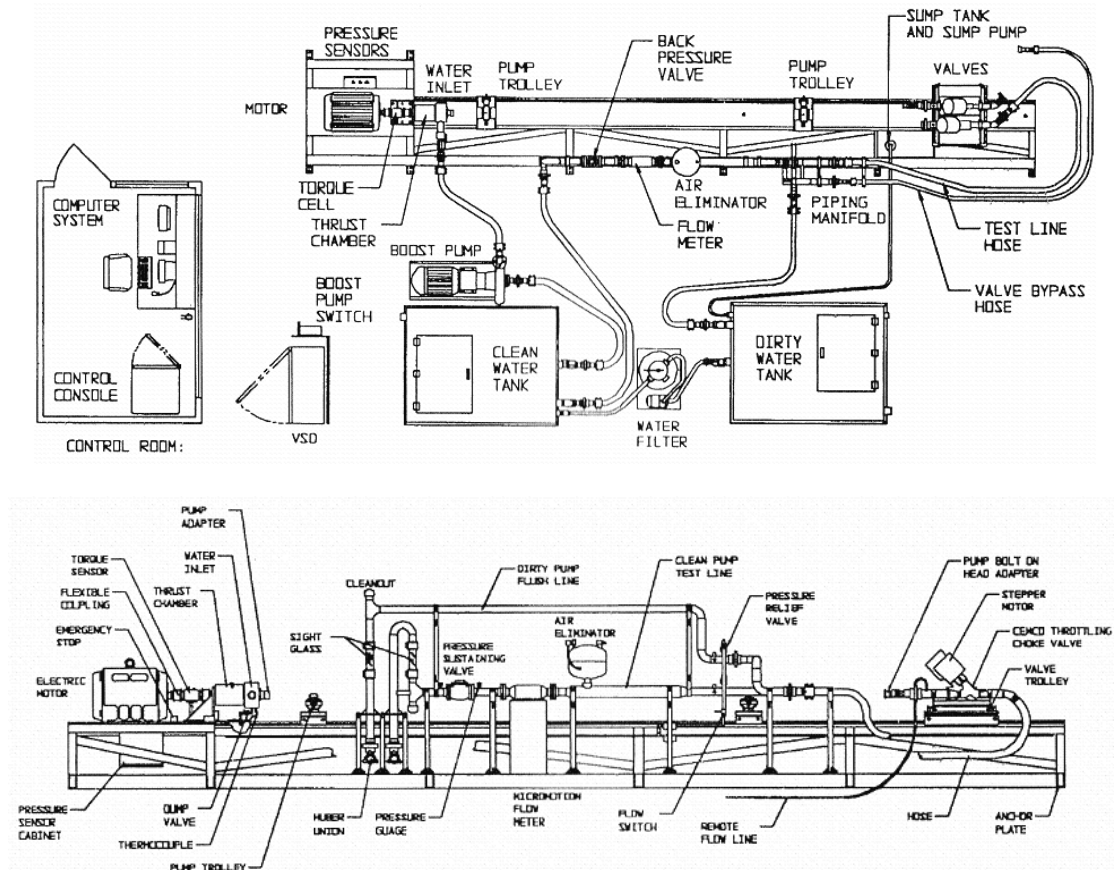
2. Metode Penelitian

Sesuai dengan salah satu tujuannya, penelitian ini merupakan kajian perbandingan (*comparative study*) dari dua metode pengujian pompa yang salah satunya adalah metode yang diusulkan/dikembangkan. Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental berupa pengujian kinerja sebuah *ESP* dengan menggunakan fasilitas pengujian horizontal yang dikembangkan dan kemudian hasilnya dibandingkan dengan hasil pengujian dengan menggunakan fasilitas pengujian vertikal yang sudah ada dan menjadi standard pada pabrik pembuat pompa. Karakteristik dari metode pengujian ini kemudian dibandingkan dengan pendekatan statistik yang menggunakan prosedur-prosedur uji hipotesis dan teknik regresi dan korelasi (Harinaldi, 2006).

