

METODE LOGIKA FUZZY SEBAGAI EVALUASI DISTRIBUSI DAYA LISTRIK BERDASARKAN BEBAN PUNCAK PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK

Fifi D. Rosalina¹, Yuniar Farida², Abdulloh Hamid³

Universitas Islam Negeri Sunan Ampel, Surabaya, Indonesia^{1,2,3}.

E-mail: fifid.rosalina@gmail.com¹, greatyuniar@gmail.co.id², doelhamid@uinsby.ac.id³.

Abstrak

Evaluasi beban puncak pada sistem tenaga listrik yang dibangkitkan sangat berpengaruh terhadap perkembangan ketersediaan tenaga listrik di berbagai provinsi. Dengan meninjau beban puncak selama satu tahun, dapat diimplementasikan terhadap evaluasi pembangkitan energi listrik sebagai simulasi ketersediaan energi listrik untuk kedepannya. Mengevaluasi beban puncak juga bergantung terhadap beberapa faktor seperti kapasitas terpasang, daya mampu, dan hasil produksi pada beberapa sistem pembangkit. Hal tersebut dapat menjadi kontrol dari daya-daya yang dihasilkan pada masing-masing pembangkit listrik seperti PLTA, PLTU, PLTN, PLTG, dan PLTS. Metode logika fuzzy merupakan metode yang efektif yang dapat diaplikasikan untuk mengevaluasi beban puncak dengan tingkat keakuratan yang tinggi. Dengan begitu pemenuhan akan tenaga listrik akan terpenuhi dengan tingkat keandalan yang diinginkan. Dari evaluasi tersebut output yang dihasilkan dapat dijadikan sebagai kontrol untuk keamanan dari sistem pembangkit. Dengan hasil yang diperoleh adalah tingkat error tertinggi mencapai 60% dan telah dilakukan training dan testing data sebanyak 4x untuk menguji parameter dari fungsi keanggotaan yang telah ditentukan dengan hasil *recognize* tertinggi sebesar 12,5%.

Kata kunci: *Beban puncak, evaluasi, logika fuzzy.*

Abstract

Evaluation of peak load on the power system is raised very influential on the development of electric power availability in the various provinces. By reviewing the peak load for a year, can be implemented for the evaluation of power generation as a simulation of the electrical energy supply for the future. Evaluating the peak load also depends on several factors such as installed capacity, power capacity, and production at some plants systems. It can be the control of the forces generated on each such PLTA, PLTU, PLTG, and PLTS. Fuzzy logic method is an effective method that can be applied to evaluate peak loads with high accuracy. Thus the fulfillment of the electricity will be met with the desired reliability level. The evaluation of the resulting output can be used as a control for the security of the power system. With the results obtained is the highest error rate reached 60%, and has done training and testing data is as much as 4x to test the parameters of the membership function has been determined by the highest recognize result of 12.5%.

Key word: *Peak load, evaluation, fuzzy logic.*

1. Pendahuluan

Indonesia sebagai salah satu negara yang memiliki jumlah penduduk terpadat dunia, tentu untuk menjadi negara yang makmur dibutuhkan sistem yang baik untuk menunjang kebutuhan akan warganya. Tenaga pembangkit listrik salah satunya,

dimana dibutuhkan ketersediaan energi yang tinggi dan lebih sesuai yang harus diproduksi dengan kapasitas yang sangat besar. Untuk menjembatani permasalahan tersebut dengan mengevaluasi setiap produksi dalam pembangkitan energi listrik dan faktor-faktor yang mempengaruhi dapat dilakukan dengan menggunakan metode matematis. Berbagai

