

Pendekatan Statistik Model Hubungan Tegangan-Regangan Beton dengan Agregat Daur Ulang

Namira Risza Pasya, *Yunita Idris, Abdullah
Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh
*)yunita.idris@unsyiah.ac.id

Received: 15 Juli 2021 Revised: 27 Juli 2022 Accepted: 28 Juli 2022

Abstract

The use of recycled coarse aggregate (RCA) could be an alternative solution to the scarcity of natural aggregates as a concrete material and also the problem of construction waste. This paper aim is to analyze the model of compressive stress-strain curve of recycled aggregate concretes based on the literature review using the statistical approach. Database of existing experimental tests from different researchers consists 124 test specimens that come from 25 previous published journal articles. The specimens was selected based on the proportion of RCA mixtures that been used which are 50% and 100% of the concrete aggregates. This research was using simple linear regression analysis method with Statistical Package for The Social Sciences (SPSS) software. The data of the specimen analysis was differentiated into three stages of analysis, namely the analysis for the whole group data specimens, the group of concrete specimens without any additives, and specimens that use additives. The results show that the significant value from the data analysis was lower than 0.05, which are the limit values for significant value of the data analysis. This means that the water-cement ratio has the influence to the compressive strength of RCA concrete mix.

Keywords: *Recycled aggregate, compressive strength, elasticity of modulus, stress, strain*

Abstrak

Penggunaan agregat daur ulang menjadi salah satu alternatif solusi untuk permasalahan ketersediaan agregat alam sebagai bahan beton. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kurva hubungan tegangan-regangan tekan beton berdasarkan data studi literatur dan menggunakan pendekatan statistik. Dalam penelitian ini ditinjau kuat tekan (f'_c), modulus elastisitas (E_c), dan regangan (ϵ_o) sebagai dasar analisis. Penelitian menggunakan 124 data dari 25 jurnal peneliti terdahulu dengan proporsi campuran agregat daur ulang sebesar 50% dan 100% untuk mendapatkan suatu model hubungan kurva tegangan-regangan. Metode yang digunakan adalah analisis regresi linear sederhana menggunakan aplikasi Statistical Package for The Social Sciences (SPSS). Penelitian ini dibagi atas tiga fase analisis, yaitu analisis untuk hubungan tegangan-regangan untuk keseluruhan data, tanpa menggunakan zat aditif, dan menggunakan zat aditif. Hasil analisis pengaruh FAS terhadap kuat tekan beton menunjukkan nilai signifikansi yang lebih kecil dari 0,05 yang merupakan batas dari nilai signifikansi. Ini menunjukkan bahwa nilai FAS memiliki pengaruh terhadap nilai kuat tekan beton yang menggunakan agregat daur ulang.

Kata kunci: *Agregat daur ulang, kuat tekan, modulus elastisitas, tegangan, regangan*

Pendahuluan

Perkembangan infrastruktur di Indonesia yang sebagian besar menggunakan konstruksi beton bertulang mengakibatkan naiknya permintaan beton. Peningkatan ini mempengaruhi tingginya permintaan terhadap agregat kasar sebagai komponen utama pembentuk beton. Agregat kasar biasanya diambil dari alam berupa kerikil dan batu

pecah. Ketersediaan agregat alam sebagai salah satu bahan pembuat beton yang semakin berkurang berkorelasi dalam penggalian dan pengerukan material alam. Alternatif pencegahan yang dapat dilakukan untuk permasalahan ini adalah mencari beberapa alternatif agregat buatan atau penggunaan agregat daur ulang sebagai substitusi agregat alam. Beberapa negara seperti Jepang mulai menerapkan penggunaan beton daur ulang

pada tahun 1991 melalui program pemerintahan yaitu "Recycle 21" yang mulai dijalankan pada tahun 1992 dan London menerapkan pengolahan limbah beton melalui kegiatan pembangunan prasarana olimpiade di tahun 2012. Terhitung bahwa penelitian agregat daur ulang telah dilakukan selama 20 tahun terakhir.

Dari penelitian Ozbakkaloglu, *et al.* (2018) diketahui bahwa beton daur ulang dihasilkan dari limbah beton yang memiliki beberapa perbedaan dengan beton normal, seperti sifat-sifat mekanik yaitu kuat tekan (f'_c), kuat tarik, dan modulus elastisitasnya (E_c). Limbah beton ini dapat dihasilkan dari sisa bangunan yang terbakar, sisa bangunan yang tidak terpakai, sisa bangunan akibat bencana alam, dan sisa *ready mix* yang terbuang.

Setiap mutu beton memiliki tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) yang berbeda. Beberapa model tegangan-regangan beton yang menggunakan agregat daur ulang juga sudah dibuat *eksperimental test* oleh beberapa peneliti seperti (Ajdukiewicz & Kliszewicz, 2002; Xiao, *et al.*, 2013 dan Zhao *et al.*, 2014). Model tegangan-regangan untuk beton dengan menggunakan agregat daur ulang masih merupakan hal yang terus dikaji karena penggunaannya yang belum begitu luas di dunia konstruksi.

