

Model Jaringan Saraf Tiruan Kuat Tekan Beton Porus dengan Material Pengisi Pasir

Ridho Bayuaji

Program Studi D3 Teknik Sipil - Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan - Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Kampus Manyar ITS, Jl Menur 127 Surabaya 60116, Email: bayuaji@ce.its.ac.id

Totok R. Biyanto

Teknik Fisika - Fakultas Teknologi Industri - Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Kampus ITS Keputih, Sukolilo, Surabaya 60111, Email: trb@ep.its.ac.id

Abstrak

Beton porus adalah salah satu beton ringan dan bentuk dasarnya merupakan perpaduan antara pasir, semen, air (campuran dasar) dan foam (biasanya 0,1-1,0 mm diameter). Penelitian ini difokuskan pada aplikasi jaringan saraf tiruan (JST) untuk memprediksi kuat tekan beton porus. Metode JST dapat menangkap interaksi yang kompleks antara variabel input/output dalam suatu sistem tanpa pengetahuan sebelumnya dari sifat interaksi dan tanpa harus secara eksplisit mengasumsikan bentuk model. Makalah ini menjelaskan data penelitian yang ada, seleksi data dan proses pelatihan model JST, dan validasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan beton porus dapat diprediksi lebih akurat, mudah dan cepat dari densitas beton porus, rasio pasir dan semen dan distribusi ukuran partikel pasir.

Kata-kata Kunci: Jaringan saraf tiruan, densitas, beton porus, rasio pasir-semen.

Abstract

Foamed concrete is one of light concrete and its basic form is a blend of sand, cement, water (the base mix) and a pre-formed foam (usually 0.1 to 1.0 mm in diameter). This research focus on application of artificial neural networks (ANN) to predict the compressive strength of foamed concrete mixtures. The ANN method can capture complex interactions among input/output variables in a system without any prior knowledge of the nature of these interactions and without having to explicitly assume a model form. Indeed, such a model form is generated by the data points themselves. This paper describes the database assembled, the selection and training process of the ANN model, and its validation. Results showed compressive strength of foamed concrete can be predicted much accurately, easy and fast from density of foamed concrete, sand and cement ratio and particle size distribution of sand.

Keywords: Artificial neural network; density; foamed concrete; sand-cement ratio.

1. Pendahuluan

Di masa kini dan mendatang, fokus penelitian bahan bangunan baik untuk struktur dan non struktur di seluruh dunia adalah mencari bahan bangunan yang ringan, tahan lama, mudah digunakan, ekonomi dan sekaligus lebih ramah lingkungan (Tarun, 2005). Bahan alternatif yang memiliki potensi untuk memenuhi semua persyaratan ini adalah beton porus. Beton porus adalah beton spesifik yang berisi lebih dari 20% volume udara. Hal ini dicapai dengan penggabungan surfaktan berbuisa ke dalam campuran dasar mortar sehingga memiliki ruang rongga yang homogen (Ramamurthy et al., 2009).

Kelebihan beton porus dibanding beton normal, yakni densitasnya dapat dirancang dengan kisaran 400-1800 kg/m³, mudah mengalir, mudah menyamakan level tanpa usaha kompaksi dan mudah dipompa. Beton porus konvensional umumnya mempunyai kuat tekan yang rendah (antara 1 dan 10 MPa), sangat sesuai digunakan sebagai partisi, isolasi, perata level, material perkerasan beton penutup permukaan tanah dengan tujuan agar air dapat dengan mudah mengalir ke bawahnya, dan dengan demikian kelebihan air permukaan akan dapat kembali terserap ke dalam tanah, daripada hanya terbuang ke laut. Beton Porus ini sudah dipakai di negara lain sejak lebih dari 30 tahun yang lalu pada aplikasi jalan raya, lapangan parkir maupun dinding bantaran sungai.

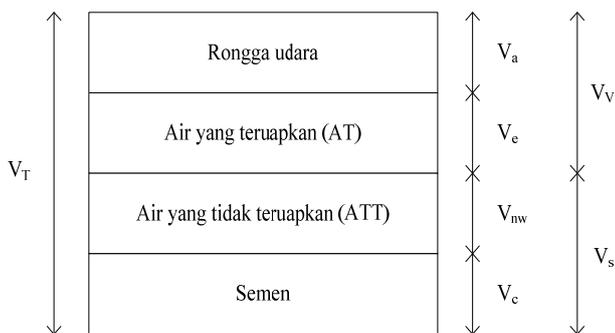
Belum ada metode standar untuk merancang komponen campuran beton porus (Kearsley and Mostert, 2005). Untuk beton normal, aplikator hanya menentukan kuat tekan tertentu dan rasio air semen yang disesuaikan dengan standar yang digunakan. Namun, beton porus selain kuat tekan juga harus memperhatikan densitas karena prosentase volume udara sebagai variabel yang variatif menentukan densitasnya. Pengurangan volume rongga akan menghasilkan peningkatan kuat tekan dan densitas beton porus. Penambahan pasir di komposisi campuran akan memberikan nilai ekonomis beton porous, namun karena pasir bersifat pengisi maka akan mengurangi kekuatan. Untuk beton porus dengan densitas rendah diperlukan pembatasan jumlah pasir yang dimasukkan ke proporsi campuran beton karena jumlah pasir yang berlebihan akan mengganggu stabilitas *foam* dalam campuran (Hamidah et al., 2005).

