

Analisis Tegangan Terkekang Beton Persegi dengan Perkuatan *Fiber Reinforced Polymer* menggunakan Jaringan Saraf Tiruan

Anang Kristianto ^{1*}, Yosafat Aji Pranata ¹, Riko Arlando Saragih ²

¹ Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha

² Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha,
Jl. Prof. drg Suria Sumantri 65, Bandung, Indonesia 40164

Abstrak

Fiber Reinforced Polymer (FRP) adalah material komposit yang berfungsi sebagai perkuatan untuk meningkatkan kapasitas kekuatan elemen struktur. Pada umumnya perkuatan diperlukan sebagai akibat perubahan fungsi bangunan atau memenuhi persyaratan terhadap beban desain gempa yang diperbaharui. Perkuatan kolom beton persegi dengan FRP memerlukan penelitian lebih lanjut terkait dengan sudut pada penampang persegi yang menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan. Penelitian ini menggunakan Jaringan Saraf Tiruan (JST) untuk memprediksi tegangan terkekang (f'_{cc}) kolom beton persegi yang diberikan perkuatan FRP. Penggunaan JST dengan 4 hidden layer (J8-4-1) dalam memprediksi 113 benda uji hasil eksperimen memberikan hasil akurat dengan nilai validasi MSE yang optimum yaitu sebesar 0.00131 dengan nilai korelasi R baik pada fase training, fase validasi maupun fase uji berturut-turut adalah sebesar 0.992, 0.982 dan 0.983. JST J8-4-1 memberikan hasil prediksi tegangan dengan korelasi yang lebih baik dibandingkan dengan usulan metode analisis yang telah dilakukan pada beberapa penelitian terkait perkuatan kolom persegi dengan FRP. Analisis dengan JST juga memberikan gambaran yang akurat mengenai korelasi kenaikan radius kelengkungan sudut kolom persegi terhadap peningkatan tegangan terkekangnya. Hasil prediksi JST konsisten dengan beberapa studi eksperimental yang telah dilakukan serta konsisten dengan formula yang diberikan dalam ACI 440.2R- 2017.

Kata kunci: Jaringan Saraf Tiruan; kolom; tegangan terkekang; FRP

Abstract

[Title: Confined Stress Analysis of Square Concrete Strength ened with Fiber Reinforced Polymer using Artificial Neural Networks] Fiber Reinforced Polymer (FRP) is a composite material used as a reinforcing material to increase the strength capacity of structural elements. Generally, strengthening is required due to changes in the function of the building or to meet the requirements of the updated seismic design load. Reinforcement of square concrete columns with FRP requires further research on the angle in the square cross-section that causes stress concentration. In this study, an artificial neural network ("ANN") is used to predict the confined stress (f'_{cc}) of square concrete columns reinforced with FRP. The use of JST with 4 hidden layers (J8-4-1) in the prediction of 113 experimental test specimens gave accurate results with an optimal MSE validation value of 0.00131 with correlation values R in the training, validation, and test phases of 0.992, 0.982, and 0.983, respectively. JST J8-4-1 provides stress prediction results with better correlation compared to the analysis methods performed in several studies on reinforcing square columns with FRP. The analysis with JST also accurately describes the correlation between the increase in the radius of curvature of the square column corners and the increase in the confined stress. The JST prediction results agree with several experimental studies that have been conducted and are consistent with the formula given in ACI 440.2R-2017.

Keywords: Artificial Neural Network; column; confined stress; FRP

^{*}) Penulis Korespondensi.

E-mail: anang.kristianto@eng.maranatha.edu

1. Pendahuluan

Peraturan terbaru pemerintah terkait desain struktur terhadap beban gempa SNI 1726:2019 mengalami perubahan khususnya pada besarnya beban gempa yang terjadi pada beberapa daerah rawan gempa dan juga perubahan terkait persyaratan detail tulangan pengekang pada kolom persegi. Kondisi ini mengakibatkan bangunan-bangunan gedung pada beberapa daerah rawan gempa harus diperkuat elemen strukturnya secara khusus pada kolom karena tidak lagi memenuhi persyaratan kekuatan. Salah satu perkuatan elemen struktur kolom yang saat ini banyak digunakan adalah menggunakan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP). Penggunaan FRP saat ini sudah banyak diaplikasikan untuk meningkatkan kapasitas kekuatan elemen struktur bangunan, baik dalam rangka perkuatan agar sesuai dengan kapasitas yang didesain ataupun kebutuhan akan perkuatan terkait perubahan fungsi bangunan dan persyaratan terhadap beban desain gempa yang diperbaharui (Mugahed Amran et al. 2018). Material yang ringan, relatif mudah dan cepat dipasang sekaligus memiliki kapasitas tarik yang besar merupakan salah satu kelebihan FRP yang banyak diaplikasikan pada elemen struktur bangunan. Penggunaan lembaran FRP pada kolom eksisting memberikan kemampuan kekangan pasif yang dapat meningkatkan kapasitas aksialnya (Minafò et al., 2019a)

Studi terkait peningkatan kapasitas aksial pada kolom didasarkan pada penelitian Richart et al. (1928) yang mengasumsikan suatu penampang lingkaran dengan distribusi tegangan pengekang yang seragam. Kondisi ini memungkinkan perhitungan tegangan pengekangan secara langsung sebagai fungsi dari ketebalan lembaran FRP, sifat mekanisnya dan diameter penampang. Studi literatur yang komprehensif dapat dilihat pada penelitian Ozbakkaloglu et al., (2013) yang menganalisis berbagai model untuk memprediksi perilaku tegangan dan regangan pengekangan kolom lingkaran yang diberi perkuatan FRP.