Kajian tentang sifat mekanika kuat tekan beton dan hubungan tegangan-regangan perilaku beton dengan agregat daur ulang ini perlu dikumpulkan databasenya sehingga variabel yang didapat dan setiap kajian agregat daur ulang dapat dirumuskan. Model yang diperoleh akan dibandingkan dengan model tegangan-regangan beton peneliti terdahulu. Variabel yang dianalisis yaitu faktor air semen (FAS) dan tegangan-regangan, sehingga untuk memodelkan hubungan kurva tegangan-regangan beton jenis ini dibutuhkan database dan kajian mengenai FAS, kuat tekan (f'_c), dan modulus elastisitas (E_c). Maka, melalui penelitian ini dilakukan pengembangan beberapa referensi penelitian terdahulu untuk dianalisis kemudian membuat suatu model kurva hubungan tegangan-regangan beton yang menggunakan agregat daur ulang.

Studi kasus yang dilakukan oleh Bélen *et al.* (2011), menunjukkan adanya penyerapan sebesar 70% sehingga kuat tekan pada proporsi campuran 50% diperoleh sebesar 11,1% dan campuran 100% diperoleh sebesar 17,3%. Penurunan modulus elastisitas berturut-turut adalah sebesar 12,2% dan 21,9%. Soelarso *et al.* (2016) juga menunjukkan penurunan kuat tekan campuran 50% dan 100% berturut-turut sebesar 56,99% dan 66,62%,

sedangkan penurunan Modulus elastisitas, E_c , sebesar 77,45% dan 79,12%. Masalah yang diangkat pada penelitian ini berupa besarnya pengaruh hubungan FAS terhadap tegangan-regangan tekan agregat daur ulang campuran 50% dan 100% serta hubungan model kurva tegangan-regangan hasil eksperimen peneliti terdahulu. Tujuan penelitian ini berupa analisis hubungan FAS terhadap tegangan-regangan dan model kurva tegangan-regangan hasil eksperimen terdahulu. Manfaat penelitian ini yaitu membuktikan bahwa beton daur ulang memiliki kualitas yang baik seperti beton normal. Adapun batasan masalah pada penelitian ini yaitu database yang digunakan berasal dari jurnal artikel dan karya ilmiah terkait. Data tegangan-regangan yang dianalisis berasal dari pengujian kuat tekan dengan variabel campuran dibatasi 50% dan 100%. Model kurva hubungan yang dianalisis dalam bentuk linear yaitu sampai tegangan ultimit/titik ultimit saja.

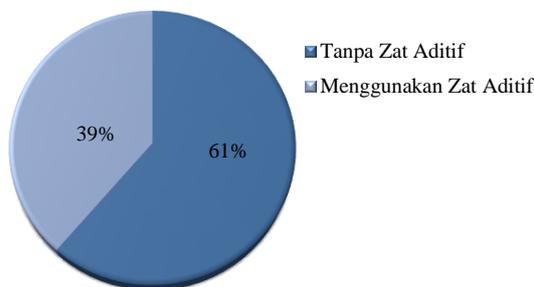
Metode

Penelitian ini merupakan suatu kajian literatur pustaka yang menggunakan data dari beberapa penelitian tentang penggunaan agregat daur ulang untuk campuran beton, yang sudah dipublikasikan. Kriteria pemilihan data adalah data beton daur ulang yang menggunakan agregat daur ulang dengan proporsi penggantian agregat daur ulang sebanyak 100% dan 50% dari keseluruhan agregat yang digunakan.