penelitian terkait tentang kemajuan dalam bidang pembangkit tenaga listrik baik dalam ketersediaan energi, sistem transmisi, pengembangan sumber energi dan lain sebagainya sudah dilakukan dan hasilnya dapat dijadikan sebagai pengambilan kebijakan dari pihak tertentu. Ketersediaan tenaga listrik di Indonesia masih menjadi tugas penting dalam pelaksanaan perkembangannya, dimana di berbagai wilayah masih terdapat beberapa daerah yang belum terpasok sumber energi listrik sebagai pemenuhan kebutuhan hidup. Namun, berbagai upaya telah dilakukan oleh PT. PLN untuk memperbaiki ketersediaan tenaga listrik dengan membangun sarana-sarana untuk mengoptimalkan hasil produksi agar dapat terdistribusi ke semua daerah termasuk daerah terpencil dan daerah pedalaman. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 14 tahun 2012 tentang Kegiatan Usaha Penyediaan Tenaga Listrik yang menyatakan "Usaha Penyediaan Tenaga Listrik untuk kepentingan umum dilaksanakan sesuai dengan Rencana Umum Ketenagakerjaan dan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL)". Dengan adanya rencana tersebut, sistem evaluasi berlaku sebagai metode yang efektif dalam penyelesaian permasalahan diatas termasuk efisiensi energi.

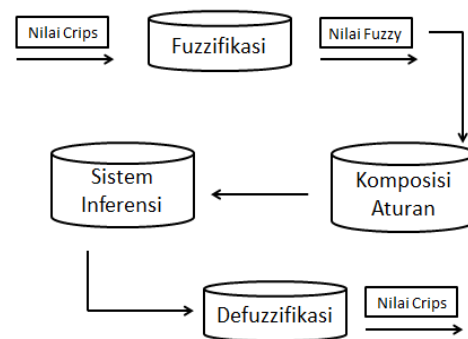
Karena kesulitan yang dihadapi selama pengujian jika harus dilakukan secara langsung, mengembangkan model evaluasi untuk memperkirakan beban puncak pada waktu yang akan datang berdasarkan parameter yang mempengaruhi akan selalu menarik untuk diteliti [1,2]. Beberapa penelitian yang dilakukan dengan metode yang berbeda telah banyak dilakukan seperti prediksi beban listrik menggunakan kecerdasan buatan. Diantaranya prediksi beban listrik di pulau Bali menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan *Backpropagation* [3] serta peramalan beban listrik jangka pendek pada sistem kelistrikan Jawa Timur dan Bali menggunakan *fuzzy time series* [4]. Salah satu metode yang dapat diimplementasikan untuk mengevaluasi suatu kejadian sebagai perbaikan kebijakan pada kejadian yang akan datang juga dapat dilakukan menggunakan metode logika fuzzy seperti FIS Mamdani,

Tsukamoto, Sugeno, Fuzzy C-Means, Clustering, dan analisis regresi linier.

Aplikasi logika fuzzy sebagai pendukung keputusan kini semakin diperlukan tatkala semakin banyak kondisi yang menuntut adanya keputusan yang tidak hanya bisa dijawab dengan 'ya' atau 'tidak' [5]. Dari aplikasi logika fuzzy tersebut, metode yang akan digunakan adalah metode mamdani karena memiliki keakuratan dan kemampuan meramal yang lebih baik. Hasilnya akan dibandingkan dengan hasil yang terdapat pada PT. PLN. Parameter yang dijadikan sebagai dasar dari perhitungan tersebut meliputi: kapasitas terpasang, daya mampu, dan produksi.

2. Tinjauan Pustaka

Teori himpunan fuzzy diperkenalkan oleh Zadeh (1965) untuk menangani konsepsi ketidakpastian akibat ketidaktepatan dan ketidakjelasan [6]. Dalam aplikasinya fuzzy dapat di implementasikan terhadap data-data yang kurang valid atau data-data yang bersifat linguistik yang ditetapkan oleh fungsi keanggotaan. Hal ini berbeda dengan perhitungan secara tradisional yang hanya menghendaki nilai interval antara 0 dan 1.



Gambar 1. Sistem Fuzzy

dalam penyelesaiannya himpunan fuzzy mengaitkan 4 metode penyelesaian dimana di antaranya adalah fuzzifikasi, komposisi aturan, sistem inferensi, dan defuzzifikasi. Representasi dari sistem fuzzy dapat diekspresikan pada Gambar 1.