Desain proporsi campuran, kontrol kualitas dan kuat tekan dianggap sebagai properti yang paling berharga pada beton porus. Prediksi kuat tekan beton adalah hal penting dalam konstruksi beton modern dan dalam rekayasa aplikasi lapangan. Selama bertahun-tahun, banyak metode telah dikembangkan untuk memprediksi kekuatan beton. Model matematis Abrams sangat dikenal dengan sebutan hukum Abrams adalah perumusan yang sangat penting dalam evaluasi kekuatan beton, desain campuran beton dan pengendalian mutu beton.

Beberapa penelitian telah dilaporkan dalam literatur terbuka untuk memprediksi sifat beton porus (Nehdi et al., 2001) yaitu dari pengetahuan proporsi campurannya. Kunci utama pemodelan kekuatan beton porus adalah pengetahuan dan pemahaman volume ruang total (porositas) di dalam struktur beton porus.

Hoff (1972) telah mendefinisikan porositas beton porus yang terbuat dari pasta semen sebagai bagian parsial dari total volume sebesar rongga udara dan air yang teruapkan. **Gambar 1** menunjukkan model porositas beton porus yang disarankan oleh Hoff. Model ini dibangun dalam teori porositas seperti ditunjukkan pada **Persamaan (1)**.

$$n = 1 - [d_c (1+0.20\rho_c)/(1+k) \rho_c \gamma_w] \tag{1}$$



Gambar 1. Model beton porus hoff (1972)

Seperti telah dibahas bahwa porositas mempunyai dampak yang cukup besar terhadap kuat tekan beton porus. Model Balshin diadopsi untuk mempresentasikan korelasi kekuatan dengan porositas, nilai porositas menggabungkan air yang teruapkan dengan rongga udara. Model Balshin kekuatan-porositas beton porus dinyatakan serupa dengan persamaan.

$$\sigma_y = \sigma_0 (1-n)^b \tag{2}$$

Gabungan persamaan porositas (secara teori) antara **Persamaan 1** dan **Persamaan 2** dapat ditulis sebagai:

$$\sigma_y = \sigma_0 \left[\frac{dc(1 + 0.20\rho_c + S_v)}{(1+k)(1+S_w)\rho_c\gamma_w} \right]^b \tag{3}$$

Tam et al. (1987) menyatakan pada proses hidrasi bahwa rasio air yang tidak teruapkan dengan semen bervariasi 0,18-0,23. Untuk menyederhanakan perhitungan, rasio air yang tidak teruapkan dengan semen dinyatakan sebesar 0,2. Hal ini juga memenuhi model Hoff (1972), Kearsley dan Wainwright (2001 and 2002) dan Nambiar (2008).

Alternatif lain adalah pemodelan dengan Jaringan Syaraf Tiruan (JST). JST dapat memodelkan kekomplekan dan kenonlinieran dengan cara sederhana (Biyanto dan Santosa, 2004), sehingga dapat dijadikan alternatif untuk memodelkan prediksi kuat tekan beton porus.

Tujuan penelitian ini adalah membangun suatu metode untuk memprediksi kuat tekan beton porus yang mempunyai bahan penyusun variatif terdiri dari bahan mortar dan *foam* yang memberikan dampak kompleks terhadap properti beton porus dengan menggunakan JST. Dari penelitian ini diharapkan JST sebagai salah satu metode prediksi komposisi material penyusun beton porus kuat tekan beton porus dan sekaligus dapat menentukan sebelum diaplikasikan di lapangan.

2. Jaringan Saraf Tiruan

Pemodelan dengan jaringan saraf tiruan (JST) adalah pemodelan Black Box dimana input dipasangkan dengan output yang sesuai. Di dalam jaringan saraf tiruan terdiri dari sambungan (*connections*) dan elemen pemrosesan (neuron).

Untuk pemodelan sistem, ada beberapa keuntungan menggunakan jaringan saraf tiruan (Murray et al. 1992) yaitu:

- a. Sistem Nonlinear. Jaringan saraf tiruan mempunyai kemampuan untuk memetakan hubungan yang tidak linier, sehingga sangat menjanjikan untuk mengatasi permasalahan kontrol nonlinier.

- b. Pembelajaran dan beradaptasi. Jaringan saraf tiruan yang telah dilatih menggunakan satu set data akan mampu mengeluarkan output sama atau mendekati output pasangan input yang diberikan, bahkan mampu mengeluarkan output dengan input yang belum pernah dilatihkan. Jaringan saraf tiruan mampu juga dilatih on-line.
- c. Sistem Multivariabel. Jaringan saraf tiruan aplikasi untuk multi-variabel proses.

Struktur jaringan saraf tiruan yang umum adalah multi layer perceptron (MLP). **Gambar 2** menggambarkan struktur MLP, yang terdiri dari input, hidden dan *output layer*.