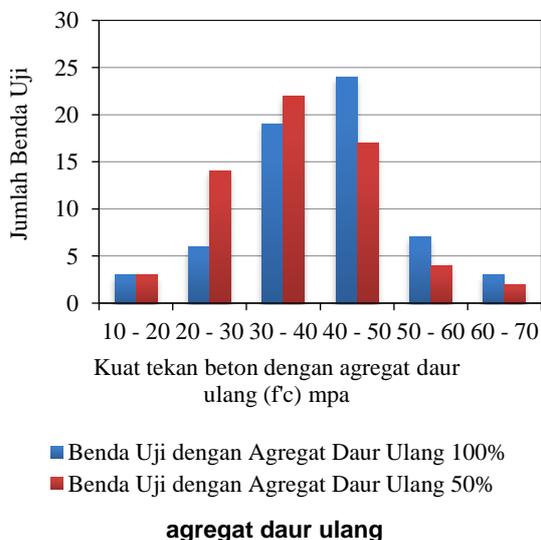
Data benda uji dari penelitian-penelitian ini diambil dari data pengujian kuat tekan. Penggunaan zat aditif dalam produksi benda uji pada literatur yang diambil tidak didetailkan dan dibedakan untuk setiap jenisnya. Hanya dibedakan antara benda uji yang diproduksi dengan penambahan zat aditif dan yang tidak. Data yang dipakai adalah sebanyak 124 benda uji yang diambil dari 25 jurnal artikel. Data tersebut berasal dari 25 jurnal artikel berikut: Khatib (2004); Xiao, *et al.* (2005); Etzeberria, *et al.* (2007a); Etzeberria, *et al.* (2007b); Kou, *et al.* (2007); Rahal (2007); Jo, *et al.* (2008); Malešev, *et al.* (2010); Domingo, *et al.* (2010); Chakradhara, *et al.* (2011); Ferreira, *et al.* (2011); Gonzalez-Fontes, *et al.* (2011); Limbachiya, *et al.* (2011); Kou, *et al.* (2012); Xiao *et al.* (2012); Thomas, *et al.* (2013); Kou dan Poon (2013); Breccolotti, *et al.* (2015); Soelarso, *et al.* (2016); Zhou dan Chen (2017); Dimitriou, *et al.* (2018); Mohammed *et al.* (2018); Ozbakkaloglu, *et al.* (2018); Wang, *et al.*, (2019); Mohammed dan Najim (2020).

Adapun karakteristik data yang telah dikumpulkan dapat dideskripsikan dalam dua kelompok data yaitu data benda uji yang menggunakan 50%

agregat daur ulang dan 100% agregat daur ulang untuk menggantikan agregat alam dalam campuran beton. Data yang berjumlah 124 ini terdiri dari 62 benda uji dengan 100% agregat daur ulang, dan 62 benda uji dengan 50% agregat daur ulang dengan kuat tekan serta komposisi penggunaan aditif (menggunakan atau tanpa aditif) digambarkan dalam bagan pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. Komposisi data benda uji yang menggunakan 100% dan 50% penggunaan zat aditif (menggunakan dan tanpa zat aditif)
Gambar 2. Data kuat tekan benda uji dengan



Kuat tekan benda uji berada pada range 10-70 MPa, dimana sebagian besar benda uji memiliki kuat tekan dalam range 40 – 50 MPa. Penelitian ini melakukan pendekatan statistik untuk menganalisis data yang dikumpulkan dari beberapa artikel yang melakukan pengujian laboratorium untuk beton yang menggunakan agregat daur ulang. Analisis data tersebut menggunakan dua aplikasi, yaitu SPSS dan Ms. Excel.

Aplikasi SPSS digunakan untuk mengetahui ada atau tidaknya hubungan FAS terhadap tegangan-regangan berdasarkan nilai signifikansi yang dihasilkan variabel X terhadap variabel Y yaitu $<0,05$. Besarnya nilai korelasi (R^2) baik FAS terhadap tegangan-regangan maupun hubungan

pada tegangan-regangan dalam satuan persen. Selain itu, diperoleh juga persamaan regresi linear yang akan digunakan untuk melakukan uji validitas pada Ms. Excel yang mana pengujian dikatakan valid apabila nilai $r_{xy} > r_{tabel}$.

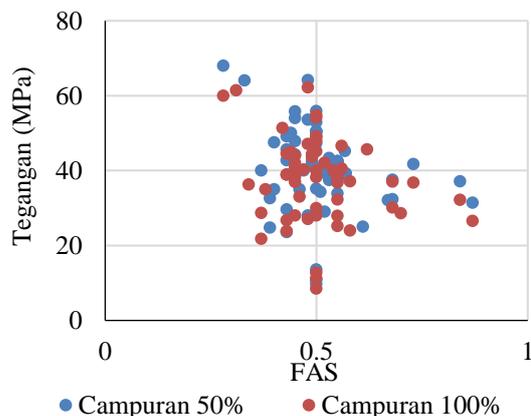
Sebelum dilakukan uji validitas, sebanyak 124 data untuk campuran 50% dan 100% diolah ke dalam grafik persebaran data pada Ms. Excel untuk melihat hubungan tegangan-regangan pada ketiga kategori, yaitu data keseluruhan, tanpa menggunakan zat aditif, dan yang menggunakan zat aditif. Kemudian, ditentukan daerah ultimit pada kurva tegangan-regangan. Untuk data yang berada diluar jangkauan daerah ultimit dilakukan evaluasi, sehingga model kurva yang diperoleh berupa linear. Dari model kurva tersebut, didapatkan persamaan regresi linear yang digunakan untuk melakukan uji validitas. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kelayakan model kurva dibandingkan hasil eksperimen peneliti terdahulu.

