ANALISIS REGRESI UNTUK MENENTUKAN KORELASI PEMBEBANAN TERHADAP DAYA DAN TORSI PADA TURBIN PELTON

REGRESSION ANALYSIS TO DETERMINE CORRELATION OF POWER AND TORSION FOR PELTON TURBINE

Muhammad Nauval Fauzi, Mahaputra, Sony Harbintoro

Balai Besar Logam dan Mesin, Kementerian Perindustrian

Jl Sangkuriang No. 12 Bandung 40135

E-mail: nauval911@gmail.com

Abstrak

Pembangkit Listrik Tenaga Air di Indonesia banyak dipasang menggunakan turbin pelton. Turbin pelton adalah alat yang bekerja untuk mengubah energi kinetik air menjadi energi mekanik berupa putaran poros yang digunakan untuk generator listrik dan menghasilkan tenaga listrik. Desain turbin pelton itu unik, maka perancang harus melakukan perancangan baru setiap akan membuat turbin baru atau turbin pengganti dalam pengembangannya. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur kemampuan pembangkit listrik turbin pelton dan menganalisis regresi sistem kerjanya. Dengan menggunakan metode rekayasa peniruan, prototype turbin pelton dibuat agar dapat dilakukan pengukuran analisis regresi terhadap hubungan daya pengisian alternator terhadap jumlah lampu, hubungan putaran alternator (rpm) terhadap jumlah lampu, hubungan daya keluaran terhadap putaran alternator dan hubungan torsi terhadap putaran alternator sehingga dapat digunakan untuk memprediksi parameter-parameter yang akan diperlukan dalam merancang sistem pembangkit listrik turbin pelton nantinya. Dari hasil analisis regresi, diperoleh koefisien korelasi dengan nilai dibawah 1, pendekatan regresi telah cukup memadai dengan nilai koefisien korelasi diatas 0,9 Sehingga dapat diperoleh hubungan hasil pengukuran dengan hasil perhitungan yang baik.

Kata kunci: turbin pelton, daya, torsi, analisis regresi

Abstract

Pelton turbines were used in many of Indonesia's Hydropower plant. Pelton turbine is a device that works to transform the kinetic energy of the water into mechanical energy in the form of whirlpool that can be used to rotate an electric generator which then can generate electrical energy . All turbine pelton design is unique, so that the designer must perform a new runner design every time a new turbine or turbines substitute in its development. This study was done to measure the power of Pelton Turbine's hydropower and analyze the system regression. Reverse engineering was used as a method to built pelton turbine prototype so that the measurement of regression analyze on the relationship between alternator power obtained with the amount of light, relationship between alternator rotation with the amount of light, relation between the power output with the alternator rotation and the torsion relationship with the alternator rotation so that it can be used as parameter prediction which will be needed in Pelton Turbine's Hydropower plant system design. From the results of the regression analysis, it showed that the correlation coefficient value below 1, the regression approach was actually adequate with correlation coefficient above 0.9 So that the accuracy of the relationship between the calculated and the measurement results can be obtained.

Keywords: pelton's turbin, power, torsion, regression analysis

PENDAHULUAN

Keterbatasan Kemampuan dari Perusahaan Listrik Negara (PLN) dalam menyediakan jumlah pasokan energi listriknya

merupakan salah satu penyebab sering terjadinya pemadaman listrik di wilayah Indonesia. Biaya produksi yang mahal menyebabkan negara terbebani dengan subsidi

yang harus ditanggung dan kurangnya pasokan energi listrik dapat berdampak langsung pada kegiatan ekonomi dan industri kita.

Negara Indonesia merupakan salah satu negara dengan sumber energi terbarukan yang berlimpah dan mudah diperoleh. Berdasarkan data hasil studi dan penelitian menyebutkan bahwa Indonesia mempunyai cadangan geothermal terbesar di dunia setara 27 gigawatt (GW). Selain itu, ada sumber air (75 GW), angin (9 GW), dan biofuel (50 GW). Saat ini tercatat pemanfaatan dari sumber energi terbarukan baru sekitar 5 GW. Saat ini pemerintah sedang menggalakkan program pemanfaatan sumber energi terbarukan. Untuk dunia industri sendiri salah satu contohnya kita bisa lihat dari peraturan mengenai TKDN (Tingkat Kandungan Dalam Negeri) untuk berbagai produk yang dipakai dalam pembangkit listrik.^[6]

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu agar kita dapat mengukur kemampuan kita dalam memproduksi setiap komponen pembangkit listrik dengan turbin pelton dalam negeri serta mampu melakukan analisis regresi sistem kerja pembangkit listrik dengan turbin pelton, sehingga dapat memprediksi parameter-parameter yang diperlukan dalam merancang suatu sistem pembangkit listrik dengan turbin pelton.