Perkuatan FRP pada kolom persegi yang memiliki sudut tajam di bagian sudut dapat menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan sebagai akibat tidak terpenuhinya kekakuan lentur dari FRP yang membungkusnya (Campione et al., 2004). Pada prakteknya kondisi ini mengharuskan penghalusan sudut kolom persegi dalam bentuk melengkung dengan jari-jari tertentu, pembuatan sudut melengkung ini akan mereduksi konsentrasi tegangan dan menghindari terjadinya kegagalan prematur pada FRP. Berbagai penelitian yang berfokus pada parameter jari-jari kelengkungan yang digunakan pada kolom yang dibungkus FRP telah dilakukan. L. M. Wang & Wu (2008a) dalam penelitiannya memberikan konfirmasi pengaruh r/b (rasio jari-jari kelengkungan sudut dan lebar kolom) serta mutu beton dalam meningkatkan kapasitas

aksial kolom persegi yang diberi perkuatan FRP, hasil penelitian ini dikonfirmasi secara ekperimental juga oleh peneliti lainnya (Al-Salloum, 2007; Sharma et al., 2013).

Penelitian secara eksperimental telah banyak dilakukan untuk memperlihatkan efek radius kelengkungan sudut pada peningkatan tegangan pengekangan, namun membuat pemodelannya merupakan tugas yang tidak mudah karena banyaknya fenomena fisik yang harus diperhitungkan (Minafò et al., 2019b). Hal inilah yang membuat sedikit model tersedia untuk penampang persegi, sebagian besar dari pemodelan yang digunakan adalah berdasarkan asumsi distribusi tegangan yang seragam. Penampang persegi di idealisasikan sebagai penampang lingkaran dengan ekuivalensi diameternya dan diberikan faktor bentuk atau faktor efisiensi untuk memperhitungkan perbedaan distribusi tegangan yang terjadi (Zeng et al., 2017; Eid & Paultre, 2017). Pendekatan secara praktis ini telah digunakan dalam standar resmi ACI 440.2R 17 (2017), meskipun demikian pendekatan ini belum memperhitungkan regangan efektif yang terjadi pada lembaran FRP pada saat mengalami keruntuhannya.

Beberapa pendekatan telah dilakukan untuk memodelkan perilaku kolom dengan perkuatan FRP diantaranya adalah pendekatan secara mekanik dimana lembaran FRP dimodelkan seperti balok yang bertumpu pada tanah elastis, yang mensimulasikan interaksi FRP dengan inti beton yang dikekangnya (Campione et al., 2004). Minafò et al., (2019) melakukan pendekatan secara mekanik pada kolom persegi dengan sudut melingkar yang diberi perkuatan FRP dengan memodelkan lembaran FRP sebagai elemen balok yang berinteraksi dengan inti beton kolom. Model balok ini terkoneksi melalui spring yang terdistribusi sepanjang arah *radial* dan *circumferential* dengan inti beton yang *rigid*. Pada penelitian ini diusulkan pendekatan secara mekanik dengan menggunakan persamaan konstitutif yang merupakan fungsi dari *circumferential* dan *radial springnya*.

Pendekatan dengan model elemen hingga (*finite element*) dengan bantuan software telah dilakukan oleh Karam & Tabbara (2005) yang menganalisis pengaruh radius kelengkungan sudut terhadap distribusi tegangan yang terjadi. Penelitian ini juga mengkonfirmasi secara numerik bahwa tegangan pengekangan sepanjang bagian tepi yang lurus sangat kecil bila dibandingkan dengan tegangan pada bagian sudut.

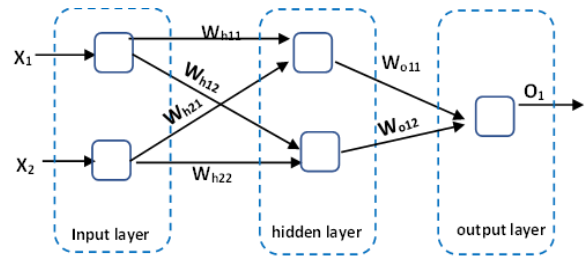
Pendekatan secara analitis dilakukan oleh Pham et al. (2013). Pada penelitian ini tegangan tarik yang terjadi pada lembaran FRP merupakan suatu formula yang diturunkan dari model *thin shells* (cangkang tipis). Penelitian ini memberikan informasi bahwa faktor efisiensi regangan yang dihitung sebagai rasio antara tegangan *ultimate* FRP pada kolom dengan tegangan FRP pada kondisi uji tarik murninya adalah merupakan fungsi

dari r/b (radius kelengkungan/dimensi kolom) dan rasio kekakuan pengekan. Pendekatan secara regresi logaritma hasil eksperimen dilakukan untuk menghasilkan usulan formula yang memberikan nilai besarnya rasio efisiensi regangan pada lembaran FRP yang digunakan sebagai perkuatan.

Dengan banyaknya data-data hasil penelitian eksperimental yang telah dilakukan, pendekatan modern mulai digunakan dengan memanfaatkan model JST untuk memprediksi besarnya tegangan dan regangan ultimate kolom beton dengan perkuatan FRP. Pendekatan dengan Jaringan Saraf Tiruan tidak membutuhkan asumsi suatu hubungan fungsi diantara berbagai variabel yang menentukan seperti yang dilakukan pada pendekatan secara analitis maupun mekanik. JST secara otomatis mengkonstruksi hubungan dan melakukan adaptasi berdasarkan data-data yang digunakan sebagai apa yang disebut pelatihan. Hal inilah yang membuat pendekatan JST menjadi menarik sebagai alat untuk memodelkan dan memprediksi perilaku suatu masalah dalam hal ini bidang *engineering*.