Hasil dan Pembahasan

Hasil dari analisis adalah besarnya pengaruh FAS terhadap tegangan dan grafik persebaran data serta model kurva hubungan tegangan-regangan tekan beton menggunakan campuran agregat daur ulang 50% dan 100%.

Hubungan FAS dan tegangan seluruh data

Hasil analisis regresi linear pada SPSS terhadap FAS dan tegangan untuk beton dengan campuran agregat daur ulang 50% diperoleh nilai signifikansi sebesar 0,011 dan campuran 100% diperoleh nilai signifikansi sebesar 0,033. Nilai ini lebih kecil dari 0,05 yang disyaratkan untuk nilai batas dua variabel memiliki hubungan atau pengaruh. Sehingga dapat disimpulkan bahwa FAS memiliki hubungan atau pengaruh terhadap tegangan.



Gambar 3. Grafik hubungan FAS dan tegangan untuk keseluruhan data.

Hubungan FAS dan tegangan tanpa zat aditif

Nilai persentase pengaruh (R^2) antara FAS dan tegangan yang dihasilkan pada campuran 50% sebesar 10,60% dan campuran 100% sebesar 7,6%. Grafik sebaran data dapat dilihat pada Gambar 3.

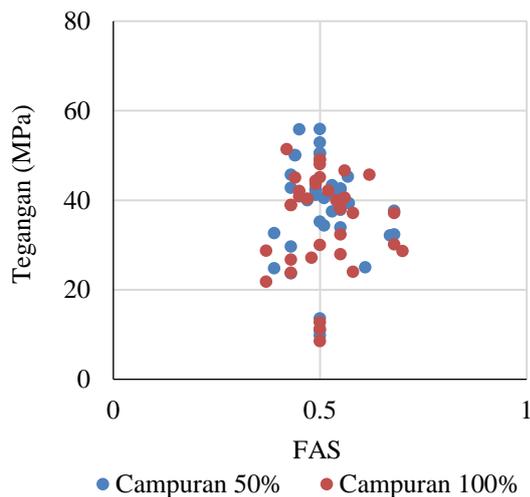
Hasil analisis regresi linear pada SPSS terhadap FAS dan tegangan untuk beton dengan campuran agregat daur ulang 50% diperoleh nilai signifikansi sebesar 0,039 dan campuran 100% diperoleh nilai signifikansi sebesar 0,021. Nilai ini lebih kecil dari 0,05 yang disyaratkan untuk nilai batas dua variabel memiliki hubungan atau pengaruh. Sehingga dapat disimpulkan bahwa FAS memiliki hubungan atau pengaruh terhadap tegangan.

Nilai persentase pengaruh (R^2) antara FAS dan tegangan yang dihasilkan pada campuran 50% sebesar 11,1% dan campuran 100% sebesar 13,5%. Grafik sebaran data dapat dilihat pada Gambar 4. Persamaan regresi yang diperoleh berturut-turut campuran 50% dan 100%, yaitu:

$$Y = 17,625 - 39,141X \quad (3)$$

$$Y = 14,225 - 40,328X \quad (4)$$

dimana X merupakan regangan dan Y merupakan tegangan (MPa).



Gambar 4. Grafik hubungan FAS dan tegangan untuk beton RCA tanpa zat aditif.

Hubungan FAS dan tegangan beton RCA yang menggunakan zat aditif

Hasil analisis regresi linear pada SPSS terhadap FAS dan tegangan untuk beton dengan campuran agregat daur ulang 50% diperoleh nilai signifikansi sebesar 0,014 dan campuran 100% diperoleh nilai signifikansi sebesar 0,022. Nilai ini lebih kecil dari 0,05 yang disyaratkan untuk nilai batas dua variabel memiliki hubungan atau pengaruh.

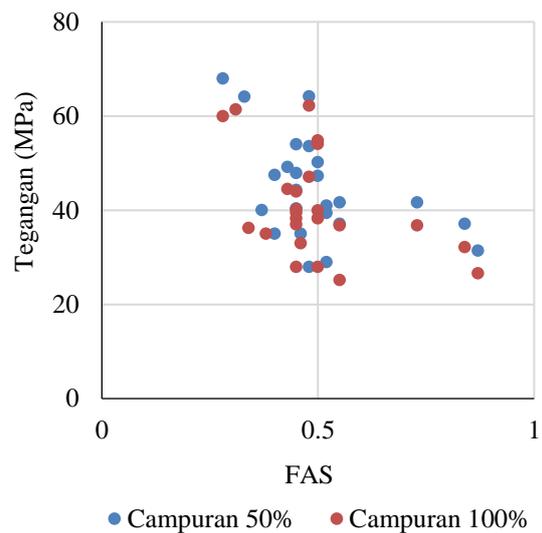
Sehingga dapat disimpulkan bahwa FAS memiliki hubungan atau pengaruh terhadap tegangan.