Sedangkan ruang lingkup penelitian ini adalah pada sistem operasional yang dilakukan pada kondisi *prototype* bukan aplikasi sebenarnya di lapangan. *Nozzle* dan *bucket* untuk *prototype* menggunakan produk yang ada di pasaran, bukan hasil desain. Gambar desain untuk turbin 200 KW yang dihasilkanpun merupakan gambar teknik untuk *bucket*, *runner*, dan *assembly runner* dengan *nozzle*.^[8]

Maka hasil yang diharapkan dari penelitian ini adalah mendapatkan nilai korelasi analisis regresi untuk hubungan daya pengisian alternator terhadap jumlah lampu, hubungan putaran alternator (rpm) terhadap jumlah lampu, hubungan daya keluaran terhadap putaran alternator dan hubungan torsi terhadap putaran alternator sehingga dapat digunakan untuk memprediksi parameter-parameter yang akan diperlukan dalam merancang sistem pembangkit listrik Turbin Pelton nantinya.

TINJAUAN PUSTAKA

Fungsi dan Komponen Turbin

Turbin berfungsi mengubah energi potensial fluida menjadi energi mekanik yang

kemudian diubah lagi menjadi energi listrik pada generator. Komponen-komponen turbin yang penting seperti pada Gambar 1 sebagai berikut.^{[2], [9]}

1. Sudu pengarah
Untuk mengontrol kapasitas aliran yang masuk turbin.
2. Roda jalan atau *runner* turbin
Pada bagian ini terjadi peralihan energi potensial fluida menjadi energi mekanik.
3. Poros turbin
Pada bagian ini terdapat *runner* dan ditumpu dengan bantalan radial dan bantalan axial.
4. Rumah turbin
Biasanya berbentuk keong atau spiral, berfungsi untuk mengarahkan aliran masuk sudu pengarah.
5. Pipa hisap
Mengalirkan air yang ke luar turbin ke saluran luar.

Gambar 1. Turbin pelton

Turbin air dikembangkan awalnya pada abad 19 dan digunakan secara luas untuk tenaga industri untuk jaringan listrik. Sekarang lebih umum dipakai untuk generator listrik. Turbin ini dimanfaatkan secara luas dan merupakan sumber energi yang terbarukan.^[1]

Klasifikasi Turbin

Pemilihan sebuah turbin kebanyakan didasarkan pada *head* air yang didapatkan dan kurang lebih pada rata-rata alirannya. Aplikasi penggunaan turbin berdasarkan tinggi *head* yang didapatkan antara lain sebagai berikut:^{[6], [8]}

1. Turbin Kaplan : $2 < H < 100$ meter
2. Turbin Francis : $5 < H < 500$ meter
3. Turbin Pelton : $H < 30$ meter
4. Turbin Banki : $2 < H < 200$ meter

Berdasarkan perubahan tekanan yang terjadi, turbin dapat dikelompokkan menjadi dua golongan besar, yaitu Turbin Impuls dan Turbin Reaksi.^{[6],[7]}

Turbin impuls adalah turbin tekanan sama karena aliran air yang keluar dari *nozzle* tekanannya adalah sama dengan tekanan atmosfer sekitarnya. Semua energi tinggi tempat dan tekanan ketika masuk ke sudu jalan turbin dirubah menjadi energi kecepatan. Turbin Impuls memanfaatkan energi potensial air diubah menjadi energi kinetik dengan *nozzle*. Air keluar *nozzle* yang mempunyai kecepatan tinggi membentur sudu turbin. Setelah membentur sudu arah kecepatan aliran berubah sehingga terjadi perubahan momentum (impuls). Akibatnya roda turbin akan berputar.^[7]

Turbin impuls memiliki tekanan sama karena aliran air yang keluar dari *nozzle* tekanannya sama dengan tekanan atmosfer sekitarnya. Energi potensial yang masuk ke *nozzle* akan dirubah menjadi energi kecepatan (kinetik). Yang termasuk turbin impuls adalah.^[6]

- Pelton
- Turgo
- Cross flow

Turbin reaksi adalah turbin yang memanfaatkan energi potensial untuk menghasilkan energi gerak. Sudu pada turbin reaksi mempunyai profil khusus yang menyebabkan terjadinya penurunan tekanan air selama melalui sudu. Perbedaan tekanan ini memberikan gaya pada sudu sehingga *runner* (bagian turbin yang berputar) dapat berputar. Turbin yang bekerja berdasarkan pada prinsip ini dikelompokkan sebagai turbin reaksi. *Runner* turbin reaksi sepenuhnya tercelup dalam air dan berada dalam rumah turbin.

Yang termasuk turbin reaksi:^[6]

- Francis
- Propeller
- Kaplan
- Tubular
- Tyson

Klasifikasi turbin berdasarkan daya, tinggi jatuh, dan debit yang mengalir.^[8]

- a) Turbin *Mini Mikrohidro*, contohnya kincir air.

- b) Turbin *Mikrohidro* untuk head rendah, contohnya turbin kaplan.
- c) Turbin *Hydropower* adalah turbin air dengan daya tinggi yang mampu menghasilkan daya diatas 20 MW tiap unit. Contohnya Turbin Francis, Kaplan, dan Pelton.