Oreta & Kawashima (2003) menggunakan pendekatan JST untuk memprediksi besarnya kapasitas tegangan dan regangan pada kolom lingkaran yang diberikan perkuatan FRP. Data yang digunakan berjumlah 38 spesimen dari hasil eksperimental kolom lingkaran yang diberi perkuatan FRP yaitu : Mander & Priestley (1988); J. Sakai et al. (2000) dan J. Sakai, (2001). Arsitektur JST yang digunakan terdiri dari 7 *nodal input*, *hidden layer* divariasikan dari 2 hingga 4 *nodal*, sementara output berjumlah 2 *nodal*. Pendekatan dengan JST pada penelitian ini memberikan perbedaan nilai prediksi tegangan dan regangan sebesar 1% hingga 3% dari nilai hasil eksperimental. Oreta juga memberikan saran untuk menambah jumlah data eksperimental sebagai bagian dari proses “*training*” dari JST agar mendapatkan hasil prediksi yang semakin akurat. Penelitian lain untuk kolom lingkaran dilakukan oleh. Naderpour et al., (2010), Jalal & Ramezani-pour, (2012).

Penelitian ini menggunakan Jaringan Saraf Tiruan untuk memprediksi kuat tekan kolom beton persegi yang diberikan perkuatan FRP. Seperti diketahui bahwa analisis tegangan pengekan kolom persegi hingga saat ini masih menggunakan pendekatan dengan asumsi kolom lingkaran yang diberikan faktor bentuk atau faktor efisiensi. Penelitian ini memberikan alternatif pendekatan lain dari yang selama ini digunakan seperti model analitis, pendekatan mekanik serta metode elemen hingga. Bertambah banyaknya data-data baru hasil eksperimental memberikan nilai tambah bagi pendekatan dengan JST dalam penelitian ini dimana data terakhir yang digunakan adalah penelitian eksperimental pada tahun 2019.



Gambar 1. Ilustrasi layer Jaringan Saraf Tiruan

2. Metode Penelitian

Suatu sistem JST adalah sekumpulan dari unit-unit pemrosesan sederhana atau nodal-nodal yang terhubung melalui sambungan-sambungan yang disebut koneksi. Arsitektur dari jaringan saraf dapat digambarkan secara skematik pada gambar 1.

Gambar 1 menggambarkan 3 layer JST, dimana nodal persegi merepresentasikan unit pemrosesan, garis merepresentasi hubungan-hubungan dan kepala panah pada garis menunjukkan arah normal dari aliran sinyal. Unit-unit pemrosesan dapat dikelompokkan sebagai *input layer*, *hidden layer* dan *output layer* unit pemrosesan. Tujuan utama dari unit pemrosesan adalah menerima *input* dari unit bersebelahan yang menyediakan masukan aktivasi, menghitung keluaran dan mengirim keluaran kepada unit pemrosesan berikutnya yang akan menerima *output*-nya. Kekuatan dari hubungan diantara unit pemrosesan disediakan oleh suatu set pembobotan yang mempengaruhi besarnya *input* yang akan diterima oleh unit-unit sebelahnya. *Output* yang dihasilkan dari unit pemrosesan keluaran dibandingkan dengan target data keluaran dan bobot dimodifikasi secara tepat atau disesuaikan berdasarkan aturan *training* dan pembelajaran. Pada akhirnya jika masalah dapat dipelajari, suatu kumpulan bobot yang stabil berkembang secara adaptif akan memberikan hasil yang bagus dari pada proses sebelumnya.

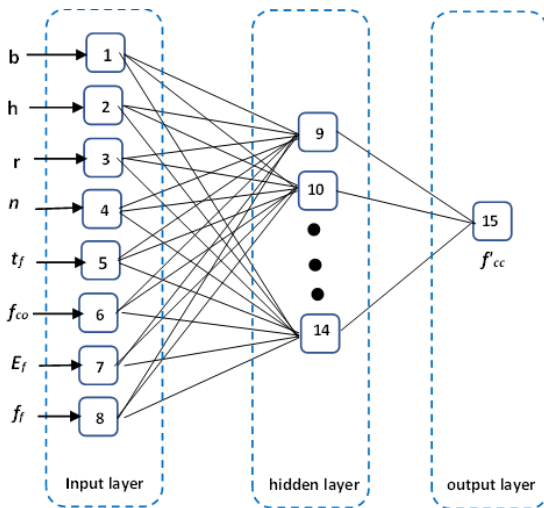
Fase *training* JST dalam penelitian ini menggunakan algoritma pembelajaran dengan algoritma *Back Propagation Network* (BPN). Fase *training* dari algoritma BPN ini terdiri dari dua arah. Umpan ke depan menghitung *output* jaringan untuk suatu set bobot koneksi dan data *input*. Umpan balik menghitung *error* dari jaringan yang sesuai dengan target keluaran dan *error* ini menjadi umpan balik untuk jaringan dan digunakan untuk memodifikasi bobot koneksi. Pada umumnya kriteria *error* dalam jaringan *output* ditentukan bersamaan dengan maksimum jumlah siklus untuk memberikan kondisi diselesaikan atau terus berlanjutnya proses simulasi. Kinerja suatu JST dapat dimonitor dari konvergensi *error*-nya sepanjang jumlah siklus yang terjadi, simulasi dengan JST idealnya akan menghasilkan nilai *error* yang semakin mendekati nilai minimumnya. Setelah melalui fase *training* maka JST dapat diuji dengan menggunakan

input data lain dengan menggunakan nilai bobot terakhir hasil dari proses pembelajarannya tersebut, pada fase ini tidak ada modifikasi bobot, semua nilai diambil dari siklus terakhir proses pembelajaran.