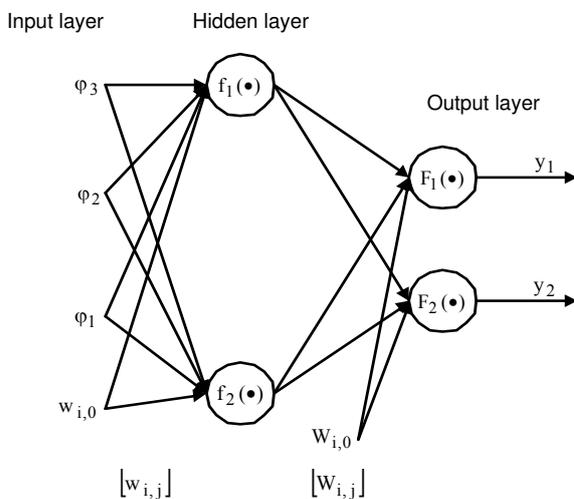
Cybenko (1989) mengatakan bahwa model JST yang menggunakan fungsi aktivasi hiperbolik tangen pada sebuah *hidden layer* dan fungsi linier pada *output layer*-nya, dapat memprediksi dengan akurat semua sistem yang dimodelkan.

Dalam rangka menentukan bobot misalnya *output* \hat{y}_i dihubungkan dengan *input* ϕ_i , maka memerlukan suatu usaha yang disebut pelatihan/pembelajaran (*training/learning*). Dalam training bobot disesuaikan agar memperoleh output jaringan yang sesuai dengan *output* proses atau target. Algoritma pembelajaran ini akan terus menyesuaikan bobot sampai target yang diinginkan tercapai.

Secara matematis MLP dapat ditulis:

$$y_i = F_i \left[\sum_{j=1}^{n_h} W_{ij} \cdot f_j \left(\sum_{l=1}^{n_\phi} w_{j,l} \phi_l + w_{j,0} \right) + W_{i,0} \right] \quad (4)$$

Algoritma pembelajaran yang digunakan dalam penelitian ini adalah algoritma Levenberg Marquardt. Meskipun algoritma ini lebih kompleks dibandingkan algoritma backpropagation, tetapi algoritma ini dapat memberikan hasil yang lebih baik. Penurunan



Gambar 2. Struktur multilayer perceptron

algoritma ini dapat dilihat pada Norgaard dkk. (1999) dan dapat dijelaskan sebagai berikut :

Data training adalah satu set *input* $u(k)$ yang berpasangan dengan *output* yang diinginkan $y(k)$. atau dapat ditulis:

$$Z^N = \{[u(k),y(k)] | k=1, \dots, N\} \quad (5)$$

Tujuan pembelajaran ini menentukan bobot yang mungkin dari pasangan data yang diberikan :

$$Z^N \rightarrow w \quad (6)$$

Sehingga jaringan akan mengeluarkan perkiraan *output* $y(k)$ yang sama atau mendekati *output* $y(k)$. Perkiraan error akan didekati dengan *mean square error criterion*:

$$V_N(w, Z^N) = L^0(w) = \frac{1}{2N} \sum [y(k) - \hat{y}(k|w)]^T [y(k) - \hat{y}(k|w)] \quad (7)$$

Bobot yang diperoleh :

$$w = \arg \min_w V_N(w, Z^N) \quad (8)$$

$$w^{(i+1)} = w^{(i)} + \mu^{(i)} f^{(i)} \quad (9)$$

w^i bobot saat ini, $f^{(i)}$ adalah arah pencarian dan $\mu^{(i)}$ adalah besar langkah.

Levenberg Marquardt adalah metoda standar untuk minimisasi dari mean square error criterion. Pada algoritma ini mempunyai parameter l untuk menjaga konvergensi. Harga l dikontrol dengan rasio antara penurunan harga aktual dan harga prediksi.

$$r^{(i)} = \frac{V_N(w^{(i)}, Z^N) - V_N(w^{(i)} + f^{(i)}, Z^N)}{V_N(w^{(i)}, Z^N) - L^0(w^{(i)} + f^{(i)})} \quad (10)$$

Dimana :

$$L(w^{(i)} + f) = \sum_{k=1}^N \left(y(k) - \hat{y}(k|w) - f^T \frac{\partial \hat{y}(k|w)}{\partial w} \right)^2 = V_N(w^{(i)}, Z^N) + f^T G(w^{(i)}) + \frac{1}{2} f^T R(w^{(i)}) f \quad (11)$$

G menunjukkan gradien kriteria dengan mengacu pada bobot dan R adalah pendekatan dari Hessian. Jika rasio mendekati satu, $L^0(w^{(i)} + f)$ mendekati V_N , dan λ seharusnya dikurangi dengan beberapa faktor. Begitu juga sebaliknya jika rasio kecil atau negatif maka λ sebaiknya ditambah.

Algoritma Levenberg Marquardt dapat diringkas sebagai berikut:

1. Pilih vektor bobot awal $w^{(0)}$ dan harga awal $\lambda^{(0)}$.
dimana w adalah bobot dan λ diberikan harga awal
2. Tentukan arah pencarian, dimana I adalah matrik identitas

$$[R(w^{(i)} + \lambda^{(i)} I)]f^{(i)} = -G(w^{(i)}) \quad (12)$$

maka diperoleh f dan dimasukkan ke:

$$w = \arg \min_w V_N(w, Z^N) \quad (13)$$

$$w^{(i+1)} = w^{(i)} + \mu^{(i)} f^{(i)} \quad (14)$$

Jika fungsi objektif pada iterasi saat ini lebih kecil dari iterasi sebelumnya atau $V_N(w^{(i)} + f^{(i)}, Z^N) < V_N(w^{(i)}, Z^N)$ sehingga bobot saat ini telah ditambahkan menjadi bobot yang baru $w^{(i+1)} = w^{(i)} + f^{(i)}$ maka arah pencarian yang baru adalah arah pencarian yang lama $\lambda^{(i+1)} = \lambda^{(i)}$. Jika tidak maka mencari λ baru harus dicari dari harga r .

$$r^{(i)} = \frac{V_N(w^{(i)}, Z^N) - V_N(w^{(i)} + f^{(i)}, Z^N)}{V_N(w^{(i)}, Z^N) - L^{(i)}(w^{(i)} + f^{(i)})} \quad (15)$$

Jika $r^{(i)} > 0.75$ maka $\lambda^{(i)} = \lambda^{(i)}/2$.