Turbin pelton adalah suatu alat yang bekerja untuk merubah energi kinetik air yang diakibatkan karena adanya energi potensial yang dimiliki oleh air menjadi energi mekanik berupa putaran pada poros turbin tersebut. Dan perputaran poros dari poros tersebut bisa digunakan untuk memutar generator listrik yang kemudian bisa menghasilkan energi listrik. Pada roda turbin terdapat sudu dan fluida kerja mengalir melalui ruang di antara sudu tersebut.^[1]

Dua hal yang penting yang selalu menjadi acuan didalam menentukan ukuran utama Turbin pelton ialah kecepatan spesifik (*ns*) dan batas tinggi jatuh yang diinginkan (*Hmaks*), *ns* (*Spesific Speed*) merupakan parameter untuk memilih pompa digunakan oleh para desainer pompa (perencana/perancang pompa).^[2]

Perbandingan *D/d* tidak boleh lebih kecil daripada harga standar. Pengaruh harga ini adalah pada saat pemilihan kecepatan putar roda turbin Pelton dan penentuan jumlah *nozzle* yang digunakan. Diketahui tinggi air jatuh *H* dengan demikian diketahui pula kecepatan air keluar.

Prinsip dari pendimensian turbin Pelton ditentukan oleh diameter jet/ semburan air. Setelah diameter jet diberikan, sebagian dimensi lain dari rotor dapat diperoleh dengan bantuan rumus. Ukuran diameter jet menentukan minimum ukuran *bucket*, yang memberikan ukuran rotor dan ukuran seluruh bagian turbin.^[9]

Dalam beberapa kasus dimungkinkan memasang turbin dengan *bucket* yang lebih besar dari yang diperlukan. Hal ini tidak mengurangi keseluruhan efisiensi secara signifikan jika *over-dimensioning* dijaga dalam batas-batas tertentu.^[9]

Untuk menentukan ukuran sebuah turbin, dua dari tiga parameter yaitu *Power* (*P*), *Discharge/debit* (*Q*) dan *Head nett* (*Hn*) harus diketahui, maka parameter yang ketiga dapat dihitung.^[2]

Pekerjaan tersulit dalam membuat turbin pelton adalah membuat *bucket*, karena jika *bucket* ini pecah saat beroperasi akan

menimbulkan bahaya. Itulah sebabnya mengapa lebih disarankan membeli *bucket* dari pabrik.^[7]

Proses rekayasa peniruan (*reverse engineering*) merupakan suatu proses untuk menemukan kembali teknologi, prinsip kerja, dan/atau sistem suatu produk/objek berupa alat, perkakas, mesin (keseluruhan atau bagiannya) melalui analisis struktur, fungsi, dan cara kerjanya, serta perkiraan atau penafsiran mengenai bagaimana produk itu dahulu dibuat.^[10]

Tujuan atau alasan untuk melakukan rekayasa peniruan antara lain:^[10]

- Mengganti suku cadang,
- Menggabung dengan peralatan atau sistem lain,
- Pembuatan dokumen perancangan, karena ketiadaan/kekurang lengkapan dokumen perancangan yang ada,
- Pengganti produk/sistem lama,
- Pembuatan prosedur pengoperasian dan pemeliharaan dari produk/sistem lama.
- Penelaahan suatu produk/sistem dari aspek pelanggaran paten,
- Analisis nilai (*value engineering*) dalam rangka penekanan harga,
- Pembaruan perangkat lunak (*software*),
- Pengauditan proses perancangan, pembuatan, pemakaian, dan/atau pemeliharaan,
- Perwujudan produk tiruan untuk meraih pangsa pasar,
- Kegiatan akademik, proyek/hibah penelitian, dan/atau
- Merancang dengan prosedur yang benar.

Berdasarkan rekaman produksi dari *prototype*, maka dilakukan evaluasi untuk memperbaiki rancangan komponennya. Perbaikan bisa dikategorikan sebagai perbaikan minor sampai dengan mayor. Perbaikan mayor merupakan pertanda akan perlunya perancangan ulang (*redesign*). Berbekal dengan pengalaman produksi *prototype* perlu dikaji akan kemungkinan pemanfaatan beberapa teknologi pengganti atau teknologi terbaru yang bisa diterapkan.

Teori Analisis Regresi

Regresi adalah suatu metode analisis statistik yang digunakan untuk melihat pengaruh antara dua atau lebih variabel. Hubungan variabel tersebut bersifat fungsional yang diwujudkan dalam suatu model matematis.^[3]

Pada analisis regresi, variabel dibedakan menjadi dua bagian, yaitu variabel respons (*response variable*) atau biasa juga disebut variabel bergantung (*dependent variable*) dan juga variabel *explanory* atau biasa disebut penduga (*predictor variable*) atau disebut juga variabel bebas (*independent variabel*).^[4]

Jenis-jenis regresi terbagi menjadi beberapa jenis, yaitu regresi sederhana (linier sederhana dan nonlinier sederhana) dan regresi berganda (linier berganda atau nonlinier berganda).^[4]

Analisis regresi digunakan hampir pada semua bidang kehidupan, baik dalam bidang pertanian, ekonomi dan keuangan, industri dan ketenagakerjaan, sejarah, pemerintahan, ilmu lingkungan, dan sebagainya. Kegunaan analisis regresi di antaranya untuk mengetahui variabel-variabel kunci yang memiliki pengaruh terhadap suatu variabel bergantung, pemodelan, serta pendugaan (*estimation*) atau peramalan (*forecasting*).