2.1 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan suatu proses yang mengubah nilai crisp menjadi nilai fuzzy yang diterapkan terhadap suatu fungsi keanggotaan yang telah ditentukan. Fuzzifikasi dapat dipenuhi dengan salah satu bentuk kurva fungsi keanggotaan seperti linear, segitiga, trapesium, lonceng, bahu, dan gauss. Bentuk fungsi keanggotaan yang paling umum digunakan adalah jenis linear, trapesium, dan segitiga[7-9]. Variabel-variabel inputan seperti kapasitas terpasang, daya mampu, dan produksi diterapkan terhadap fungsi keanggotaan tersebut beserta variabel-variabel linguistik. Variabel linguistik merupakan suatu penamaan grup yang mewakili suatu keadaan atau kondisi tertentu dengan menggunakan bahasa alami[10]. Untuk menghasilkan nilai keanggotaan berdasarkan proses dari fungsi keanggotaan pada himpunan fuzzy yang menggunakan tipe segitiga dan trapesium dapat diselesaikan berdasarkan persamaan 1 dan persamaan 2 [11]:

$$\mu_A(x) = \max \left[\min \left[\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right], 0 \right] \quad (1)$$

$$\mu_A(x) = \max \left[\min \left[\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right], 0 \right] \quad (2)$$

dimana $\mu(x)$ adalah suatu fungsi keanggotaan dari himpunan fuzzy, dan x merupakan nilai dari parameter output. Sedangkan $a, b, c,$ dan d adalah konstan.

2.2 Komposisi Aturan

Aturan dasar merupakan aplikasi dari sebuah fungsi implikasi yang membentuk pernyataan bersyarat *if then* yang terdiri dari premis dan kesimpulan atau akibat. Banyaknya jumlah rule yang dibuat bergantung dari banyaknya variabel dan fungsi keanggotaan yang digunakan. Rule yang dibuat akan di aplikasikan terhadap sistem inferensi fuzzy untuk mengetahui hasil keputusan. Dalam penyelesaian pada sistem inferensi fuzzy mamdani digunakan fungsi implikasi Min. Namun pada dasarnya fungsi implikasi terdiri dari 3 metode, yaitu min, max, dan probabilistik OR. Untuk masing-masing metode, secara umum dapat dituliskan sebagai berikut[12]:

a. Metode Max (maximum)

$$\mu_{sf}(x_i) = \max(\mu_{sf}(x_i), \mu_{kf}(x_i)) \quad (3)$$

Dengan:

$\mu_{sf}(x_i)$ = nilai keanggotaan solusi fuzzy sampai aturan ke-i.

$\mu_{kf}(x_i)$ = nilai keanggotaan konsekuen fuzzy aturan ke-i.

b. Metode Additive (sum)

$$\mu_{sf}(x_i) = \min(1, \mu_{sf}(x_i) + \mu_{kf}(x_i)) \quad (4)$$

Dengan:

$\mu_{sf}(x_i)$ = nilai keanggotaan solusi fuzzy sampai aturan ke-i.

$\mu_{kf}(x_i)$ = nilai keanggotaan konsekuen fuzzy aturan ke-i.

c. Metode Probabilistik OR

$$\mu_{sf}(x_i) = \left(\mu_{sf}(x_i) + \mu_{kf}(x_i) \right) - \left(\mu_{sf}(x_i) * \mu_{kf}(x_i) \right) \quad (5)$$

Dengan:

$\mu_{sf}(x_i)$ = nilai keanggotaan solusi fuzzy sampai aturan ke-i.

$\mu_{kf}(x_i)$ = nilai keanggotaan konsekuen fuzzy aturan ke-i.