2.1 Pengujian Pompa

Pengujian pompa secara vertikal dan horizontal dilakukan di laboratorium *quality assurance* perusahaan Reda Pump Co., Singapura. Fasilitas uji vertikal (*VPTS*) merupakan fasilitas standard yang sama dengan fasilitas uji di pabrik pusat Reda Pump Battersville-Oklahoma, USA (REDA, 2000), sedangkan fasilitas pengujian horizontal (*HPTS*) merupakan fasilitas uji coba yang diusulkan. Gambar 1 menunjukkan lay out apparatus dan instrumentasi dari fasilitas pengujian horizontal yang digunakan pada penelitian. Fasilitas pengujian horizontal mempergunakan prinsip kerja dan apparatus yang relatif sama dengan pengujian vertikal. Perbedaan yang mendasar adalah pada posisinya dan motor listrik yang digunakan sedemikian hingga menjadi lebih efisien, murah dan mudah penanganannya. Pompa yang diuji adalah *REDA ESP* tipe DN3000. Motor penggerak pada *HPTS* adalah motor listrik induksi sedangkan pada *VPTS* menggunakan *submersible motor*. Untuk mengatur laju kapasitas alir sesuai dengan kebutuhan pengujian, kedua fasilitas *HPTS* dan *VPTS* menggunakan *variable speed driver* (*VSD*) *REDA Speedstar 2000*. Pengukuran tekanan dan torsi dilakukan dengan *pressure transducer* dan *torque sensor* sedangkan laju aliran fluida dengan flow meter. Fluida pengujian yang digunakan

adalah air yang mudah penanganannya, tidak menyebabkan polusi dan memiliki berat jenis yang hampir sama dengan minyak mentah. Temperatur air dijaga konstan pada 16 °C (60 °F). Air yang keluar dari pompa ditampung dan disaring sebelum masuk kembali ke pompa. Seluruh sistem pengujian dikendalikan dari sebuah *control room* yang dilengkapi dengan sistem komputer yang terhubung dengan sistem kontrol otomatis. Sebuah program komputer secara otomatis mengatur aliran fluida yang melewati pompa sekaligus mengumpulkan data laju aliran, torsi, kecepatan putar, tekanan masuk dan keluar serta temperatur. Data yang diakuisisi secara otomatis ini kemudian diolah secara langsung dan disajikan dalam berbagai kurva kinerja pompa yang memperlihatkan karakteristik tinggi tekan (*head*), daya dan efisiensi sebagai fungsi laju aliran. Sistem dapat pula bekerja manual dari *control room* apabila sistem komputer tidak dapat berfungsi.



Gambar 1. Lay out apparatus dan instrumentasi dari fasilitas pengujian horizontal

Pengujian *ESP* dilakukan dengan mengikuti standard *API Recommended Practise 11 S2* (Usta and Pancar, 2007). Pengujian pompa dilakukan pada 5 titik uji meliputi: (1) posisi katup terbuka penuh, (2) minimum laju alir pada *ROR* (*Recommended Operation Range*), (3) rata-rata laju alir pada *BEP* (*Best Efficiency Point*), (4) maksimum laju alir pada *ROR*, dan (5) posisi katup tertutup penuh. Pengujian pada laju alir aktual harus masuk pada $\pm 2\%$ laju aliran yang ditentukan. Daya (*Brake Horse Power*) dicatat pada laju aliran aktual. Putaran motor dijaga konstan pada 3500 rpm. Berdasarkan rekomendasi *API*, suatu pompa dianggap lulus pengujian apabila memiliki kinerja pada *ROR* yang sama dengan kurva kinerja pompa standard dari pompa tersebut dengan batas toleransi: (1) head-laju alir $\pm 5\%$ head, (2) daya-laju alir $\pm 8\%$ daya, (3) efisiensi-laju alir $\pm 10\%$ efficiency pada *BEP*. Pengujian pompa *ESP* dilakukan sebanyak 32 kali tidak secara terus menerus dengan rentang waktu selama 16 bulan. Di antara rentang antar waktu pengambilan data, fasilitas uji tetap dioperasikan secara berkala mengikuti jadwal yang ditentukan. Pengambilan data dalam rentang waktu yang cukup lama ini dimaksudkan untuk mengetahui konsistensi fasilitas uji.