Adapun beberapa tahap-tahap dalam melakukan analisis regresi, meliputi: perumusan permasalahan, penyeleksian variabel potensial yang relevan, pengumpulan data, spesifikasi model, pemilihan metode yang tepat, *model fitting*, validasi model dan penerapan model terpilih untuk penyelesaian permasalahan.

Secara umum, analisis regresi pada dasarnya adalah studi mengenai ketergantungan satu variabel *dependent* (terikat) dengan satu atau lebih variabel *independent* (variabel penjelas atau bebas), dengan tujuan untuk mengestimasi dan/ atau memprediksi nilai rata-rata populasi atau nilai rata-rata dari variabel dependen berdasarkan nilai variabel independen yang diketahui. Pusat perhatiannya adalah pada upaya dalam menjelaskan dan mengevaluasi hubungan antara suatu variabel dengan satu atau lebih variabel independen.^[5]

Hasil analisis regresi adalah berupa koefisien regresi untuk masing-masing variabel independen. Pada koefisien ini diperoleh dengan cara memprediksi nilai variabel dependen dengan suatu persamaan. Koefisien regresi dihitung dengan dua tujuan sekaligus; Pertama, meminimumkan penyimpangan antara nilai aktual dan nilai estimasi variabel dependennya ; Kedua, mengoptimalkan korelasi antara nilai actual dan nilai estimasi variabel dependen berdasarkan data yang ada. Teknik estimasi variabel dependen yang melandasi

analisis regresi disebut *Ordinary Least Squares* (pangkat kuadrat terkecil biasa).^[11]

Korelasi merupakan teknik analisis yang termasuk dalam salah satu teknik pengukuran asosiasi/hubungan (*measures of association*). Pengukuran asosiasi merupakan istilah umum yang mengacu pada sekelompok teknik dalam statistik yang digunakan untuk mengukur kekuatan hubungan antara dua variabel.

Dua variabel dikatakan berasosiasi apabila perilaku variabel yang satu dapat mempengaruhi variabel yang lain. Jika tidak terjadi pengaruh, maka kedua variabel tersebut disebut independen. Korelasi bermanfaat untuk mengukur kekuatan hubungan antara dua variabel (kadang lebih dari dua variabel) dengan skala-skala tertentu. Kuat lemah hubungan diukur diantara jarak (*range*) 0 sampai dengan 1.

Korelasi mempunyai kemungkinan pengujian hipotesis dua arah (*two tailed*). Korelasi searah jika nilai koefisien korelasi diketemukan positif; sebaliknya jika nilai koefisien korelasi negatif, korelasi disebut tidak searah.

Yang dimaksud dengan koefisien korelasi ialah suatu pengukuran statistik kovariasi atau asosiasi antara dua variabel. Jika koefisien korelasi diketemukan tidak sama dengan nol (0), maka terdapat ketergantungan antara dua variabel tersebut. Jika koefisien korelasi diketemukan +1, maka hubungan tersebut disebut sebagai korelasi sempurna atau hubungan linear sempurna dengan nilai kemiringan (*slope*) positif.^[5]

Jika koefisien korelasi diketemukan adalah -1, maka hubungan tersebut disebut sebagai korelasi sempurna atau hubungan linear sempurna dengan kemiringan (*slope*) negatif. Dalam korelasi sempurna tidak diperlukan lagi pengujian hipotesis, karena kedua variabel mempunyai hubungan linear yang sempurna.

Artinya variabel X mempengaruhi variabel Y secara sempurna. Jika korelasi sama dengan nol (0), maka tidak terdapat hubungan antara kedua variabel tersebut. Dalam korelasi sebenarnya tidak dikenal istilah variabel bebas dan variabel tergantung.

Biasanya dalam suatu penghitungan digunakan simbol X untuk variabel pertama dan Y untuk variabel kedua. Dalam contoh hubungan antara variabel remunerasi dengan kepuasan kerja, maka variabel remunerasi

merupakan variabel X dan kepuasan kerja merupakan variabel Y.

Analisa regresi mempelajari bentuk hubungan antara satu atau lebih peubah bebas (X) dengan satu peubah tak bebas (Y). Bentuk hubungan antara peubah bebas (X) dengan peubah tak bebas (Y) bisa dalam bentuk polinom derajat satu (*linear*) polinom derajat dua (kuadratik).