2.3 Sistem Inferensi

Sistem inferensi merupakan langkah yang memetakan input terhadap aturan-aturan yang telah dibuat pada komposisi aturan. Karena aturan yang dibuat antara satu dengan yang lain berbeda maka keputusan yang dihasilkan juga akan berbeda dengan menghasilkan pola yang berbeda pula. Keputusan tersebut dapat dilihat dari daerah hasil yang telah dihasilkan berdasarkan aturan yang telah dibuat. Dari daerah hasil atau pola yang dihasilkan akan diproses kembali menggunakan metode defuzzifikasi.

2.4 Defuzzifikasi

Ketika pada proses yang pertama nilai crisp dipetakan terhadap fungsi keanggotaan sehingga nilai tersebut menjadi sebuah nilai yang difuzzikan, untuk mendapatkan nilai yang sesuai dengan harapan nilai tersebut harus diubah ke bentuk semula, nilai crisp. Proses inilah yang dinamakan dengan defuzzifikasi. Dalam penyelesaian nilai fuzzy ke nilai crisp dapat diselesaikan dengan beberapa metode diantaranya metode Centroid, metode Bisektor, metode Min of Maximum, metode Largest of Maximum, dan metode Smallest

of Maximum. Solusi umum dari masing-masing metode dapat dirumuskan sebagai berikut[13]:

a. Metode Centroid

dilakukan dengan mengambil titik pusat

$$z^* = \frac{\int_z z\mu(z)dz}{\int_z \mu(z)dz} \text{ untuk variabel kontinu} \quad (6)$$

$$z^* = \frac{\sum_{j=1}^n z_j \mu(z_j)}{\sum_{j=1}^n \mu(z_j)} \text{ untuk variabel diskret} \quad (7)$$

b. Metode Biseksi

Keputusan dalam mengubah nilai fuzzy ke nilai crisp ini juga melibatkan komposisi aturan yang telah dibuat yang selanjutnya ditentukan berdasarkan daerah output yang dihasilkan. Secara umum dituliskan[14]:

z_p sedemikian sehingga

$$\int_{\mathbb{R}^1} \mu(z)dz = \int_p^{\mathbb{R}^n} \mu(z)dz \quad (8)$$

3. Metode Penelitian

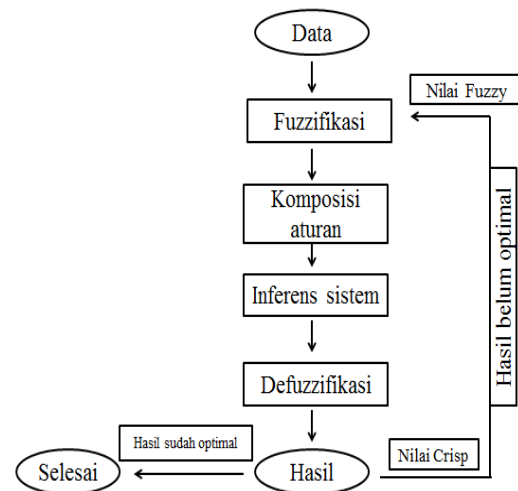
Penyelesaian pada evaluasi suatu beban puncak dalam penelitian ini, sistem fuzzy mamdani digunakan dengan 3 variabel inputan yang berkaitan seperti kapasitas terpasang, daya mampu, dan produksi serta dengan beberapa sample data yang akan diproses menggunakan metode mamdani. Selain menggunakan perhitungan metode mamdani dalam tulisan ini juga menerapkan aplikasi yang tersedia pada MATLAB. Hal ini akan dapat membantu dalam pengambilan keputusan berdasarkan visualisasi yang tersedia seperti rule, surface, dan fungsi keanggotaan. Algoritma metode penelitian yang digunakan dapat dilihat pada gambar 2.