2.2 Uji Statistik

Analisis perbandingan karakteristik metode pengujian vertikal dan horizontal dilakukan dari hasil uji statistik terhadap perbandingan parameter-parameter kinerja pompa yang diperoleh (head, daya, efisiensi pada variasi laju aliran) dari kedua pengujian tersebut. Karena pada dasarnya tujuan analisis yang dilakukan adalah untuk mengetahui apakah karakteristik yang diamati dari dua populasi serupa atau berbeda, maka dalam penelitian ini uji statistik yang dilakukan adalah uji hipotesis mean dengan sample ganda (Harinaldi, 2006). Dengan jumlah sample > 30 maka asumsi normalitas dalam distribusi probabilitas populasinya dapat digunakan. Dengan menetapkan tingkat kepentingan (*level of significant*), $\alpha = 5\%$ pada uji dua ujung maka batas-batas penerimaan hipotesis nol (mean yang sama untuk dua populasi) dari nilai statistik uji adalah $-1,96 < z_{test} < +1,96$. Statistik uji z_{test} perbedaan mean ditentukan dengan rumus:

$$z_{test} = \frac{\bar{x}_h - \bar{x}_v}{\sigma_{\bar{x}_h - \bar{x}_v}} \quad (1)$$

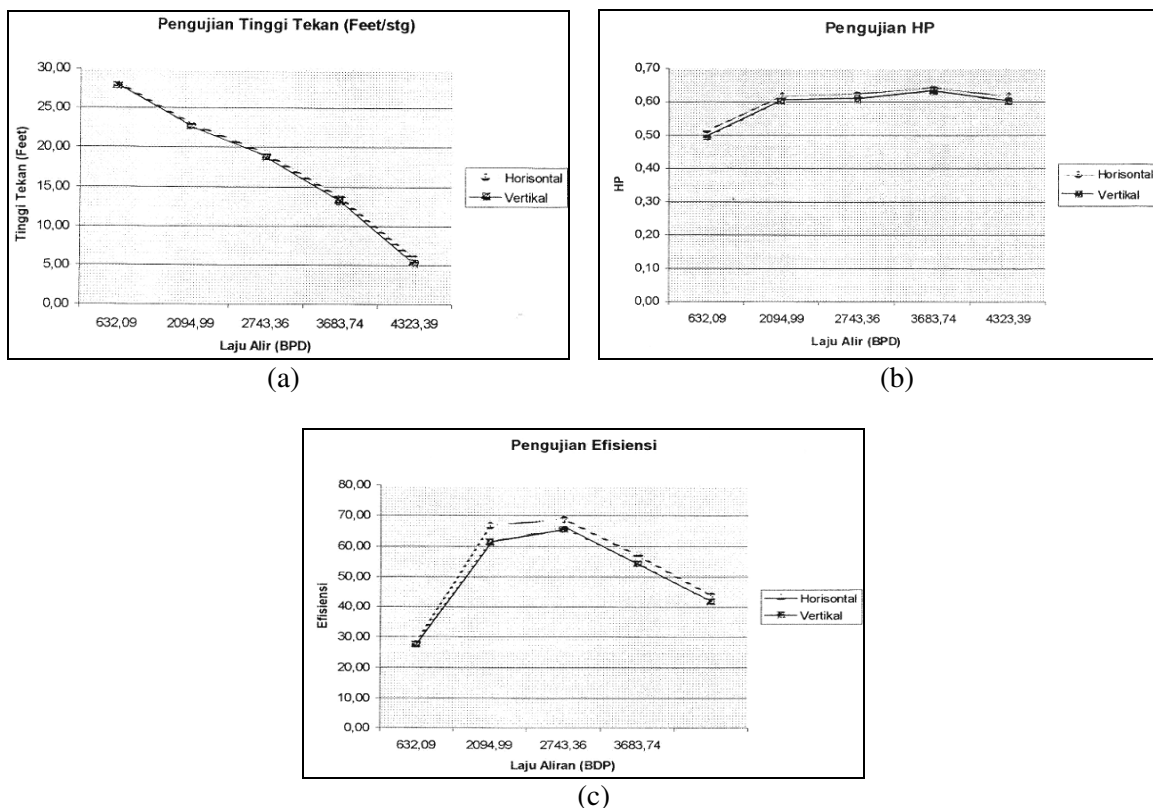
$$\sigma_{\bar{x}_h - \bar{x}_v} = \sqrt{\frac{s_h^2}{n_h} + \frac{s_v^2}{n_v}} \quad (2)$$

Selanjutnya korelasi antara dua pengujian dan persamaan regresi yang menghubungkan titik-titik data dari parameter pengujian ditentukan pada diagram pencar.