Polinim derajat tiga (Kubik) dan seterusnya. Disamping itu bisa juga dalam bentuk lain misalnya eksponensial, logaritma, *sigmoid* dan sebagainya. Bentuk-bentuk ini dalam analisis regresi-korelasi biasanya ditransformasi supaya menjadi bentuk polinom. Dalam bentuk yang paling sederhana yaitu satu peubah bebas (X) dengan satu peubah tak bebas (Y) mempunyai persamaan:

$$Y = a + bx$$

a disebut intersep dan b koefisien arah.

Dalam pengertian fungsi persamaan garis $Y = a + bx$ hanya ada satu yang dapat dibentuk dari dua buah titik dengan koordinat yang berbeda yaitu (X_1, Y_1) dan (X_2, Y_2) . Hal ini berarti kita bisa membuat banyak sekali persamaan garis dalam bentuk lain melalui dua buah titik yang berbeda koordinatnya/tidak berimpit.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Balai Besar Logam dan Mesin pada tahun 2014. Adapun alur proses pelaksanaan kegiatan perancangan sebuah Turbin Pelton kapasitas 200 KW dan pembuatan scale down *prototype* terlihat pada Gambar 2 dibawah ini:

Gambar 2. Alur proses pelaksanaan kegiatan

Scale Down Prototype

Dari hasil *scanning 3D* diperoleh data untuk perhitungan analisis untuk mendapatkan data-data *range* laju aliran pada ketinggian tertentu. Ketinggian yang diambil berdasar pada kemampuan pompa yang ada di pasaran. Hasil analisis ini akan diperoleh ns turbin yang menjadi ciri khas atau karakteristik dari suatu turbin.^[9]

Dari hasil *scan* dibuat *surface* dan *solid model 3D*, setelah itu dibuatkan model analisis dari model 3D yang telah diperoleh tersebut. Parameter input untuk analisis berdasarkan hasil perhitungan analitis dan kondisi lingkungan.

Asumsi yang digunakan dalam pembuatan prototip berdasarkan produk yang ada di lapangan sebagai berikut:^{[2], [13]}

- Head pompa maksimum (H) = 10 m (OD = 2 inch)
- Diameter *nozzle* (d) = 14 mm
- Putaran *synchronous generator* (n) = 1450 rpm
- Data-data geometri *runner bucket* turbin berdasarkan hasil pengukuran model prototip.

Output dari hasil proses simulasi berupa performa dari model turbin. Hasil dari simulasi tersebut kemudian akan dibandingkan dengan produk hasil pengujian pada prototip. Perbedaan antara hasil perhitungan dan pengukuran akan menjadi validasi pemodelan untuk simulasi. Jika perbedaannya terlalu besar, model simulasi harus direvisi sampai perbedaan memenuhi toleransi yang ditetapkan. Jika sudah memenuhi, maka pemodelan *scale down* ini dapat dipakai untuk pemodelan turbin pelton kapasitas 200kW.

Gambar 3. Skema alir proses turbin pelton

Pada Gambar 3 menunjukkan alur proses pada prototip turbin dari sumber air sampai menghasilkan alur listrik (pada lingkungan yang relevan). Detil fungsinya sebagai berikut:^{[1], [2], [9]}

1. Wadah, berfungsi untuk tempat penampungan dan tempat sirkulasi air/fluida.
2. Pompa, berfungsi sebagai suatu alat untuk mengalirkan fluida. Pompa yang digunakan harus memenuhi persyaratan yang ditentukan sesuai dengan perhitungan desain dari turbin pelton. Persyaratan yang harus dipenuhi untuk pompa pada desain turbin pelton ini, yaitu: Q = 240 lps dan Head = 15 m.
3. *Flow Meter* yang berfungsi untuk mengetahui nilai aliran air/debit air pada pipa (Q). Untuk mengatur debit dengan mengatur katup *by pass* yang ada pada sistem pemipaan yang ada.

4. *Pressure Gauge*, berfungsi sebagai alat untuk mengetahui nilai tekanan (P) yang ada dalam sistem yang sedang persirkulasi.
5. *Nozzle*, *Nozzle* ini di desain dengan menggunakan perhitungan tertentu, hingga memancarkan/menyemburkan air dengan bentuk dan ukuran tertentu yang memiliki nilai efisiensi terbaik untuk menggerakkan runner turbin pelton. *Nozzle* pada desain turbin pelton ini memiliki nilai persyaratan dengan diameter 14 mm.^[8]
6. *Turbin Runner*, Runner pada turbin pelton memiliki nilai persyaratan yang ketat, karena pada runner ini merupakan komponen yang memiliki karakteristik kunci dari siklus pembangkit listrik pada turbin pelton. Pada turbin pelton, *runner* dibagi menjadi 2 bagian: *disk runner* dan *bucket*.^[8]
7. *Disk Runner* yang dipersyaratkan untuk desain turbin pelton yang sedang dikembangkan saat ini memiliki nilai efektif dengan diameter 116 mm. Kemudian untuk persyaratan geometri *bucket* lebih kompleks. Selain memiliki persyaratan dimensi panjang (p) dan lebar (l) sesuai dengan nilai perhitungan dari desain turbin pelton, *bucket* ini harus dihitung juga nilai sudut segitiga kecepatan aliran masuk (Vw1) dan aliran keluar (Vw2). Nilai perhitungan tersebut sangatlah mempengaruhi performa dari turbin pelton untuk menghasilkan listrik yang efisien.
8. *Tacho Meter*, alat yang berfungsi untuk mengetahui nilai putaran yang dihasilkan oleh *runner* pelton dalam skala putaran per menit (rpm).
9. *Synchronous Generator*, alat ini berfungsi sebagai alat yang jika diputar dengan kecepatan tertentu akan menghasilkan daya listrik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Prototip