3.1 Data

3.1.1 Identifikasi Variabel

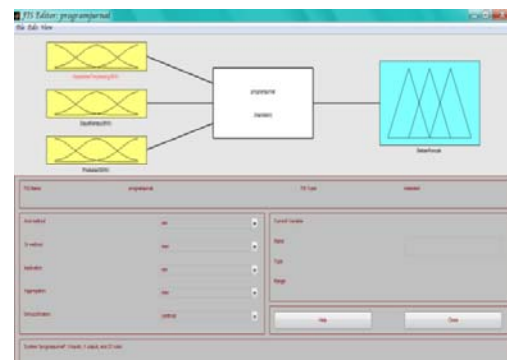
Beberapa data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari data statistik PT.PLN pada tahun 2013 dimana data tersebut diakumulasikan dari beberapa provinsi di seluruh Indonesia. Untuk melakukan prediksi beban puncak pada sistem pembangkit tenaga listrik dalam penelitian ini digunakan 3 variabel masukan dan 1 variabel keluaran. 3 variabel masukan yang digunakan dinilai sangat berpengaruh terhadap hasil evaluasi sistem pembangkit. 3 variabel masukan tersebut adalah kapasitas

terpasang, daya mampu, dan produksi. Sedangkan variabel keluaran adalah beban puncak.



Gambar 2. Algoritma Penyelesaian

Dari hasil keluaran tersebut dijadikan sebagai nilai beban puncak masing-masing daerah yang ditujukan untuk pengembangan sistem-sistem pembangkit energi listrik dan sebagai sistem kontrol dari pembangkit itu sendiri. Variabel tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Variabel.

3.1.2 Pengumpulan data

Mengumpulkan data-data yang berkaitan dengan variabel masukan. Dalam penelitian ini masukan yang digunakan adalah kapasitas terpasang, daya mampu, dan produksi. Data yang digunakan diperoleh dari data statistik PT. PLN (PERSERO) yang di akumulasikan selama 1 tahun yang dihitung pada bulan januari sampai akhir desember

pada tahun 2013 dari berbagai provinsi di Indonesia. Data-data tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Sampling Data

Provinsi	Kapasitas Terpasang (MW)	Daya Mampu (MW)	Produksi Netto (GWh)
1.	113,39	76,08	548,3
2.	88,24	43,54	840,51
3.	221,39	156,47	2.107,09
4.	292,19	252,07	1.730,85
5.	195,61	99,82	809,42
6.	147,61	71,3	512,68
7.	152,59	103,07	1.181,96
8.	100,15	60,71	746,31
9.	171,04	129,47	1.330,07
10.	153,04	107,03	720,6

Keterangan:

1. Wilayah Aceh
2. Wilayah Bangka Belitung
3. Wilayah Kalimantan Barat
4. Sulawesi Utara
5. Wilayah Maluku dan Maluku Utara
6. Maluku
7. Wilayah Papua
8. Papua
9. Wilayah Nusa Tenggara Barat
10. Wilayah Nusa Tenggara Timur

3.2 Fuzzifikasi

Fungsi keanggotaan yang digunakan menggunakan representasi kurva bentuk trapesium. Dalam hal ini variabel-variabel linguistik untuk masing-masing variabel digunakan 3 fungsi keanggotaan yaitu rendah, sedang dan tinggi. Sebagai contoh ditentukan fungsi keanggotaan variabel kapasitas terpasang berdasarkan persamaan 2, diperoleh fungsi keanggotaan sebagai berikut:

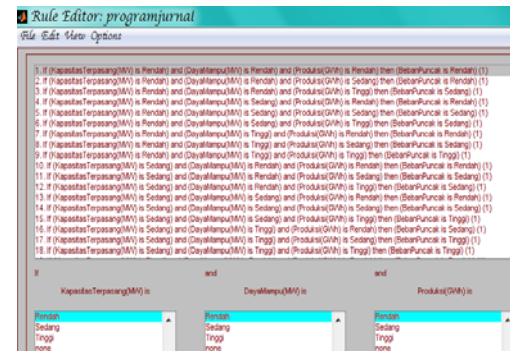
$$\mu_{kkrendah}(x) = \max \left[\min \left[\frac{x-0}{0-0}, 1, \frac{200-x}{200-170} \right], 0 \right]$$

$$\mu_{kssedang}(x) = \max \left[\min \left[\frac{x-170}{200-170}, 1, \frac{370-x}{370-320} \right], 0 \right]$$

$$\mu_{ktinggi}(x) = \max \left[\min \left[\frac{x-320}{370-320}, 1, \frac{520-x}{520-520} \right], 0 \right]$$