Nilai persentase pengaruh (R^2) antara FAS dan tegangan yang dihasilkan pada campuran 50% sebesar 24,3% dan campuran 100% sebesar 21,7%. Grafik sebaran data dapat dilihat pada Gambar 5. Persamaan regresi yang diperoleh berturut-turut campuran 50% dan 100%, yaitu:

$$Y = 63,530 - 38,097X \quad (5)$$

$$Y = 58,612 - 35,918X \quad (6)$$

dimana X merupakan regangan dan Y merupakan tegangan (MPa).



Gambar 5. Grafik hubungan FAS dan tegangan untuk beton dengan agregat daur ulang yang menggunakan zat aditif.

Hubungan tegangan-regangan pada campuran beton RCA

Besarnya pengaruh regangan terhadap tegangan didapatkan melalui analisis regresi linear pada aplikasi SPSS. Sedangkan grafik sebaran data melalui Ms. Excel.

Hubungan tegangan-regangan seluruh data

Hasil analisis regresi linear pada SPSS terhadap regangan dan tegangan untuk beton dengan campuran agregat daur ulang 50% dan 100% diperoleh nilai signifikansi sebesar 0,000. Nilai ini lebih kecil dari 0,05 yang disyaratkan untuk nilai batas dua variabel memiliki hubungan atau pengaruh. Sehingga dapat disimpulkan bahwa regangan memiliki hubungan atau pengaruh terhadap tegangan.

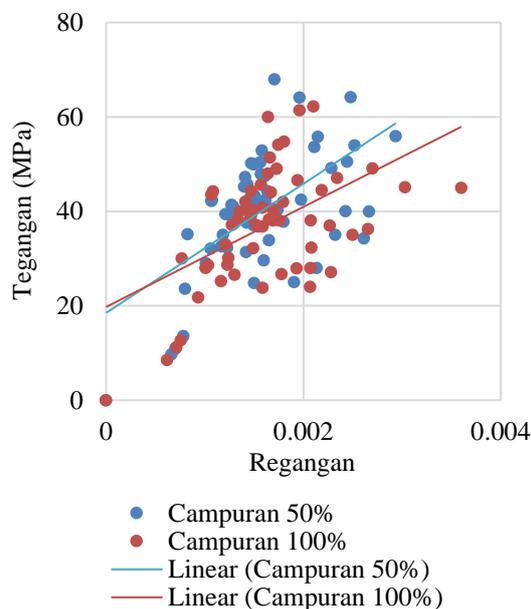
Nilai persentase pengaruh (R^2) antara regangan dan tegangan yang dihasilkan pada campuran 50%

sebesar 36% dan campuran 100% sebesar 26,7%.
Persamaan regresi yang diperoleh berturut-turut
campuran 50% dan 100%, yaitu:

$$Y = 18,141 + 13910,25X \quad (7)$$

$$Y = 19,819 + 10529,048X \quad (8)$$

dimana X merupakan regangan dan Y merupakan
tegangan (MPa).



Gambar 6. Grafik hubungan tegangan regangan keseluruhan data

Melalui grafik hubungan tegangan-regangan dapat diketahui bahwa tegangan yang dihasilkan pada campuran 50% lebih baik dibandingkan 100%. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 6, hubungan tegangan-regangan tanpa menggunakan zat aditif.

Hasil analisis regresi linear pada SPSS terhadap regangan dan tegangan untuk beton dengan campuran agregat daur ulang 50% dan 100% diperoleh nilai signifikansi sebesar 0,000. Nilai ini lebih kecil dari 0,05 yang disyaratkan untuk nilai batas dua variabel memiliki hubungan atau pengaruh. Sehingga dapat disimpulkan bahwa regangan memiliki hubungan atau pengaruh terhadap tegangan. Nilai persentase pengaruh (R^2) antara regangan dan tegangan yang dihasilkan pada campuran 50% sebesar 40,80% dan campuran 100% sebesar 32,20%.

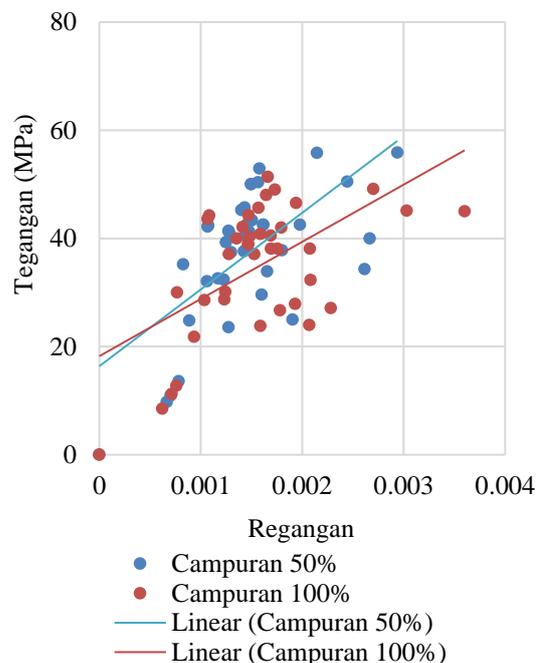
Persamaan regresi yang diperoleh berturut-turut campuran 50% dan 100%, disajikan oleh Persamaan 9 dan 10.

$$Y = 16,229 + 14261,103X \quad (9)$$

$$Y = 17,617 + 10611,076X \quad (10)$$

dimana X merupakan regangan dan Y merupakan tegangan (MPa).