Hasil dari JST yang merupakan pola pembelajaran harus divalidasi secara empiris. Evaluasi dan validasi dari suatu prediksi model JST dapat dilakukan dengan menggunakan nilai MSE (*Mean Square Error*). MSE menghitung selisih antara nilai prediksi model (σ_i) dan nilai sebenarnya dari data (y_i), kemudian dikuadratkan selisih tersebut agar tidak ada selisih yang bernilai negatif. Kemudian, selisih kuadrat dijumlahkan dan diambil rata-rata dari semua sampel data (n), nilai MSE diberikan dalam Persamaan 1.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - y_i)^2}{n} \quad (1)$$

Pada penelitian ini dilakukan pemodelan JST dengan menggunakan MATLAB untuk memprediksi kekuatan tekan beton terkekang (f'_{cc}) spesimen beton persegi yang diberi perkuatan FRP. Data base yang digunakan diambil dari beberapa penelitian yaitu : Rochette & Labossière (2000), Ilki & Kumbasar (2003), Lam & Teng (2003), Masia et al. (2004), Mohamed H. Harajli et al. (2006), Rousakis et al. (2007), Al-Salloum (2007), Tao et al. (2008), L. M. Wang & Wu (2008a), Z. Wang et al. (2012), Li et al. (2019). Data dengan kurva tegangan regangan yang menurun tidak digunakan, juga data yang kurang lengkap. Total jumlah data yang digunakan adalah 113 spesimen kolom persegi yang diberi kekangan FRP. Seluruh data penelitian yang dipilih merupakan hasil eksperimen benda uji yang memiliki kesamaan skema pengujian, tipikal grafik hubungan tegangan dan regangan yang mirip serta bentuk kegagalan yang sama yaitu putusnya FRP sebagai pengekang.



Gambar 2. Arsitektur jaringan yang digunakan

Parameter input yang diambil berdasarkan variabel yang menentukan kuat tekan beton dengan FRP dari data eksperimen adalah : dimensi penampang (b dan h), radius kelengkungan sudut (r), jumlah lapisan FRP (n), tebal FRP (t_f), mutu beton tidak terkekang (f'_{co}), Modulus Elastisitas FRP (E_f), kapasitas tarik FRP (f_f). Jumlah hidden layer yang dilakukan dalam studi ini mulai dari 1 hingga 5 hidden layer. Jumlah *neuron* pada *input* layer 8, jumlah *neuron* dalam *hidden* layer adalah 6, *output* layer digunakan 1 *neuron*. Fungsi training yang digunakan dalam metode *back propagasi* adalah *Levenberg-Marquardt*, fungsi pelatihan menggunakan *Trainlm*, fungsi pembelajaran menggunakan *Learnqdm*, fungsi kinerja menggunakan MSE, fungsi transfer baik pada *hidden* layer maupun *output* layer menggunakan *Tansig*. Arsitektur Jaringan dapat dilihat pada Gambar 2.

Dari 113 data hasil eksperimen dibagi menjadi 79 data untuk training, 17 data untuk uji dan 17 data untuk validasi. Dalam penelitian ini dilakukan percobaan dengan 5 jenis arsitektur JST untuk mendapatkan arsitektur JST yang paling optimum. JST dengan 1 sampai dengan 5 hidden layer yaitu J8-1-1, J8-2-1, J8-3-1, J8-4-1, J8-5-1, dimana angka 8 adalah jumlah input, sementara angka 1 hingga 4 adalah jumlah hidden layer, sementara angka 1 paling belakang menunjukkan jumlah output.

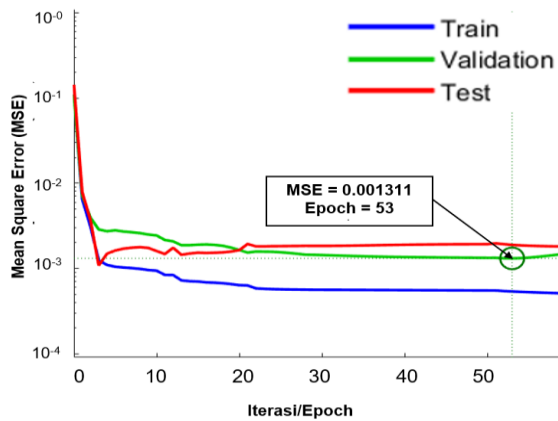
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil analisis dari ke-5 arsitektur JST diperlihatkan pada Tabel 1. Berdasarkan nilai MSE validasi pada Tabel 1, arsitektur jaringan J8-4-1 (4 *hidden layer*) memberikan tingkat kinerja yang paling optimum, hal ini terlihat dari nilai MSE yang paling kecil. Grafik kinerja pada setiap iterasi (*epoch*) untuk J8-4-1 dapat dilihat pada Gambar 3. Kinerja terbaik didapat pada iterasi ke-53 dengan nilai validasi MSE sebesar 0.001311. Pada gambar ini juga memperlihatkan kinerja *training* (garis biru) yang lebih baik daripada kinerja *test* (garis merah) dan validasi (garis hijau). Kinerja *test* dan validasi dalam tren yang berdekatan memperlihatkan kinerja yang konstan sepanjang iterasi yang dilakukan.

Korelasi antara target (hasil eksperimen) dengan *output* yang merupakan hasil prediksi JST dapat dilihat

Tabel 1. Kinerja berdasarkan MSE untuk setiap aritektur JST

Arsitektur JST	Validasi	Training	Test
J8-1-1	0.007267	0.004176	0.007862
J8-2-1	0.002789	0.001796	0.004322
J8-3-1	0.002076	0.002887	0.003895
J8-4-1	0.001311	0.000545	0.001988
J8-5-1	0.001492	0.001032	0.002735



Gambar 3. Kinerja validasi pada arsitektur jaringan J8-4-1

pada Gambar 4. Nilai korelasi R baik pada fase *training* (Gambar 4(a)), fase validasi (Gambar 4(b)) maupun fase uji (Gambar 4(c)) memperlihatkan nilai korelasi R berturut-turut adalah 0.992, 0.982 dan 0.983..