3. Hasil dan Diskusi

3.1. Pengaruh Metode Pengujian Pada Kurva Kinerja Pompa yang Dihasilkan

Hasil-hasil yang diperoleh berupa parameter kinerja hubungan antara head, daya dan efisiensi sebagai fungsi dari laju aliran per satu tingkat ESP disajikan pada Gambar 2 (a) – (c).



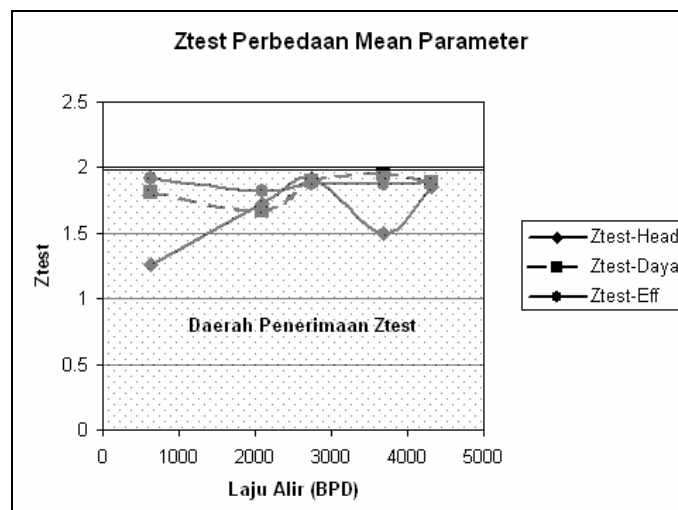
Gambar 2. Kurva-kurva kinerja ESP (a) kurva head-laju alir; (b) daya-laju alir; (c) efisiensi-laju alir yang diperoleh dari pengujian horizontal dan vertikal

Data disajikan dengan satuan yang langsung diperoleh dari pengolahan dengan program komputer diruang kontrol dimana head dalam kaki/tingkat (*feet/stg*), daya dalam tenaga kuda (*horse power, HP*)

dan laju aliran dalam barrel/hari (*barrel per day, BPD*). Dari Gambar 2 terlihat bahwa pengujian horizontal memberikan hasil berupa nilai-nilai prestasi pompa yang relatif lebih tinggi daripada yang diperoleh dari pengujian vertikal. Kecenderungan ini terlihat cukup konsisten pada seluruh 5 kondisi laju aliran yang diuji. Namun demikian, pengamatan lebih seksama dan pemeriksaan terhadap data pengujian aslinya dapat diindikasikan bahwa pada keadaan katup terbuka penuh (kondisi 1) dan tertutup penuh (kondisi 5) dan maksimum laju alir pada *ROR* (kondisi 4) perbedaan yang ditunjukkan antara pengujian horizontal dan vertikal relatif lebih kecil dibandingkan dengan pada saat minimum laju alir pada *ROR* (kondisi 2) dan laju rata-rata pada *BEP* (kondisi 3). Perbedaan ini terlihat jelas pada kurva kinerja yang menunjukkan hubungan antara efisiensi dengan laju aliran pompa. Hasil ini memberikan petunjuk bahwa diperlukan kehati-hatian dalam menggunakan kurva-kurva prestasi dari hasil pengujian horizontal di kisaran laju aliran minimum pada *ROR* sampai laju aliran pada *BEP*. Koreksi yang cukup signifikan perlu dilakukan dengan mencari korelasi data dari pengujian horizontal dan vertikal, terutama di kisaran ini. Analisis statistik pada bagian selanjutnya akan menunjukkan kecenderungan hal tersebut.

3.2 Komparasi dan Relasi Statistik

Hasil uji hipotesis mean sample ganda dari parameter head pompa menghasilkan nilai statistik uji Z_{test} pada setiap kondisi laju aliran seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3, masing-masing untuk statistik uji perbedaan mean head, perbedaan mean daya dan perbedaan mean efisiensi.