Melalui grafik hubungan tegangan-regangan dapat diketahui bahwa tegangan yang dihasilkan pada campuran 50% lebih baik dibandingkan 100%. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik hubungan tegangan regangan tanpa menggunakan zat aditif.

Hubungan tegangan-regangan menggunakan zat aditif

Hasil analisis regresi linear pada SPSS terhadap regangan dan tegangan untuk beton dengan campuran agregat daur ulang 50% diperoleh nilai signifikansi sebesar 0,000 dan campuran 100% diperoleh nilai signifikansi sebesar 0,003. Nilai ini lebih kecil dari 0,05 yang disyaratkan untuk nilai batas dua variabel memiliki hubungan atau pengaruh. Sehingga dapat disimpulkan bahwa regangan memiliki hubungan atau pengaruh terhadap tegangan.

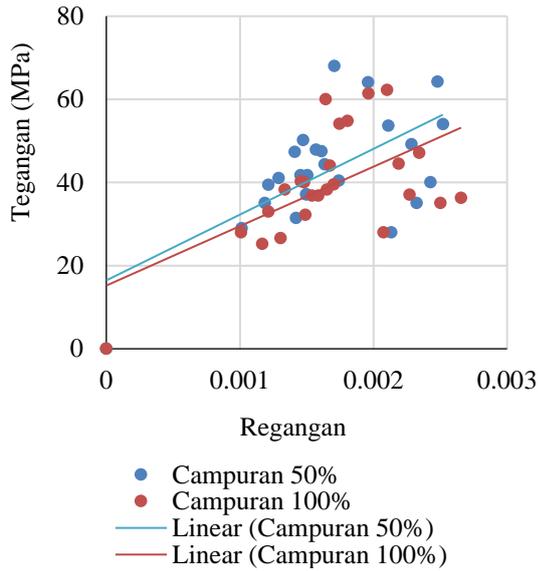
Nilai persentase pengaruh (R^2) antara regangan dan tegangan yang dihasilkan pada campuran 50% sebesar 42,60% dan campuran 100% sebesar 32,20%. Persamaan regresi yang diperoleh berturut-turut campuran 50% dan 100%, yaitu:

$$Y = 15,724 + 16281,916X \quad (11)$$

$$Y = 15,932 + 13832,649X \quad (12)$$

dimana X merupakan regangan dan Y merupakan tegangan (MPa).

Melalui grafik hubungan tegangan-regangan pada Gambar 8, dapat diketahui bahwa tegangan yang dihasilkan pada campuran 50% lebih baik dibandingkan 100%.



Gambar 8. Grafik hubungan tegangan regangan beton yang menggunakan zat aditif.

Model kurva tegangan-regangan

Model kurva didapatkan dari evaluasi persebaran data awal secara manual pada nilai yang berada di luar daerah fase maksimum. Perbandingan terhadap tiga kategori kelompok data yaitu data keseluruhan, data untuk beton tanpa menggunakan aditif dan yang menggunakan aditif, menunjukkan bahwa untuk campuran 50% dan 100% kurva hubungan tegangan-regangan beton agregat daur ulang seluruh data dan tanpa menggunakan zat aditif memiliki kelandaian yang lebih rendah dibandingkan kurva yang menggunakan zat aditif.

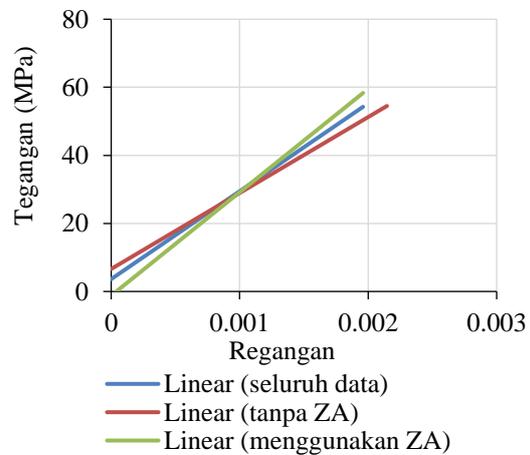
Analisis tersebut menunjukkan bahwa hubungan tegangan-regangan yang menggunakan zat aditif memiliki kuat tekan yang lebih besar dibandingkan kurva untuk seluruh data dan tanpa menggunakan zat aditif. Hal ini sesuai terhadap teori bahwa dengan adanya penambahan zat aditif dapat mempengaruhi peningkatan kuat tekan beton. Maka dari itu, dapat disimpulkan bahwa beton agregat daur ulang campuran 50% dan 100% lebih baik digunakan sebagai pengganti agregat alam dengan menambahkan zat aditif. Grafik perbandingan dapat dilihat pada Gambar 9 dan 10.