Pengujian terhadap *scale down* turbin pelton dilakukan dengan membandingkan antara beban, putaran generator, tegangan, arus, dan frekuensi. Beban yang digunakan berupa lampu Phillip sebanyak 10 buah, (1 lampu @ 100 watt, 220-240 V).

Pengukuran dimulai ketika kondisi tanpa beban. Parameter yang diukur adalah jumlah beban, putaran generator, tegangan, arus, dan frekuensi. Pengukuran dilakukan berurutan secara bertahap dari mulai tanpa beban, 1 beban, dan seterusnya sampai 10 beban, lalu

berbalik dari 10 beban, 9 beban, dan seterusnya sampai kembali lagi tanpa beban. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Pengujian pembebanan (tanpa travo step up)

No	Jumlah Lampu	Putaran (rpm)	Daya (watt)	Tegangan (volt)	Arus (A)	Frekuensi (hertz)
1	0	1285	0	134	0	0
2	1	1169	37	115.2	0.31	39.5
3	2	1088	58	102	0.57	37
4	3	1022	70	88.6	0.79	34.6
5	4	943	79	79.9	0.99	31.8
6	5	877	81	70.4	1.15	0
7	6	826	87	65.4	1.34	0
8	7	783	85	58.2	1.46	0
9	8	744	79	50.7	1.55	0
10	9	716	76	46	1.65	0
11	10	692	73	41.8	1.76	0
12	9	720	75	45.6	1.64	0
13	8	753	79	51	1.55	0
14	7	791	86	58.5	1.48	0
15	6	837	86	64.7	1.37	0
16	5	888	80	69.7	1.14	0
17	4	955	78	79.3	0.99	31.4
18	3	1036	69	87.3	0.78	34.1
19	2	1108	56	99.6	0.56	36.4
20	1	1190	35	118	0.31	39
21	0	1275	0	134.7	0	0

Catatan: Saat di hubungan ke step up trafo rpm = 1056 (tanpa beban)

Selain pengujian dengan beban, pengujian juga dilakukan tanpa beban. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh besarnya bukaan katup *by pass* terhadap putaran generator dan tegangan yang dihasilkan. Hasil pengujian tanpa beban ini dapat dilihat di Tabel 2 berikut:

Tabel 2. Pengujian tanpa beban

No.	Kondisi Katup by pass	Putaran (rpm)	Tegangan (volt)
1.	Tertutup	1285	133
2.	1/2 terbuka	1270	131
3.	Terbuka	1205	114

Pembahasan

Dari hasil pengujian pembebanan yang telah dilakukan oleh tim kegiatan litbang perancangan turbin pelton, maka didapatkan beberapa grafik pengujian.

Analisa Perbandingan Pengukuran

Dari Grafik 1 dibawah ini, diketahui bahwa semakin banyak beban lampu yang terpasang pada rangkaian maka torsi yang dihasilkan generator semakin tinggi, sehingga nilai putaran pada poros runner semakin rendah.

Grafik 1. Jumlah beban lampu dan nilai putaran

Pada Grafik 2 dibawah ini, diketahui bahwa semakin banyak beban lampu yang terpasang pada rangkaian maka sesuai dengan grafik sebelumnya, nilai tegangan semakin rendah. Hal ini akan menyebabkan nilai tegangan yang dihasilkan oleh generator semakin rendah juga. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa nilai tegangan berbanding lurus pada putaran generator.

Grafik 2. Jumlah beban lampu dan nilai tegangan

Grafik 3. Nilai arus (*ampere*) dan nilai daya (*watt*)

Pada Grafik 3 diatas, yang diperoleh dari hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa besarnya nilai daya yang dihasilkan generator tidak selalu berbanding lurus dengan besarnya tegangan yang diberikan. Hal ini disebabkan karena turunnya tegangan yang dihasilkan *generator* akibat dari nilai putaran (rpm) poros *runner* yang semakin rendah.