Jika $r^{(i)} < 0.25$ maka $\lambda^{(i)} = 2 \lambda^{(i)}$.

Dimana V dihitung dari persamaan Levenberg-marquard L

$$V_N(w, Z^N) = L^{(i)}(w)$$

$$= \frac{1}{2N} \sum [y(k) - \hat{y}(k | w)]^T [y(k) - \hat{y}(k | w)]$$

$$L^{(i)}(w^{(i)} + f^{(i)}) = (\lambda^{(i)} f^{(i)T} f^{(i)} + f^{(i)T} G) \quad (16)$$

3. Jika kriteria tercapai, maka perhitungan berhenti.
Jika kriteria belum tercapai maka mengulangi langkah no 2.

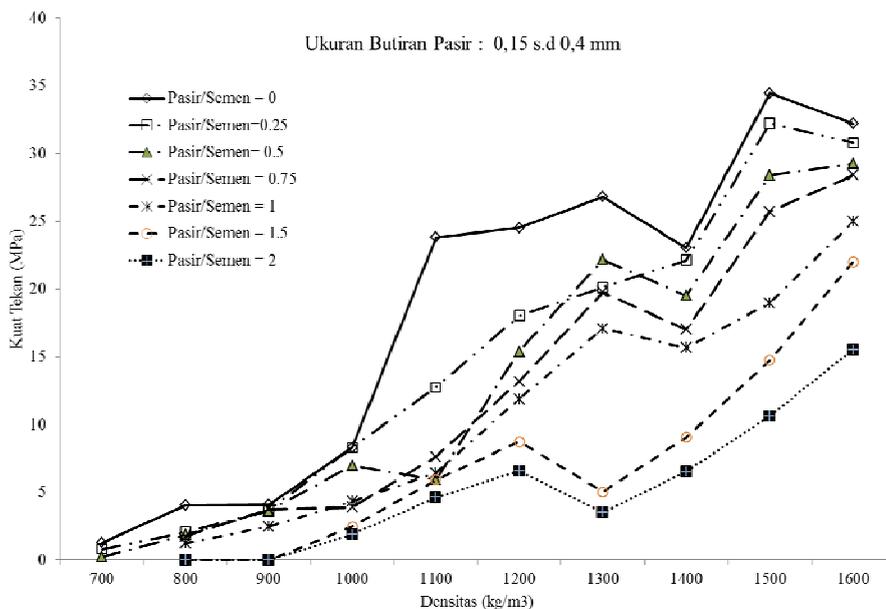
3. Metode Penelitian

Produksi beton porus tersusun dari material semen, air, foam pembentuk pori dan agregat halus. Semen Type I digunakan sebagai pengikat pasir, agregat halus. Foam pembentuk pori menggunakan material berbasis sintetis oleh Pemasok MBT Sdn.Bhd, Malaysia. Densitas dirancang dari volume foam yang bervariasi sehingga menghasilkan densitas beton porus antara 800 -1600 kg/m³. Selisih densitas antar tiap benda uji diberikan persyaratan maksimum 100 kg/m³. Proporsi campuran beton porus tergantung dari: densitas yang direncanakan, rasio pasir-semen dan rasio air-semen dan jumlah foam ditambahkan dapat dihitung dengan menggunakan lembar perhitungan dikembangkan sebagai berikut:

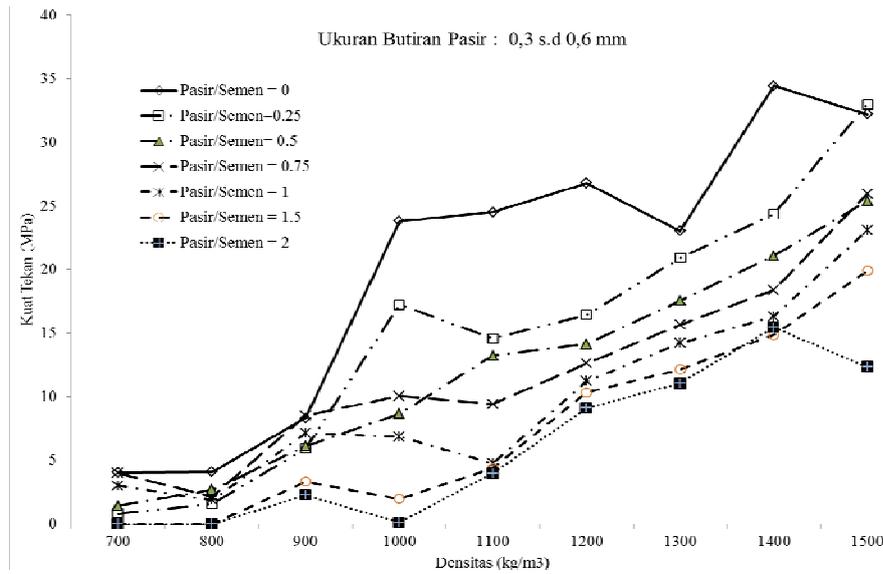
$$\rho_{LWFC} = C + C(w/c) + C(p/c) + C(s/c) + C(p/c)(w) + C(s/c)(w) + RD_c V_f \quad (17)$$