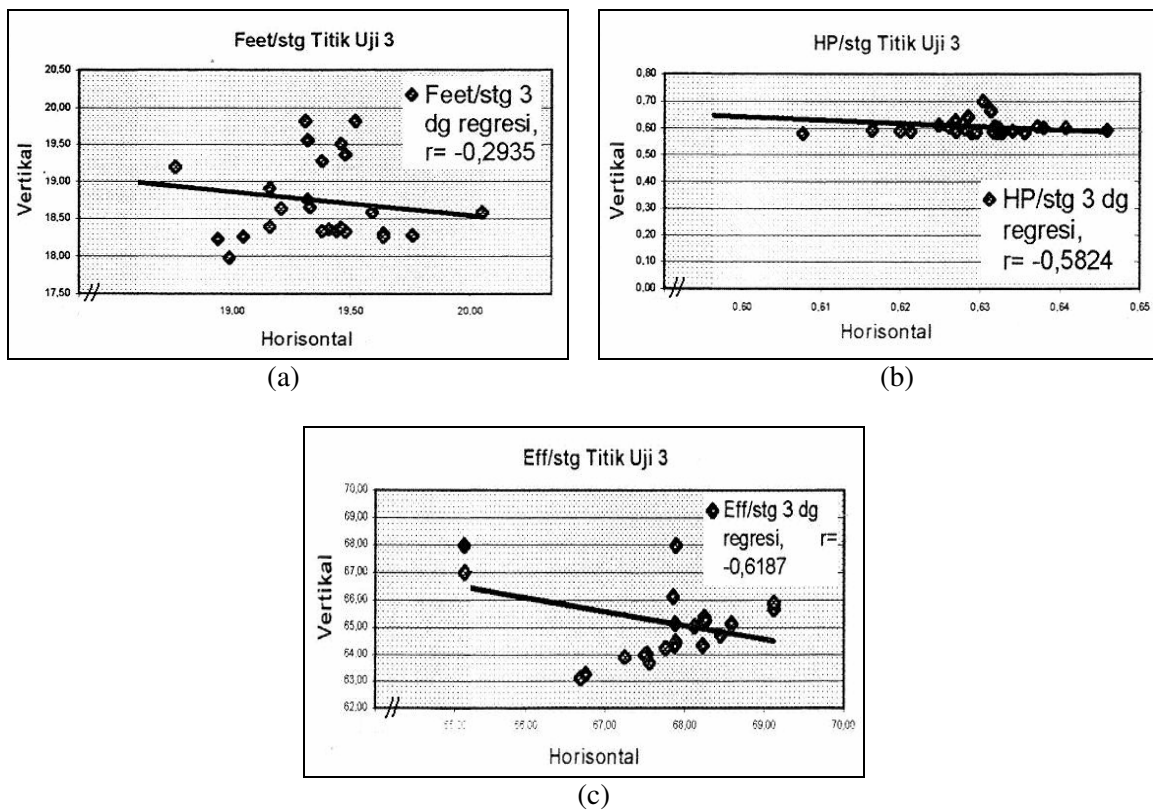


Gambar 3. Nilai uji Z_{test} perbedaan mean parameter kinerja pompa

Nilai uji Z_{test} untuk head pompa berada pada interval $+1,26 < Z_{test}\text{-Head} < +1,91$, untuk daya pada interval $+1,67 < Z_{test}\text{-Daya} < +1,94$, dan untuk efisiensi pada interval $+1,81 < Z_{test}\text{-Eff} < +1,91$. Dengan demikian, meskipun terdapat nilai-nilai uji yang sangat mendekati nilai kritis penerimaan hipotesis nol (tidak terdapat perbedaan mean) sebesar $Z_{test\ critical} = \pm 1,96$ seluruh nilai uji Z_{test} perbedaan mean untuk seluruh parameter kinerja pompa yang dihasilkan dari kedua pengujian masih berada di dalam penerimaan hipotesis nol. Secara statistik dapat disimpulkan bahwa dengan tingkat kepentingan sebesar 5 %, hasil pengujian dengan metode uji horizontal tidak berbeda dengan hasil pengujian secara vertikal.

Selanjutnya, meskipun diskusi pada paragraf di atas menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang berarti dari hasil uji horizontal dan vertikal, pada sub bagian 3.1 telah diindikasikan perlunya kehati-hatian dalam menggunakan hasil-hasil pengujian horizontal, terutama pada kondisi-kondisi laju aliran yang mendekati nilai laju rata-rata pada *BEP*. Koreksi yang cukup signifikan perlu dilakukan dengan mencari korelasi data dari pengujian horizontal dan vertikal, terutama di kisaran ini. Gambar 4 (a) – (c) menunjukkan diagram pencar dari seluruh titik data yang menghubungkan hasil pengujian horizontal pada sumbu datar dan pengujian vertikal pada sumbu tegak masing-masing untuk head, daya dan efisiensi pompa yang dilakukan dengan kondisi laju rata-rata pada *BEP* (kondisi 3). Pada