3.3 Komposisi Aturan

Karena terdapat 3 variabel masukan dan 1 variabel keluaran dengan 3 variabel linguistik pada fungsi keanggotaan jumlah rule yang didapat ada 27 rule yang membentuk sebuah premis dan konsekuen pada masing-masing rule. Daftar 27 aturan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4 dengan menggunakan aplikasi Matlab.



Gambar 4. Komposisi aturan

3.4 Sistem Inferensi

Pada proses ini dipetakan nilai inputan untuk mendapatkan hasil pola sebagai keputusan dengan melibatkan rule-rule yang telah dibuat. Dalam hal ini digunakan contoh inputan dengan kapasitas terpasang = 260 MW, daya mampu = 185 MW, dan produksi = 2900 GWh.

3.5 Defuzzifikasi

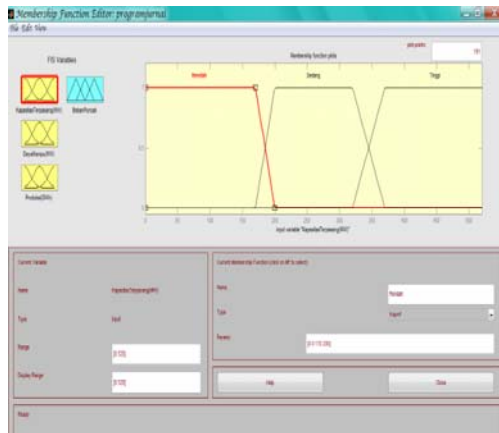
Pada fuzzy metode mamdani untuk menyelesaikan permasalahan ini dipilih metode centroid dengan penyelesaian mengambil titik pusat pada pola yang dihasilkan pada sistem inferensi yang berdasarkan pada persamaan 7.

$$z^* = \frac{\sum_{j=1}^n z_j \mu(z_j)}{\sum_{j=1}^n \mu(z_j)} \text{ untuk variabel diskret } (7)$$

4. Hasil dan Pembahasan

Representasi aplikasi Matlab untuk menunjukkan hasil dari fungsi keanggotaan pada 3 variabel dapat dilihat pada gambar 5. Setelah melalui 4 proses yang telah dilakukan pada aplikasi logika

fuzzy dengan memasukkan contoh inputan data

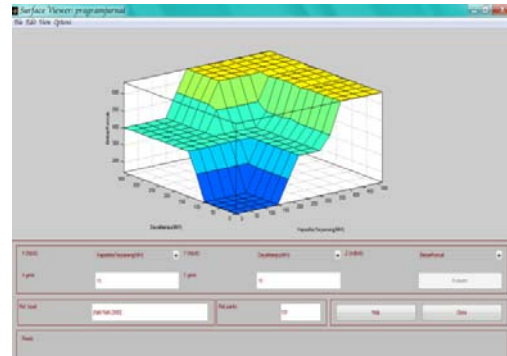


Gambar 5. Fungsi keanggotaan kapasitas terpasang

pada proses sistem inferensi, didapatkan hasil pada gambar 6 tersebut. Hasil yang terdapat pada pola gambar 6 tersebut merupakan hasil yang dapat digunakan untuk evaluasi daya listrik terhadap sistem pembangkit tenaga listrik yang melibatkan 3 variabel masukan dengan masing-masing 3 fungsi keanggotaan hingga mendapatkan komposisi aturan sebanyak 27. Suatu pola surface yang berwarna biru adalah sebagai hasilnya yang dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 6. Sistem Inferensi