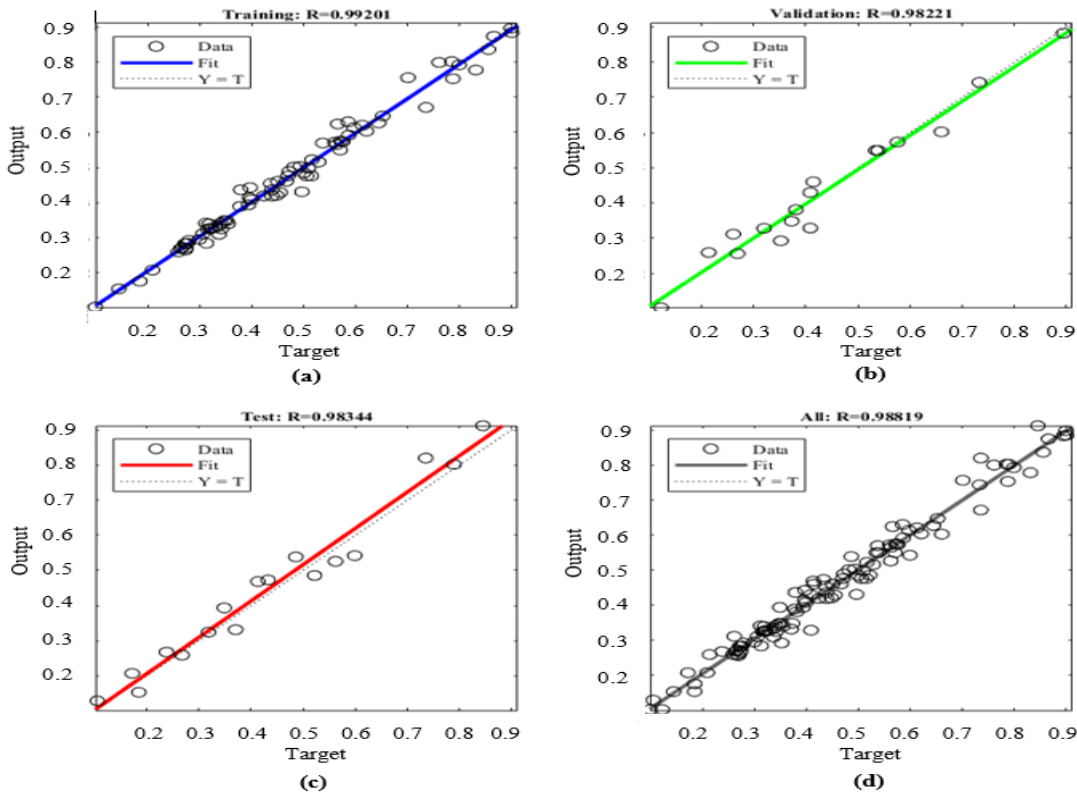
Gambar 4(d) memberikan nilai korelasi R untuk semua data. Nilai R yang mendekati 1 memberikan korelasi yang semakin baik. Tingkat korelasi yang baik memberikan dasar penggunaan JST sebagai alternatif analisis untuk mempelajari perilaku tegangan terkekang beton persegi (f'_{cc}) yang diperkuat dengan FRP.

Pham et al. (2013) menggunakan pendekatan analitis membran hipotesis dalam penelitiannya untuk menganalisis perilaku lembaran FRP pada daerah sudut kolom persegi. Pham memberikan usulan persamaan untuk menganalisis besarnya tegangan terkekang yang terjadi pada kolom persegi dengan memperhitungkan kelengkungan sudutnya sesuai persamaan 2.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 0.68 + 3.91 \frac{f'_{Le}}{f'_{co}} \quad (2)$$

Untuk membuktikan sejauh mana keberhasilan pendekatan tersebut dilakukan korelasi antara tegangan terkekang hasil eksperimen dengan beberapa penelitian terkait. Hasil studi eksperimental dari Rochette & Labossière (2000), L. M. Wang & Wu (2008b), Z. Wang et al. (2012) dibandingkan dengan hasil analisis usulan Pham (2013) menggunakan persamaan 2 diperlihatkan pada Gambar 5.

Korelasi antara persamaan yang diusulkan Pham et al. (2013) dengan hasil eksperimen cukup dekat dengan nilai $R^2 = 0.7932$. Pada Gambar 6 diperlihatkan hasil prediksi dengan menggunakan JST dibandingkan dengan eksperimen yang sama dilakukan oleh Rochette & Labossière (2000), L. M. Wang & Wu (2008b), Z. Wang et al. (2012). Berdasarkan korelasi yang diperlihatkan pada Gambar 5 dan 6 terlihat model analitis yang