$$1000 = C/RD_c + C(w/c) + [C(p/c)]/RD_p + [C(s/c)]/RD_s + V_f \quad (18)$$

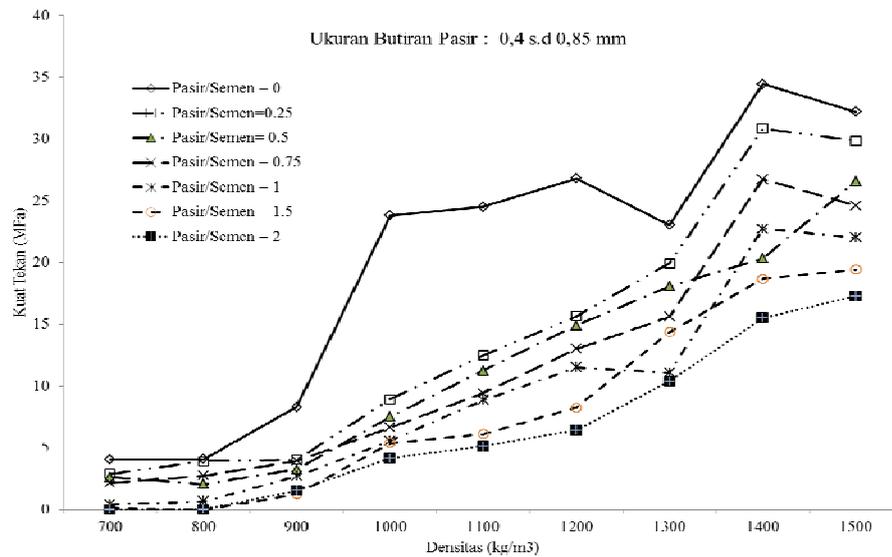
Rasio pasir-semen direncanakan tujuh nilai yaitu 0,25, 0,5, 0,75, 1,0, 1,5 dan 2,0. Pasir sebagai bahan pengisi mempunyai 4 distribusi ukuran partikel pasir dengan batas ukuran diameter: 0,15- 0,4 mm, 0,3-0,6 mm, 0,4-0,85 mm, 0,6-1,2 mm. Rasio air-semen dijaga konstan pada 0,5 untuk semua campuran. Hasil eksperimen uji kuat tekan beton porus yang dilaksanakan Hamidah et al.(2005) dipresentasika pada **Gambar 3** s.d. **9**.



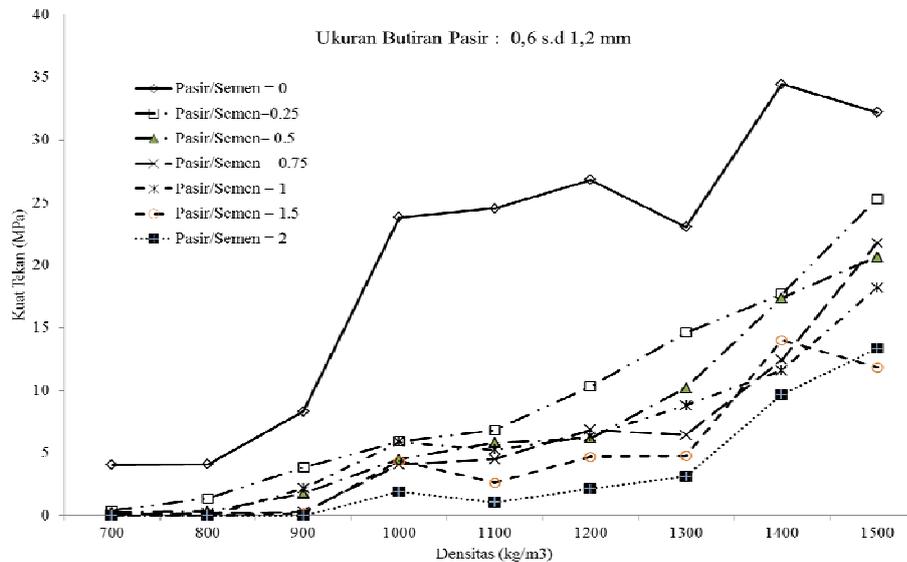
Gambar 3. Hasil eksperimen beton porus dengan ukuran partikel pasir 0,15-0,4 mm