Gambar 7. Hasil

Tabel 2. Hasil perbandingan

No.	Fuzzy	PT.PLN	Error
1.	141	265	46.79%
2.	141	148	4.72%
3.	341	213	60.09%
4.	350	236,33	48.09%
5.	143	172,85	17.26%
6.	141	107,7	30.91%
7.	141	204,73	31.12%
8.	141	123,56	14.11%
9.	150	247	39.27%
10.	141	143	1.39%

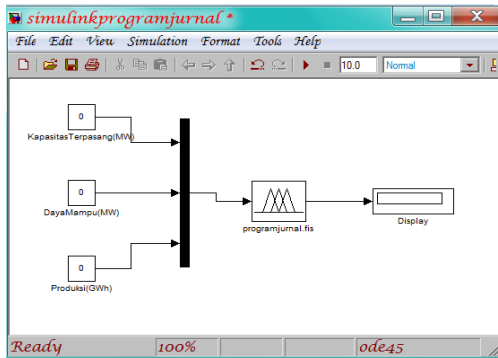
Setelah memperoleh hasil yang diinginkan pada matlab berdasarkan data yang digunakan, selanjutnya kita bandingkan hasil beban puncak dengan menggunakan Matlab dan hasil beban puncak yang terdapat pada PT. PLN(PERSERO) untuk mengetahui keakuratan sistem yang digunakan. Berikut adalah perbandingan hasil beban puncak sistem fuzzy dan data statistik pada tabel 2. Untuk menghitung error gunakan rumus pada persamaan 9 berikut:

$$error = \frac{hasil\ actual - hasil\ simulasi}{hasil\ actual} \times 100\% \quad (9)$$

5. Training dan Testing

Training dan testing pada dasarnya digunakan untuk melihat sejauh mana fungsi keanggotaan yang ditetapkan dapat digunakan pada data testing yang merupakan sebuah data yang berbeda dari data training. Dalam hal ini digunakan aplikasi yang telah disediakan pada

MATLAB yaitu simulink yang dapat dilihat pada gambar 8, dari hasil output yang dihasilkan pada simulink perhatikan apakah hasilnya sama atau tidak pada output menggunakan toolbox dengan menginputkan data testing.



Gambar 8. Simulink

Semakin banyak training dan testing yang dilakukan, maka kita dapat melihat *recognize* terbesar dari training dan testing data untuk melihat ketepatan parameter fungsi keanggotaan yang telah ditetapkan. Dalam penelitian ini dilakukan training dan testing data sebanyak 4x yang dapat dilihat pada tabel 3, dengan hasil *recognize* terbesar yaitu 12,5% pada 20 data training dan 8 data testing yang dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 3. Training dan Testing data

Data Training	Data Testing
20	8
18	10
23	13
15	9

Hasil *recognize* ini diperoleh dari sisi banyaknya data testing yang dapat terdeteksi oleh simulink, dimana hasil simulink dan toolbox harus bernilai sama. Dalam penelitian ini, setelah dihitung error menggunakan rumus 9, didapatkan hasil *recognize* seperti pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Hasil *Recognize*

Data testing 8			
439,82	225,18	2.705,56	376
24,04	18,4	148,16	18,51
147,61	71,3	512,68	107,7
48	28,52	296,74	65,15
32,25	17,4	185,73	35
0,7	0,48	6,39	3,5
88,24	43,54	840,51	148
Recognize : 12,5%			

6. Kesimpulan

Dalam penelitian ini model logika fuzzy menggunakan metode Mamdani digunakan sebagai hasil evaluasi daya listrik pada sistem pembangkit listrik dengan menggunakan 3 faktor yang mempengaruhi yaitu kapasitas terpasang, daya mampu, dan produksi. Namun, berdasarkan data pada tabel 2 diperoleh hasil aplikasi fuzzy yang menghasilkan nilai beban puncak pada 10 sampling data tersebut dengan hasil error tertinggi sebesar 60% dan terendah sebesar 1.39%. Berdasarkan algoritma penelitian pada gambar 2 karena hasil belum optimal atau masih terdapat error yang cukup tinggi, maka harus dilakukan perbaikan pada fungsi keanggotaannya yang telah ditetapkan untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat. Selain dilakukan menggunakan sistem fuzzy, melakukan training dan testing data juga berguna untuk melihat ketepatan dari parameter fungsi keanggotaan yang telah ditetapkan terhadap data testing yang dapat dilakukan menggunakan simulink.