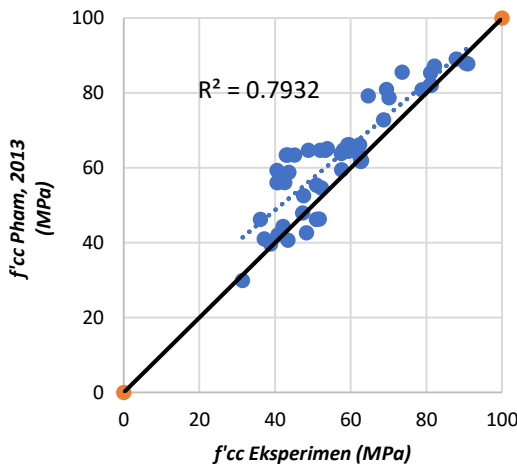


Gambar 4. Korelasi target dan prediksi JST J8-4-1

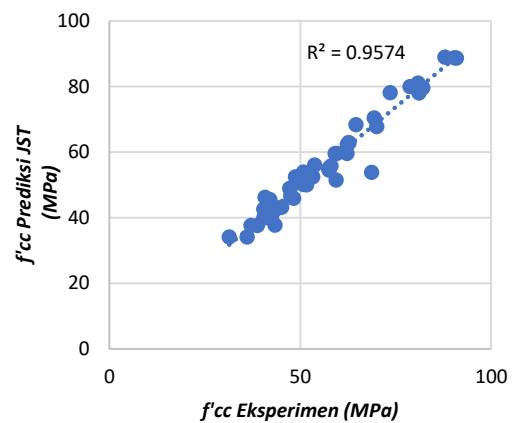
diusulkan oleh Pham memiliki nilai R^2 yang lebih rendah daripada hasil prediksi dengan JST yang memiliki nilai $R^2 = 0.9574$. Kondisi ini memberikan gambaran keakuratan JST dalam menganalisis tegangan pekekangan yang terjadi. Pham et al. (2013) memberikan hasil yang cenderung lebih tinggi dari hasil eksperimen hal ini akan memberikan nilai keamanan yang kurang bagi kebutuhan desain, sementara prediksi dengan JST memberikan keunggulan pada hasil prediksinya yang lebih akurat sehingga dapat memberikan kepastian hasil peningkatan tegangan aksial kolom yang diperoleh bila diperkuat dengan FRP. Gambar 7 memperlihatkan korelasi antara usulan Pham et al. (2013) dengan hasil analisis menggunakan JST. Sebaran hasil analisis pada Gambar 7 memperlihatkan dimana tegangan terkekang menggunakan usulan Pham et al. (2013) cenderung lebih besar daripada prediksi JST.

Usulan Pham (2013) diturunkan dari model *thin shells* (cangkang tipis) dimana tegangan pekekang yang terjadi ketika beban aksial diberikan pada kolom dengan perkuatan FRP diasumsikan hanya terkonsentrasi pada daerah sudut. Selain itu model ini memberikan rekomendasi perbandingan antara radius kelengkungan dan tebal FRP (r/t) harus lebih besar dari 20. Asumsi pemodelan ini memberikan keterbatasan dalam memprediksi besaran tegangan yang terjadi secara khusus pada beberapa eksperimen atau benda uji yang tidak memenuhi asumsi yang diberikan.

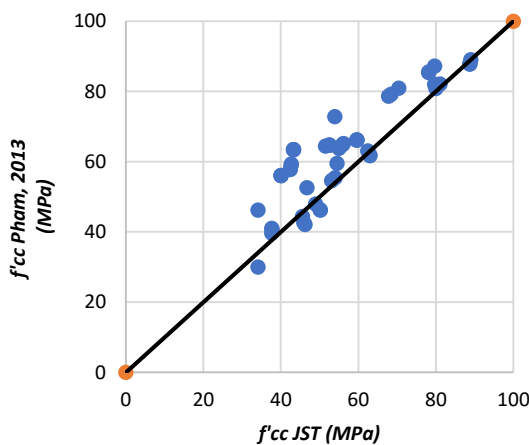
Untuk memberikan gambaran bagaimana perbandingan hasil eksperimen yang diprediksi dengan akurat oleh JST dengan standar desain yang diberikan dalam ACI 440.2R 17 (2017) dilakukan korelasi antara target desain dan hasil eksperimen. Hasil eksperimen Rochette & Labossière (2000), L. M. Wang & Wu (2008b), Z. Wang et al. (2012) dibandingkan dengan



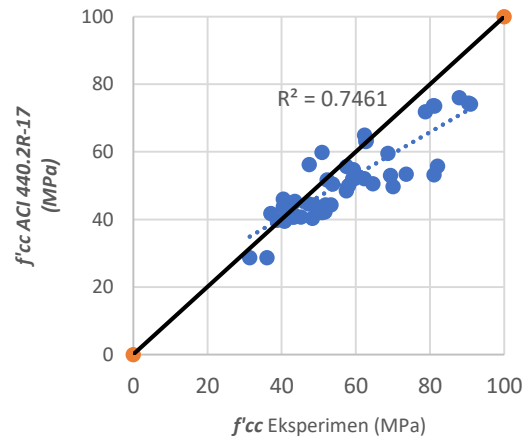
Gambar 5. Korelasi antara model prediksi (Pham, 2013) dengan hasil eksperimen



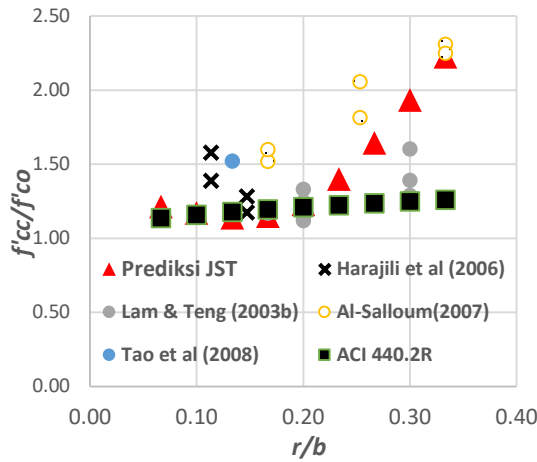
Gambar 6. Korelasi antara hasil eksperimen dengan prediksi JST



Gambar 7. Korelasi antara model analitis (Pham, 2013) dengan prediksi JST



Gambar 8. Korelasi antara perhitungan sesuai standar ACI 440.2R-17 dengan hasil eksperimen



Gambar 9. Korelasi antara r/b dengan peningkatan kekuatan

tegangan standar desain diperlihatkan pada Gambar 8. Pada Gambar 8 terlihat bahwa hasil perhitungan untuk kebutuhan desain secara umum memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan hasil eksperimen. Kondisi ini memperlihatkan bahwa target desain tegangan pengekanan memberikan nilai yang konservatif daripada hasil eksperimen. Hal ini bisa dijelaskan karena untuk keperluan desain, ACI 440.2R 17 (2017) memberikan faktor reduksi seperti C_E (reduksi faktor lingkungan), ψ_f (reduksi kapasitas aksial) dan κ_e (reduksi regangan efektif).