Gambar 4. Hasil eksperimen beton porous dengan ukuran partikel pasir 0,3-0,6 mm



Gambar 5. Hasil eksperimen beton porous dengan ukuran partikel pasir 0,4-0,85 mm



Gambar 6. Hasil eksperimen beton porous dengan ukuran partikel pasir 0,6-1,2 mm



Gambar 7. Tahap pertama: persiapan mortar



Gambar 9. Spread test

Pelaksanaan pembuatan beton porus mempunyai tiga tahap proses. Untuk persiapan mortar (lihat **Gambar 7**), agregat pertama kali dicampur dengan setengah air diikuti dengan penambahan semen. Sisa air itu kemudian dituangkan dalam campuran. Dalam persiapan pembuatan *foam*, konsentrat *foam* dicampur air dengan perbandingan volume 1:30, campuran ini dimasukkan ke dalam tangki dengan tekanan udara 5 bar untuk menghasilkan *foam* dengan densitas 110 kg/m³. Volume *foam* yang sudah terukur sesuai dengan perencanaan segera ditambahkan ke campuran mortar dan dicampur sampai tidak ada tanda-tanda fisik dari *foam* di permukaan dan foam tercampur merata di dalam campuran. Konsistensi beton porus segar diukur

dengan menggunakan *spread test*. Beton berbusa diisi ke dalam cetakan dengan ukuran 100 mm x 100 mm x 100 mm (lihat **Gambar 8**). Benda uji kubus dibuka dari cetakannya pada keesokan harinya dan benda uji dilakukan perawatan dengan air, dengan memasukkan benda uji di bak air sampai pada usia uji kuat tekan yang ditentukan

Tes beton porus segar dievaluasi dengan *spread test* sesuai dengan ASTM-230. Cetakan kerucut terpotong diletakkan di atas piring kaca, diisi dengan pasta dan diangkat. Diameter aliran memberikan informasi tingkat kemudahan pelaksanaan dari campuran. *Spread test* ditunjukkan pada **Gambar 9**.



Gambar 8. Produksi foam dan pencampuran foam dengan mortar

Model JST untuk memprediksi kuat tekan beton berbusa dikembangkan menggunakan MATLAB 7.1. Model yang diusulkan berbasis jaringan saraf tiruan ditunjukkan pada **Gambar 10**. Data input terdiri dari distribusi ukuran partikel pasir, rasio pasir-semen, densitas dan kuat tekan sebagai output.

4. Hasil dan Diskusi

4.1 Model jaringan saraf tiruan

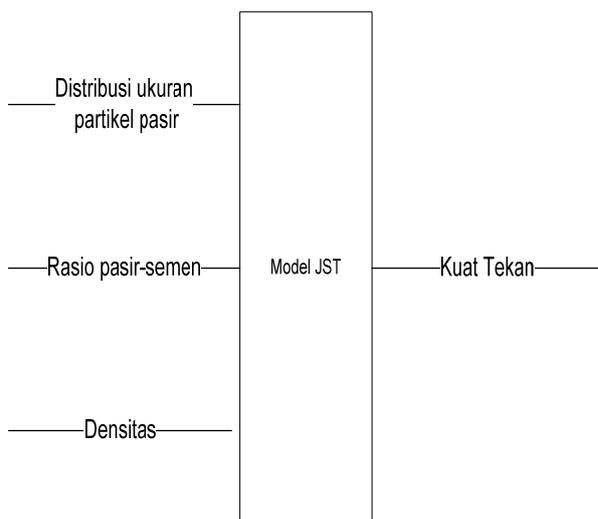
Model jaringan saraf ini menggunakan struktur FIR (*Finite Impulse Response*). Model ini mempunyai karakter permodelan dengan memasukkan variabel model input dari input itu sendiri. Persamaan output model dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\hat{Y} = f(U_1, U_2, U_3) \tag{19}$$

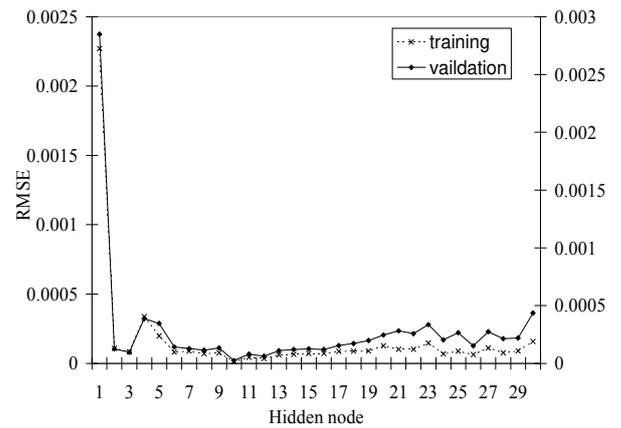
Model jaringan saraf tiruan beton porous menggunakan MLP, dilatih oleh algoritma Marquardt. Pelatihan Marquardt dilakukan sebanyak 200 kali iterasi. Model neural dilatih dengan data pelatihan untuk menentukan nilai bobot. Lalu, bobot tetap akan digunakan untuk validasi model saraf menggunakan data input output lainnya. Keabakan identifikasi sistem diukur dengan menggunakan Root Mean Square Error (RMSE), yang dapat ditulis sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \tag{20}$$