Kesimpulan dari hasil penilaian yang menunjukkan campuran 50% memiliki performa yang lebih baik selaras dengan kajian yang dilakukan oleh Xiao *et al.* (2005). Menurut Xiao *et al.* (2005), diperoleh nilai kuat tekan yang menurun seiring bertambahnya persentase RCA dari campuran 50% senilai 29,60 MPa ke campuran 100% senilai 26,70 MPa. Hal ini ditinjau dengan nilai FAS yang sama yaitu 0,43. Sehingga, regangan yang diperoleh lebih besar,

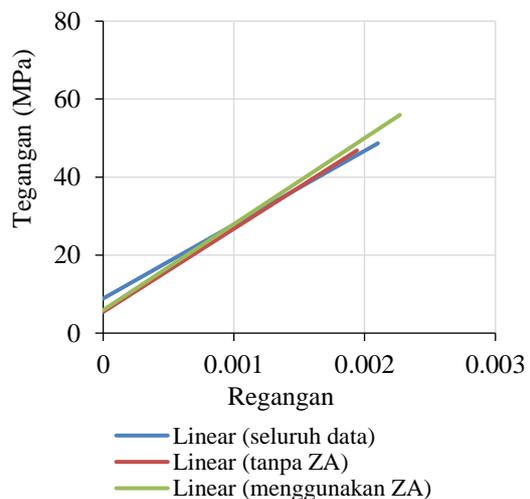
yaitu campuran 50% senilai 0,0016 dan campuran 100% senilai 0,0018.

Validasi hubungan linear tegangan–regangan terhadap hasil eksperimen terdahulu

Dari hasil validasi, dapat diketahui nilai r_{xy} dan r_{tabel} sebagai syarat penentuan uji validitas menunjukkan bahwa hubungan tegangan–regangan campuran 50% dan 100% berturut-turut untuk keseluruhan data, $r_{xy} > r_{tabel} = 0,747 > 0,279$ (*valid*) dan $r_{xy} > r_{tabel} = 0,635 > 0,279$ (*valid*). Sedangkan hubungan tegangan–regangan campuran 50% dan 100% untuk data tanpa menggunakan zat *aditif* $r_{xy} > r_{tabel} = 0,730 > 0,339$ (*valid*) dan $r_{xy} > r_{tabel} = 0,742 > 0,355$ (*valid*). Untuk hubungan tegangan–regangan campuran 50% dan 100% berturut-turut untuk data yang menggunakan zat *aditif* menunjukkan bahwa $r_{xy} > r_{tabel} = 0,876 > 0,482$ (*valid*) dan $r_{xy} > r_{tabel} = 0,738 > 0,444$ (*valid*).



Gambar 9. Perbandingan kurva hubungan tegangan-regangan campuran 50%



Gambar 10. Perbandingan kurva hubungan tegangan-regangan campuran 100%

Melalui pengujian validitas tersebut, dapat disimpulkan bahwa model kurva hubungan tegangan-regangan valid terhadap eksperimen peneliti terdahulu. Maka dari itu, model ini dapat dikatakan memenuhi syarat sebagai model kurva tegangan-regangan.

Perbandingan sebaran data tegangan-regangan campuran 50% dan 100% dalam lingkup penelitian ini didasarkan dengan mengambil kuat tekan netral sebesar 40 MPa dimana sebagian besar data terkonsentrasi pada f'_c 40 MPa. Maka dari itu, diketahui bahwa data beton agregat daur ulang campuran 50% yang memiliki $f'_c \geq 40$ MPa sebanyak 37 buah data benda uji dari total 62 data benda uji untuk campuran beton dengan 50% agregat daur ulang. Sedangkan campuran 100% yang memiliki kuat tekan $f'_c \geq 40$ MPa sebanyak 27 dari 62 data beton dengan campuran agregat daur ulang 100%. Maka, diartikan bahwa persentase kuat tekan campuran 50% dan 100% masing-masing sebesar 59,68% dan 43,55%. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan agregat daur ulang dengan campuran 50% didapatkan kuat tekan yang lebih baik dibandingkan campuran 100%.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa melalui pengujian regresi linear pada aplikasi SPSS diperoleh adanya hubungan FAS terhadap tegangan maupun regangan meskipun persentasenya kecil. Untuk pemodelan kurva hubungan tegangan-regangan teruji valid melalui pengujian validitas menggunakan persamaan regresi yang diperoleh dari kurva tersebut. Pada lingkup penelitian ini, diketahui bahwa kuat tekan campuran 50% lebih baik dibandingkan campuran 100%. Hal ini ditinjau dari persentase banyaknya nilai kuat tekan yang lebih besar dari 40 MPa.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) USK untuk dukungan pada penelitian ini.