Dibawah ini perhitungan torsi pada prototipe turbin pelton dengan rumus:

$$P = T \cdot \omega \quad \text{dimana} \quad \omega = 2\pi \cdot n / 60$$

sehingga $P = T \cdot 2\pi \cdot n / 60$
maka:

$$T = \frac{P}{2\pi \cdot n / 60} \Rightarrow T = \frac{P \cdot 60}{2\pi \cdot n}$$

dimana: P = Daya (*watt*)

ω = Putara sudu (rad/s)

T = Momen torsi (N.M)

n = Putaran rotor (rpm)

Dengan mengkonversi satuan torsi dan daya, didapat rumus seperti dibawah ini:

$$T = \frac{P \cdot 5252}{n}$$

Dimana: T = torsi (ft .lb)
P = Daya (Hp)
N = Putaran (rpm)

Pembuktian teori/rumus diatas dengan data hasil pengujian *prototype* Turbin Pelton:^[12]

$$\text{dari rumus : } n = \frac{120 \cdot F}{P}$$

dimana :

n = Putaran *Generator* (rpm)

F = Frekuensi (Hz)

P = Jumlah kutub (Pole), pada *generator* yang digunakan P = 4 $\rightarrow$ 1450 rpm

Pada data hasil pengujian pembebanan yang jumlah lampu hanya 1, didapat data:

$n = 1169 \text{ rpm}$

$F = 39 \text{ Hz}$

maka apabila disubstitusikan dengan rumus diatas, yaitu sbb:

$$n = \frac{120 - F}{P} \rightarrow n = \frac{120 - 39}{4} = 1170 \text{ rpm}$$

Dapat dibandingkan pula bahwa kecepatan putaran dari data hasil pengujian pembebanan sama dengan kecepatan putaran hasil perhitungan. Berdasarkan data hasil pengujian pembebanan dan hasil pembuktian dengan rumus/teori, maka dapat disimpulkan bahwa: *Prototype* turbin Pelton dengan diameter turbin 116 mm, ukuran nozzle 14mm dapat membangkitkan tenaga listrik, dengan tegangan yang dihasilkan sebesar 118 Volt dengan daya sebesar 37 Watt pada generator 1169 rpm.

Analisis Regresi

Dari tabel pengujian pembebanan, dapat dianalisa secara regresi hubungan daya terhadap jumlah lampu, pada Grafik 4 di bawah ini dapat dilihat bahwa semakin besar daya maka semakin banyak lampu yang menyala, namun optimal pada kondisi 6 lampu, untuk lebih dari 6 lampu, daya menurun. Sehingga dapat dianalisa bahwa kondisi optimalnya adalah pada 6 lampu.

Persamaan regresi yang diperoleh adalah polynomial $y = -7E-05x^6 + 0,0109x^5 - 0,2659x^4 + 2,6654x^3 - 14,545x^2 + 49,34x - 0,0457$ dengan nilai koefisien korelasi, $R^2 = 0,9984$.

Dengan nilai koefisien korelasi tersebut, dapat diketahui bahwa masih terdapat kesalahan pada data yang diperoleh, hal ini dapat terjadi pada saat pengambilan data. seperti ditunjukkan pada Grafik 4 di bawah ini:

Grafik 4. Fungsi daya terhadap jumlah lampu

Dari tabel pengujian pembebanan juga dapat dianalisis hubungan antara putaran alternator (rpm) dan jumlah lampu, seperti Grafik 5 berikut ini:

Grafik 5. Fungsi putaran alternator terhadap jumlah lampu

Pada Grafik 5 di atas dapat dilihat bahwa semakin banyak lampu yang menyala maka kecepatan putaran alternator semakin kecil.

Persamaan regresi yang diperoleh adalah polynomial $y = 0,008x^6 - 0,2616x^5 + 3,2786x^4 - 19,451x^3 + 58,51x^2 - 158,8x + 1285,1$ dengan nilai koefisien korelasi, $R^2 = 0,9999$.

Dengan nilai koefisien korelasi tersebut, dapat diketahui bahwa persamaan regresi yang diperoleh telah mendekati nilai yang sebenarnya didapat dari hasil pengujian. Sehingga persamaan regresi tersebut dapat digunakan untuk keperluan perancangan berikutnya.

Dari tabel pengujian pembebanan juga dapat dianalisa hubungan antara daya dan rpm, seperti Grafik 6 di bawah ini:

Grafik 6. Fungsi daya terhadap putaran alternator

Dari Grafik 6 tersebut dapat dilihat bahwa kecepatan putaran *alternator* yang optimal menghasilkan daya maksimum adalah pada 826 rpm dengan menghasilkan daya 87 watt.

Persamaan regresi yang diperoleh adalah *polynomial* $y = 6E-14x^6 - 3E-10x^5 + 8E-07x^4 - 0,001x^3 + 0,7089x^2 - 259,63x + 39140$ dengan nilai koefisien korelasi, $R^2 = 0,998$.

Dengan nilai koefisien korelasi tersebut, dapat diketahui bahwa persamaan regresi yang diperoleh telah mendekati nilai yang sebenarnya didapat dari hasil pengujian. Sehingga persamaan regresi tersebut dapat digunakan untuk keperluan perancangan berikutnya.

Dari tabel perhitungan torsi turbin pelton dapat dianalisa hubungan antara torsi dan rpm, seperti Grafik 7 di bawah ini:

Grafik 7. Fungsi torsi terhadap putaran alternator

Pada Grafik 7 diatas dapat dilihat bahwa hubungan torsi terhadap putaran alternator bersifat fluktuatif, Persamaan regresi yang diperoleh adalah *polynomial* $y = 8E-15x^6 - 4E-11x^5 + 1E-07x^4 - 0,0001x^3 + 0,0809x^2 - 28,753x + 4223,6$ dengan nilai koefisien korelasinya $R^2 = 0,8659$.