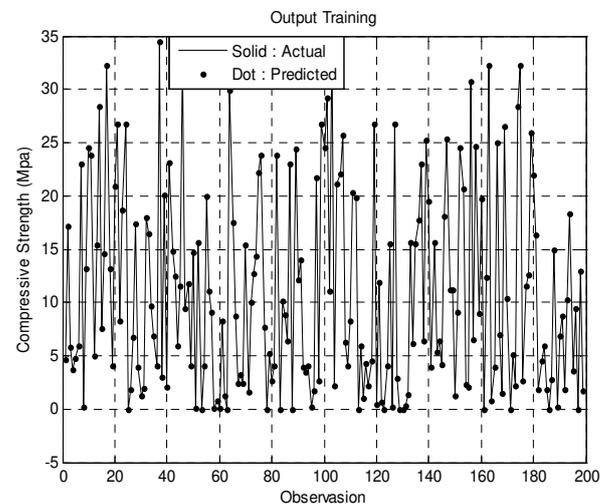
Gambar 11 menunjukkan bahwa RMSE terbaik 1.23×10^{-5} untuk pelatihan dan 2.31×10^{-5} untuk validasi diproduksi oleh JST dengan *hidden node* 10. Jadi, JST dengan 10 *hidden node* digunakan model sebagai perawatan beton dengan air.



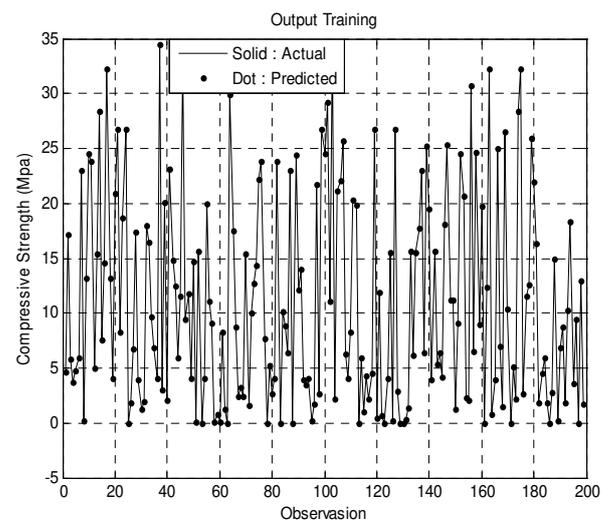
Gambar 10. Usulan model JST untuk kuat tekan beton porous



Gambar 11. Pelatihan dan validasi RMSE dengan perawatan air untuk *hidden node* yang berbeda



Gambar 12. Pelatihan untuk perawatan dengan air



Gambar 13. Validasi untuk perawatan dengan air

Model jaringan syaraf yang dilatih juga divalidasi pada satu set data yang tidak digunakan untuk pelatihan jaringan (**Gambar 12**). Menggunakan nilai tetap bobot yang diperoleh pada tahap pelatihan, jaringan syaraf menghasilkan output diperkirakan dari data input baru dalam tahap validasi. (**Gambar 13**)

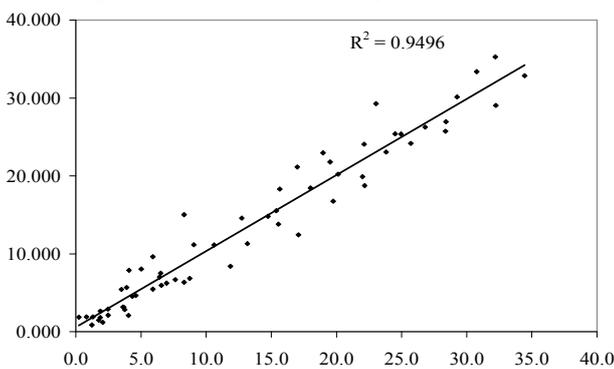
Dengan demikian, model jaringan syaraf tiruan bisa menangani nonlinier dan kompleksitas perubahan distribusi ukuran partikel pasir, rasio pasir- semen dan densitas dengan RMSE terbaik. Berdasarkan hasil di atas, juga sangat mudah dan sederhana untuk mengembangkan model nonlinier menggunakan JST, dan memerlukan sedikit waktu komputasi. Koefisien korelasi, R menunjukkan proporsi variasi dari nilai prediksi yang dapat dikaitkan dengan hubungan linier dengan nilai aktual dan diberikan dengan rumus:

$$R = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} \times S_{yy}}} \quad (21)$$

Hubungan kuat tekan prediksi dengan kuat tekan aktual hasil eksperimen ditunjukkan **Gambar 14**. Koefisien korelasi 0,9496, dan didistribusikan merata pada kedua sisi dari garis, yang menunjukkan kinerja model yang sangat baik.

5. Kesimpulan

1. Pengembangan model menggunakan jaringan syaraf tiruan untuk memprediksi kuat tekan beton porus, yang terdiri dari 3 variabel input dan 1 variabel output, telah disajikan dalam makalah ini.
2. Struktur model adalah Perseptron multilayer. Secara umum, jaringan syaraf dirancang dapat mengantisipasi nonlinier dan interaksi yang kompleks antara variabel input/output dari beton porus.
3. Model jaringan syaraf tiruan memberikan hasil yang baik dalam pemodelan dengan RMSE = 1.23x10-5 untuk perawatan dengan air dalam tahap pelatihan.
4. Pada tahap validasi, RMSE = 2.31x10-5 untuk perawatan dengan air. Oleh karena itu, model jaringan syaraf tiruan dapat digunakan sebagai model alternatif dalam mengembangkan alat untuk memprediksi kuat tekan beton porus