Terkait pengaruh radius kelengkungan (r) terhadap peningkatan kapasitas aksial kolom dengan perkuatan FRP, Pham et al. (2013) memberikan informasi bahwa faktor efisiensi regangan yang dihitung sebagai rasio antara tegangan *ultimate* FRP pada kolom dengan tegangan FRP pada kondisi uji tarik murninya adalah merupakan fungsi dari r/b dan rasio kekakuan pengekanan. Untuk melihat pengaruh radius kelengkungan yang diberikan pada kolom persegi dengan menggunakan hasil analisis JST maka pada penelitian ini dibuat suatu studi sederhana berupa analisis besarnya tegangan beton terkekang (f'_{cc}) pada kolom persegi yang diberikan radius kelengkungan pada sudutnya sebesar : 10 mm hingga 50 mm. Data kolom yang digunakan adalah sebagai berikut : $b=150$ mm, $h=150$ mm, $f_{co} = 25$ MPa, tebal FRP $t=0.13$ mm, jumlah lapisan $n=1$, kuat tarik FRP = 3500 MPa dan $E_f=230000$ MPa. Korelasi antara r/b dan peningkatan kekuatan tegangan terkekang yang terjadi (f'_{cc}/f'_{co}) dengan prediksi JST dapat dilihat grafik pada Gambar 9 dengan tanda segitiga. Untuk memberikan perbandingan dengan hasil eksperimen dan standar desain maka pada grafik di Gambar 9 juga disajikan hasil eksperimen beberapa penelitian yang menggunakan benda uji kolom persegi dengan radius

kelengkungan pada sudut kolomnya serta menggunakan 1 lembar lapisan FRP.

Hasil prediksi JST (segitiga merah) memperlihatkan kecenderungan meningkatnya tegangan terkekang seiring dengan bertambah besarnya radius kelengkungan sudut yang diberikan. Hasil eksperimen dari beberapa penelitian juga menunjukkan kecenderungan yang mirip. Hal ini mengkonfirmasi pengertian bahwa peningkatan besarnya radius kelengkungan akan mengakibatkan dimensi kolom semakin mendekati bentuk penampang lingkaran, kondisi ini membuat tegangan lateral yang bekerja pada FRP di sisi-sisi kolom menjadi lebih seragam. Kondisi tegangan lateral yang lebih seragam mengakibatkan kemampuan FRP untuk memberikan kekangan menjadi lebih baik dibandingkan dengan adanya konsentrasi tegangan yang bisa terjadi pada sudut kolom akibat radius kelengkungan yang kecil. ACI 440.2R memberikan batasan minimum radius kelengkungan yang harus diberikan pada sudut kolom persegi sebesar 15 mm. Data eksperimen yang digunakan dalam training JST tidak ada yang memiliki radius kelengkungan sudut dibawah 15mm, sehingga dalam kasus ini analisis JST tidak akurat apabila diberikan r yang kurang dari 15mm ($r/b < 0.1$).

Pada prinsipnya standar ACI 440.2R juga memperhatikan pengaruh radius kelengkungan terhadap peningkatan tegangan yang terjadi, namun dari hasil analisis pada Gambar 9 terlihat bagaimana peningkatan yang terjadi tidak begitu signifikan bila dibandingkan analisis dari prediksi JST dan hasil eksperimen. Grafik ini juga mengkonfirmasi bahwa sebagai suatu standar desain, ACI 440.2R memberikan kapasitas desain yang relatif aman dan hasil penelitian dapat dijadikan usulan untuk perbaikan agar memberikan target desain yang lebih akurat.

4. Kesimpulan

Penggunaan JST untuk menganalisis kuat tekan beton persegi yang diberikan perkuatan FRP pada penelitian ini memberikan hasil yang akurat dengan menggunakan 4 *hidden layer* (J8-4-1), nilai MSE yang didapat paling optimum dari data validasi sebesar 0.00131 dengan nilai korelasi R baik pada fase *training*, fase validasi maupun fase uji berturut-turut adalah 0.99, 0.98 dan 0.98 untuk 113 benda uji. JST dalam penelitian ini memberikan hasil prediksi kuat tekan dengan tingkat korelasi yang lebih baik dibandingkan dengan metode analisis dengan teori *thin layer* yang dilakukan Pham dan Hadi (2013). Penggunaan JST dapat memberikan gambaran korelasi antara kenaikan radius kelengkungan sudut dengan tegangan terkekang mendekati hasil eksperimen sehingga dapat menjadi usulan untuk standar perkuatan FRP pada ACI 440.2R.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada Universitas Kristen Maranatha yang telah mendanai penelitian ini pada tahun anggaran 2022