Dengan nilai koefisien korelasi tersebut dapat diketahui bahwa masih terdapat kesalahan pengambilan data, sehingga persamaan regresi tersebut belum bisa dijadikan acuan untuk perancangan berikutnya.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari pengujian pembebanan dan perhitungan torsi turbin pelton didapat analisis secara regresi hubungan putaran *alternator* (rpm) terhadap jumlah lampu dengan koefisien korelasinya $R^2 = 0,9999$

dan analisis regresi hubungan putaran *alternator* terhadap daya yang dihasilkan diperoleh hubungan *polynomial* dengan koefisien korelasinya $R^2 = 0,9998$ maka dapat diketahui bahwa persamaan regresi yang diperoleh telah mendekati nilai yang sebenarnya didapat dari hasil pengujian, sehingga persamaan regresi tersebut dapat digunakan untuk keperluan perancangan berikutnya.

Sedangkan analisis regresi hubungan daya terhadap jumlah lampu dengan nilai koefisien korelasinya $R^2 = 0,9984$ dan analisis regresi hubungan putaran *alternator* terhadap torsi dengan koefisien korelasinya $R^2 = 0,8659$ maka dapat diketahui bahwa masih terdapat kesalahan pada data yang diperoleh, hal tersebut dapat terjadi pada saat pengambilan data.

Dari data pengujian bahwa semakin besar daya pengisian *alternator* maka semakin banyak pula lampu yang menyala, namun optimal pada kondisi 6 buah lampu, untuk lebih dari 6 buah lampu, maka daya akan menurun, sehingga dapat dianalisis bahwa kondisi optimalnya pada 6 buah lampu.

Semakin banyak jumlah lampu yang menyala, maka kecepatan putaran *alternator* akan semakin kecil.

Kecepatan putaran *alternator* yang optimal yaitu pada 826 rpm menghasilkan daya maksimum sebesar 87 watt.

Saran

Dari penelitian ini disarankan untuk perbaikan kegiatan penelitian *prototype* turbin pelton yaitu diperlukan pompa yang lebih besar dayanya untuk mengetahui kapasitas maksimum dari turbin pelton berdiameter 116 mm. Disarankan juga untuk menggunakan *generator* sinkron yang mempunyai putaran nominalnya 900 rpm (2 Pole).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya, khususnya kepada Bpk. Ir. Eddy Siswanto, MAM. dan Bpk. Agus Budiman, ST. yang telah banyak memberikan motivasi dan sumbangan pikirannya serta semua pihak pada umumnya yang telah membantu dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Allen R. Inversin, 1980, A *Pelton Micro-Hydro Prototype Design*, Appropriate Technology Development Institute UNITECH.
- [2]. Amod Panthee, Hari Prasad Neopane, Bhola Thapa, 2014, *CFD Analysis of Pelton Runner*, International Journal of Scientific and Research Publications.
- [3]. Birkes, David and Yadolah Dodge, *Alternative Methods of Regression*. ISBN 0-471-56881-3.
- [4]. Draper, N.R. and Smith, H. (1998). *Applied Regression Analysis Wiley Series in Probability and Statistics*.
- [5]. Evan J. Williams, " *I. Regression*," pp. 523–41.
- [6]. Hadimi, Supandi dan Agus Rohermanto, 2006, *Rancang Bangun Model Turbin Pelton Mini Sebagai Media Simulasi/Praktikum Mata Kuliah Konversi Energi Dan Mekanika Fluida*, Jurnal Ilmiah Semesta Teknika.
- [7]. Kjartan Furnes, 2013, *Thesis: Flow In Pelton Turbines*, Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology.
- [8]. Markus Eisenring, 1991, *Micro Pelton Turbines*, SKAT, Swiss Center for Appropriate Technology, StGallen, Switzerland.
- [9]. Prakash K. Dhakan, Abdul Basheer Pombra Chalil, 2013, *Design And Construction Of Main Casing For Four Jet Vertical Pelton Turbine*, Hydrel Research and Development Centre, Jyoti Limited, Vadodara, India.
- [10]. Taufiq Rochim, 1999, *Tujuh Tahapan Dalam Rekayasa Peniruan*, MPE (*Mechanical Production Engineering*), FTMD-ITB.
- [11]. William H. Kruskal and Judith M. Tanur, ed. (1978), " *Linear Hypotheses*," International Encyclopedia of Statistics. Free Press, v. 1,
- [12]. Winther J.B., 1975, *Dynamometer Handbook Basic Theory and Principles*, Cleveland Ohio.
- [13]. IEC 60193, 1999 - 11, *Hydraulic Turbines, Storage Pumps and Pump-Turbines - Model Acceptance Tests*, International Standard, second edition.