kondisi ini perbedaan hasil pengujian yang terjadi antara kedua metode tersebut relatif paling besar di antara kondisi yang lain. Dari gambar terlihat bahwa titik-titik data untuk seluruh parameter kinerja pompa tersebar cukup acak sehingga cukup sulit untuk menentukan garis regresi yang paling cocok. Sebagai ilustrasi, jika dipilih secara sembarang model regresi linier, maka diperoleh garis regresi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4 dan persamaan regresinya ditunjukkan pada Tabel. 1. Karena variabel-variabel yang dicari hubungannya merupakan sistem yang tidak terkait secara fisik, maka upaya pemodelan garis regresi juga tidak dapat dilakukan dengan justifikasi yang valid. Dengan demikian model regresi apapun yang ditetapkan hanya akan menghasilkan persamaan konversi antara nilai parameter yang dihasilkan pada pengujian horizontal dengan pengujian vertikal. Dengan demikian perlu kehati-hatian dalam menggunakan persamaan-persamaan regresi tersebut dalam aplikasi di lapangan.



Gambar 4. Korelasi hasil pengujian horizontal dan vertikal pada kondisi laju aliran pada *BEP*

Tabel 1. Persamaan regresi parameter kinerja ESP

Parameter	Persamaan Regresi	r
Head, H (feet)	$H_v = 24,836 - 0,315 H_h$	-0.294
Daya, P (power)	$P_v = 1,375 - 1,225 P_h$	-0.582
Effisiensi, η	$\eta_v = 99,282 - 0,503 \eta_h$	-0.619

4. Kesimpulan

Karakteristik metode pengujian horizontal dan vertikal pompa listrik submersible (*Electric Submersible Pump*) tipe sentrifugal multi tingkat telah diteliti secara eksperimental dengan mengikuti prosedur uji standard yang direkomendasikan oleh American Petroleum Institute untuk pengujian pompa, *API Recommended Practise 11 S2*. Hasilnya menunjukkan bahwa pengujian horizontal memberikan hasil prestasi pompa yang sedikit lebih baik dibandingkan pengujian vertikal. Namun demikian dengan menetapkan level of significant sebesar 5 % pada uji hipotesis perbedaan dua

rata-rata diperoleh bahwa hasil pengujian menunjukkan nilai rata-rata yang sama. Lebih lanjut lagi, terindikasi bahwa perlu kehati-hatian dalam menggunakan kurva-kurva prestasi dari hasil pengujian horizontal di kisaran laju aliran minimum pada *ROR* sampai laju aliran pada *BEP*. Koreksi yang cukup signifikan perlu dilakukan dengan menggunakan beberapa persamaan regresi untuk mengkoversikan hasil dari kedua metode pengujian tersebut sehingga dapat dimanfaatkan oleh berbagai pusat perbaikan (*service center*) pompa jenis ini yang tidak memiliki fasilitas pengujian vertikal.

Notasi

z_{test}	Nilai uji z pada pengujian hipotesis perbedaan mean sample ganda
\bar{x}_h	mean nilai parameter kinerja pompa pada uji horizontal
\bar{x}_v	mean nilai parameter kinerja pompa pada uji vertikal
s_h^2	standard deviasi nilai parameter kinerja pompa pada uji horizontal
s_v^2	standard deviasi nilai parameter kinerja pompa pada uji horizontal
n_h	jumlah sampel pada uji horizontal
n_v	jumlah sampel pada uji vertikal
$\sigma_{\bar{x}_h - \bar{x}_v}$	error standard perbedaan mean

Referensi

- Harinaldi (2006), Prinsip-prinsip Statistik untuk Teknik dan Sains, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Hicks, T.G, Edward, T,W (1971), Pump Application Engineering, McGraw Hill Co., New York.
- REDA (2000), VPTS Manual, Reda Pump Co, Battersville-Oklahoma
- Usta, N and Pancar, Y., (2007), "Effects of Splitter Blades on Deep Well Pump Performance", Journal of Energy Resources Technology, Vol. 129, Issue 3, pp. 169-176
- Wacker, H.J, Parker, R.M., Stuebinger, L., Harding, R., and Watson, B., (1999), "Test Proves Out Triple-Action Pump in Downhole Separation", Oil and Gas Journal, Oct. 4., pp. 49-55