Dalam penelitian ini telah dilakukan training dan testing data yang dilakukan sebanyak 4x, dan didapatkan hasil *recognize* terbesar 12,5% yaitu pada 20 data training dan 8 data testing. Karena hasil nilai *recognize* yang cukup rendah, hal tersebut juga dipengaruhi oleh parameter dari fungsi keanggotaan, karena itu parameter yang telah ditetapkan perlu untuk dievaluasi agar mendapatkan hasil yang lebih akurat. Selain hal diatas, karena untuk mengevaluasi distribusi daya listrik yang didasarkan pada beban puncak, maka akan dilakukan penelitian selanjutnya dengan menambahkan analisis *time series* pada proses awal pengolahan data untuk memprediksi beban puncak tersebut dikarenakan untuk memprediksi beban puncak harus memperhatikan atau menganalisis factor dari waktu seperti hari, minggu, bulan, dan tahun.

Referensi

- [1] Majdi A, Beiki M. Evolving neural network using a genetic algorithm for predicting the deformation modulus of rock masses. *Int J Rock Mech Min Sci* 2010;47(2):246–53.
- [2] Beiki M, Bashiri A, Majdi A. Genetic programming approach for estimating the deformation modulus of rock mass using sensitivity analysis by neural network. *Int J Rock Mech Min Sci* 2010;47(7):1091–10103.
- [3] Fitriyah, Q., & Istardi, D. (2012). Prediksi Beban Listrik Pulau Bali Dengan Menggunakan Metode Backpropagasi.
- [4] Handoko, B. (2013). Peramalan Beban Listrik Jangka Pendek pada Sistem Kelistrikan Jawa Timur dan Bali Menggunakan Fuzzy Time Series.
- [5] Kusumadewi, Sri dan Purnomo, Hari. 2013. *Aplikasi Logika Fuzzy*. Yogyakarta: GRAHA ILMU
- [6] Zadeh AL. Fuzzy sets. *Inf Control* 1965;8:338–53.
- [7] Habibagahi G, Katebi S. Rockmass classification using fuzzy sets. *Iran J Sci Technol Trans B* 1996;20(3):273–84.
- [8] Den Hartog MH, Babuska R, Deketh HJR, Grima MA, Verhoef PNW, Verbruggen HB. Knowledge-based fuzzy model for performance prediction of a rockcutting trencher. *Int J Approx Reason* 1997;16(1):43–66.
- [9] Grima MA. *Neuro-fuzzy modelling in engineering geology*. Leiden: A.A. Balkema Publishers; 2000.
- [10] Kusumadewi, Sri dan Purnomo, Hari. 2013. *Aplikasi Logika Fuzzy untuk Pendukung Keputusan*. Graha Ilmu: Yogyakarta.
- [11] Mohammad Rezaei, Mostafa Asadizadeh, Abbas Majdi, Mohammad Farouq Hossaini, Prediction of representative deformation modulus of longwall panel roof rock strata using Mamdani fuzzy system, *International Journal of Mining Science and technology* 25 (2015) 23.
- [12] Kusumadewi, Sri dan Purnomo, Hari. 2013. *Aplikasi Logika Fuzzy untuk Pendukung Keputusan*. Graha Ilmu: Yogyakarta.
- [13] Kusumadewi, Sri dan Purnomo, Hari. 2013. *Aplikasi Logika Fuzzy untuk Pendukung Keputusan*. Graha Ilmu: Yogyakarta.
- [14] Kusumadewi, Sri dan Purnomo, Hari. 2013. *Aplikasi Logika Fuzzy untuk Pendukung Keputusan*. Graha Ilmu: Yogyakarta.