Daftar Pustaka

Ajdukiewicz, A., & Kliszczewicz, A. (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and concrete composites*, 24(2), 269-279.

Bélen, G. F., Fernando, M. A., Javier, E. L., Sindy, S. P. (2011). Effect of recycled coarse aggregate

on damage of recycled concrete. *Materials and Structures*, 44(10), 1759-1771.

Breccolotti, M., D'Alessandro, A., Roscini, F., & Bonfigli, M. F. (2015). Investigation of stress-strain behaviour of recycled aggregate concrete under cyclic loads. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 14(7).

Chakradhara Rao, M., Bhattacharyya, S. K., & Barai, S. V. (2011). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and structures*, 44(1), 205-220.

Dimitriou, G., Savva, P., & Petrou, M. F. (2018). Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 158, 228-235.

Domingo, A., Lázaro, C., Gayarre, F. L., Serrano, M. A., & López-Colina, C. (2010). Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete. *Materials and structures*, 43(8), 1147-1160.

Etxeberria, M., Marí, A. R., & Vázquez, E. (2007a). Recycled aggregate concrete as structural material. *Materials and structures*, 40(5), 529-541.

Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007b). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and concrete research*, 37(5), 735-742.

Ferreira, L., De Brito, J., & Barra, M. (2011). Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*, 63(8), 617-627.

Gonzalez-Fonteboa, B., Martinez-Abella, F., Eiras-Lopez, J., & Seara-Paz, S. (2011). Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete. *Materials and structures*, 44(10), 1759-1771.

Jo, B. W., Park, S. K., & Park, J. C. (2008). Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 22(12), 2281-2291.

Khatib, J. M. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and concrete research*, 35(4), 763-769.

Kou, S. C., Poon, C. S., & Chan, D. (2007). Influence of fly ash as cement replacement on the

- properties of recycled aggregate concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 19(9), 709-717.
- Kou, S. C., Poon, C. S., & Wan, H. W. (2012). Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 36, 881-889.
- Kou, S. C., & Poon, C. S. (2013). Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 37, 12-19.
- Limbachiya, M., Meddah, M. S., & Ouchagour, Y. (2012). Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. *Construction and Building Materials*, 27(1), 439-449.
- Malešev, M., Radonjanin, V., & Marinković, S. (2010). Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. *Sustainability*, 2(5), 1204-1225.
- Mohammed, S. I., & Najim, K. B. (2020, February). Mechanical strength, flexural behavior and fracture energy of Recycled Concrete Aggregate self-compacting concrete. In *Structures* (Vol. 23, pp. 34-43). Elsevier.
- Mohammed, N., Sarsam, K., & Hussien, M. (2018). The influence of recycled concrete aggregate on the properties of concrete. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 162, p. 02020). EDP Sciences.
- Ozbakkaloglu, T., Gholampour, A., & Xie, T. (2018). Mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete: effect of recycled aggregate properties and content. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(2), 04017275.
- Rahal, K. (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and environment*, 42(1), 407-415.
- Soelarso, S., & Baehaki, B. (2016). Pengaruh Penggunaan Limbah Beton Sebagai Pengganti Agregat Kasar Pada Beton Normal Terhadap Kuat Tekan Dan Modulus Elastisitas. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, 5(2).
- Thomas, C., Setién, J., Polanco, J., Alaejos, P., & De Juan, M. S. (2013). Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and building materials*, 40, 1054-1065.
- Wang, Y., Zhang, H., Geng, Y., Wang, Q., & Zhang, S. (2019). Prediction of the elastic modulus and the splitting tensile strength of concrete incorporating both fine and coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 215, 332-346.
- Xiao, J., Li, J., & Zhang, C. (2005). Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and concrete research*, 35(6), 1187-1194.
- Xiao, J., Lu, D., & Ying, J. (2013). Durability of recycled aggregate concrete: an overview. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 11(12), 347-359.
- Xiao, J., Huang, Y., Yang, J., & Zhang, C. (2012). Mechanical properties of confined recycled aggregate concrete under axial compression. *Construction and Building Materials*, 26(1), 591-603.
- Zhao, J. L., Yu, T., & Teng, J. G. (2015). Stress-strain behavior of FRP-confined recycled aggregate concrete. *Journal of composites for construction*, 19(3), 04014054.
- Zhou, C., & Chen, Z. (2017). Mechanical properties of recycled concrete made with different types of coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 134, 497-506.