Gambar 14. Akurasi prediksi sistem saraf-jaringan

Notasi

| | |
|-------------|---|
| n | = porositas dalam teori, |
| d_c | = densitas beton, |
| ρ_c | = berat jenis semen, |
| γ_w | = berat satuan air, |
| k | = rasio air-semen (rasio dalam berat), |
| V_T | = total volume, |
| V_a | = volume rongga udara, |
| V_e | = volume penguapan air |
| V_{mw} | = volume air yang bereaksi secara kimia |
| V_c | = volume semen |
| V_v | = volume rongga udara |
| V_s | = volume benda padat |
| σ_y | = kuat tekan material dengan porositas |
| σ_0 | = kuat tekan material tanpa porositas |
| b | = variabel yang bernilai 3 |
| JST | = Jaringan Saraf Tiruan |
| a/c | = rasio udara-semen dalam volume |
| b | = pangkat eksponen |
| dc | = densitas beton |
| K | = konstanta empiris |
| Kp | = faktor mewakili peningkatan volume gel semen terhidrasi relatif terhadap volume asli dari semen.. |
| m | = konstanta empiris |
| n | = Jumlah titik data |
| Sd | = standard deviasi sampel |
| U | = tertimbang jumlah input neuron |
| Wi | = koneksi kuat antara neuron pada lapisan i dan lapisan sebelumnya |
| w/c | = rasio air-semen dalam volume |
| x_i | = nilai variable input |
| xt | = transformasi x |
| x | = nilai uji rata-rata |
| y | = neuron output |
| α | = derajat hidrasi |
| γ_w | = berat satuan air |
| λ | = perkalian konstan |
| σ_y | = kuat tekan; |
| σ_0 | = kuat tekan teori dengan porositas nol |
| ρ_c | = berat jenis semen |
| φ | = input external |
| n_φ | = jumlah input pada input layer |
| n_h | = jumlah hidden neurons pada hidden layer |
| W and w | = bobot |
| f and F | = fungsi aktivasi untuk hidden layer dan output layer |
| Y_i | = harga actual |
| \hat{Y}_i | = harga output prediksi dari model |
| N | = jumlah data |
| U_1 | = distribusi ukuran partikel pasir |
| U_2 | = rasio semen dengan pasir |
| U_3 | = densitas |
| R^2 | = koefisien korelasi |
| S_{xy} | = kovarian x dengan y |
| S_{xx} | = varians x |
| S_{yy} | = varians y |

Daftar Pustaka

- ASTM-C230, 2003, Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement.
- Biyanto, TR., Santosa, HH, 2004, Modeling of Methanol-Water Binary Distillation Column Using A Neural Network, Jakarta: *Journal Instrumentasi* Vol. 28 No. 1, Instrumentation Society of Indonesia.
- Cybenko G., 1989, *Approximation by Super-position of A Sigmoid Function*, Mathematics of Control, Signal, and Systems, Vol. 2(4), 303-314
- Hamidah, I., Azmi, Ruslan, A., Kartini, K., and Fadhil, N.M., 2005, Optimisation of Foamed Concrete Mix of Different Sand-Cement Ratio and Curing Conditions, *Proceeding from the int. Conference 'Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities*, Dundee, 5-7 July 2005, Thomas Telford.
- Hoff, G.C., 1972, *Porosity-strength Considerations for Cellular Concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 2: p. 91-100
- Kearsley, E.P., and Wainwright, P.J., 2001, *Porosity and Permeability of Foamed Concrete*, Cement and Concrete Research, 31(5): p. 805-812.
- Kearsley, E.P., and Wainwright, P.J., 2002, *The Effect of Porosity on the Strength of Foamed Concrete*, Cement and Concrete Research, 32 (2): p. 233-239.
- Kearsley, E.P., and Mostert, H.F., 2005, Designing Mix Composition of Foamed Concrete With High Fly Ash Contents, *Proceeding from the int. Conference 'Global Construction: Ultimate concrete opportunities*, Dundee, 5-7 July 2005, Thomas Telford.
- Murray, R., Neumerkel, D., Sbarbaro, D., 1992, Neural Networks for Modeling and Control of A Non-Linear Dynamic System. *Proceedings of the 1992 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, Glasgow, Scotland, pp. 404-409.
- Nambiar, E.K.K. and Ramamurthy, K., 2008, *Models for Strength Prediction of Foam Concrete. Materials and Structures*. 41: p. 247-54
- Nehdi, M., Djebbar, Y., and Khan, A., 2001, Neural Network Model for Preformed-Foam Cellular Concrete, *ACI Materials Journal*, September-October, 402-409.
- Norgaard, M., Ravn, O., Poulsen, N.K., and Hansen L.K., 1999, *Neural Network for Modelling and Control of Dynamic Systems*, Springer London.
- Ramamurthy, K., Nambiar, E.K.K., and Ranjani, G.I.S., 2009, *A Classification of Studies on Properties of Foam Concrete*. Cement & Concrete Composites, Volume 31(Issue 6): p. 388-396
- Tam, C.T., Lim, T.Y., Sri Ravindrarajah, R., and Lee, S.L., 1987, *Relationship Between Strength and Volumetric Composition of Moist-Cured Cellular Concrete*, Magazine of Concrete Research. 39: p. 12-18.
- Tarun R.N., 2005, *Environmental-Friendly Durable Concrete Made with Recycled Materials for Sustainable*, Toronto, Canada.