Daftar Pustaka

- Al-Salloum, Y. A. (2007). Influence of edge sharpness on the strength of square concrete columns confined with FRP composite laminates. *Composites Part B: Engineering*, 38(5–6), 640–650. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.06.019>
- ACI 440.2R 17. (2017). *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. American Concrete Institute.
- Campione, G., Miraglia, N., & Papia, M. (2004). Strength and strain enhancements of concrete columns confined with FRP sheets. In *Structural Engineering and Mechanics* (Vol. 18, Issue 6).
- Eid, R., & Paultre, P. (2017). Compressive behavior of FRP-confined reinforced concrete columns. *Engineering Structures*, 132, 518–530. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.052>
- Ilki, A., & Kumbasar, N. (2003). Compressive behaviour of carbon fibre composite jacketed concrete with circular and non-circular cross-sections. *Journal of Earthquake Engineering*, 7(3), 381–406. <https://doi.org/10.1080/13632460309350455>
- Jalal, M., & Ramezani-pour, A. A. (2012). Strength enhancement modeling of concrete cylinders confined with CFRP composites using artificial neural networks. *Composites Part B: Engineering*, 43(8), 2990–3000. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.044>
- Karam, G., & Tabbara, M. (2005). Confinement Effectiveness in Rectangular Concrete Columns with Fiber Reinforced Polymer Wraps. *J. Compos. Constr.*, 9(5), 388–396. <https://doi.org/10.1061/ASCE1090-026820059:5388>
- Lam, L., & Teng, J.-G. (2003). Design-oriented Stress-Strain Model for FRP-confined Concrete in Rectangular Columns. *Journal of Reinforced Plastics And Composites*, 27(13). <https://doi.org/10.1177/073168403035429>
- Li, P., Sui, L., Xing, F., Li, M., Zhou, Y., & Wu, Y.-F. (2019). Stress-Strain Relation of FRP-Confined Predamaged Concrete Prisms with Square Sections of Different Corner Radii Subjected to Monotonic Axial Compression. *Journal of Composites for Construction*, 23(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000921](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000921)
- Mander, J. B., & Priestley, M. J. N. (1988). Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete. *ASCE*, 114(8), 628–629. <http://pubs.asce.org/copyright>
- Masia, M. J., Gale, T. N., & Shrive, N. G. (2004). Size effects in axially loaded square-section concrete prisms strengthened using carbon fibre reinforced polymer wrapping. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(1), 1–13. <https://doi.org/10.1139/103-064>
- Minafò, G., Rezaee-Hajidehi, M., & Giambanco, G. (2019a). A Mechanical Approach for Evaluating the Distribution of Confinement Pressure in FRP-Wrapped Rectangular Columns. *Journal of Engineering Mechanics*, 145(12). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)em.1943-7889.0001673](https://doi.org/10.1061/(asce)em.1943-7889.0001673)
- Minafò, G., Rezaee-Hajidehi, M., & Giambanco, G. (2019b). A Mechanical Approach for Evaluating the Distribution of Confinement Pressure in FRP-Wrapped Rectangular Columns. *Journal of Engineering Mechanics*, 145(12). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)em.1943-7889.0001673](https://doi.org/10.1061/(asce)em.1943-7889.0001673)
- Mohamed H. Harajli, Elie Hantouche, & Khaled Soudki. (2006). Stress-Strain Model for Fiber-Reinforced Polymer Jacketed Concrete Columns. *ACI Structural Journal*, 103(5), 672–682.
- Mugahed Amran, Y. H., Alyousef, R., Rashid, R. S. M., Alabduljabbar, H., & Hung, C. C. (2018). Properties and applications of FRP in strengthening RC structures: A review. *Structures*, 16, 208–238. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.09.008>
- Naderpour, H., Kheyroddin, A., & Amiri, G. G. (2010). Prediction of FRP-confined compressive strength of concrete using artificial neural networks. *Composite Structures*, 92(12), 2817–2829. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.04.008>
- Oreta, A. W. C., & Kawashima, K. (2003). Neural Network Modeling of Confined Compressive Strength and Strain of Circular Concrete Columns. *Journal of Structural Engineering*, 129(April), 554–561. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94452003129:4554>
- Ozbakkaloglu, T., Lim, J. C., & Vincent, T. (2013). FRP-confined concrete in circular sections: Review and assessment of stress-strain models. *Engineering Structures*, 49, 1068–1088. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.010>
- Pham, T. M., Asce, S. M., Hadi, M. N. S., & Asce, M. (2013). *Stress Prediction Model for FRP Confined Rectangular Concrete Columns with Rounded Corners*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000921](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000921)

- Richart, F. E., Brandtzaeg, A., & Brown, R. L. (1928). *A Study of the Failure of Concrete Under Combined Compressive Stresse* (12th ed., Vol. 26). University of Illinois Bulletin.
- Rochette, P., & Labossière, P. (2000). Axial Testing Of Rectangular Column Models Confined With Composites. In *Journal Of Composites For Construction*.
- Rousakis, T. C., Karabinis, A. I., & Kiouisis, P. D. (2007). FRP-confined concrete members: Axial compression experiments and plasticity modelling. *Engineering Structures*, 29(7), 1343–1353. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.08.006>
- Sakai, J. (2001). *Effect of lateral confinement of concrete and varying axial load on seismic response of bridges*. Tokyo Institute of Technology.
- Sakai, J., Kawashima, K., Une, H., & Yoneda, K. (2000). Effect of tie spacing on stress-strain relation of confined concrete. . . *J. Struct. Eng*, 46(3), 757–766., 46(3), 757–766.
- Sharma, S. S., Dave, U. V., & Solanki, H. (2013). FRP wrapping for RC columns with varying corner radii. *Procedia Engineering*, 51, 220–229. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.031>
- SNI 1726:2019. (2019). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Nongedung*. www.bsn.go.id
- Tao, Z., Yu, Q., & Zhong, Y. Z. (2008). Compressive behaviour of CFRP-confined rectangular concrete columns. *Magazine of Concrete Research*, 60(10), 735–745. <https://doi.org/10.1680/macr.2007.00115>
- Wang, L. M., & Wu, Y. F. (2008a). Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: Test. *Engineering Structures*, 30(2), 493–505. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.04.016>
- Wang, L. M., & Wu, Y. F. (2008b). Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: Test. *Engineering Structures*, 30(2), 493–505. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.04.016>
- Wang, Z., Wang, D., Smith, S. T., & Lu, D. (2012). CFRP-Confined Square RC Columns. I: Experimental Investigation. *Journal of Composites for Construction*, 16(2), 150–160. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000245](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000245)
- Zeng, J. J., Guo, Y. C., Gao, W. Y., Li, J. Z., & Xie, J. H. (2017). Behavior of partially and fully FRP-confined circularized square columns under axial compression. *Construction and Building Materials*, 152, 319–332. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.152>