

Perbandingan Efektivitas antara Sambungan Lewatan dan Sambungan Mekanis Tipe Coupler pada Balok Beton Bertulang

Comparison of Effectivity Between Lap Splice and Mechanical Splice (Threaded Coupler type) in RC Beams

Rizky Wahyu Nugraha¹, Jafar^{1*}

¹ Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

* Penulis korespondensi : jafar@uii.ac.id

Tel.: +628522841415

Diterima: Des 7, 2023; Direvisi: Jan 29, 2024; Disetujui: Feb 5, 2024.

DOI: 10.25299/saintis.2024.vol24(01).14615

Abstrak

Dalam SNI 2052:2017, dijelaskan bahwa panjang dari tulangan beton ditetapkan dengan panjang maksimal 12 m. Ukuran standar panjang maksimal baja tulangan ini ditetapkan dengan tujuan kemudahan transportasi dan penyimpanannya. Dengan adanya ketetapan batas panjang baja tulangan, membuat kebutuhan akan panjang baja tulangan yang tepat di proyek-proyek konstruksi terkadang tidak tercukupi. Dalam mengatasi masalah ini, diperlukan sambungan tulangan dengan jenis penyambungan yang efektif serta dengan panjang penyambungan yang bisa menyalurkan beban atau tegangan yang dialami oleh satu tulangan ke tulangan yang lain. Berdasarkan permasalahan yang ada, studi ini bertujuan untuk meneliti perbandingan antara dua jenis sambungan yang tersedia saat ini, yaitu jenis sambungan lewatan dan jenis sambungan mekanis. Dalam penelitian ini, perhitungan nilai panjang total penyaluran sambungan tulangan lewatan menggunakan SNI 2847:2019 sebagai acuannya. Sementara itu, desain sambungan mekanis yang dipakai merupakan jenis threaded coupler. Penelitian ini membandingkan performa kedua sambungan tersebut dalam aspek momen nominal pengujian kuat lentur dan lendutan maksimumnya. Penelitian ini menghasilkan nilai momen nominal kuat lentur sambungan lewatan dan sambungan mekanis coupler berturut-turut sebesar 33,546 kNm dan 24,246 kNm, nilai lendutan maksimum sambungan lewatan dan sambungan mekanis coupler berturut-turut sebesar 69,37 mm dan 8,689 mm. Berdasarkan hasil penelitian, ditarik kesimpulan bahwa performa sambungan lewatan lebih baik dibandingkan dengan sambungan coupler, baik dalam aspek nominal pengujian kuat lenturnya dan lendutan maksimumnya. Hal ini disebabkan oleh pengurangan luasan penampang tulangan. Pada proses penyambungan dengan coupler, luasan permukaan tulangan mengalami reduksi untuk keperluan pembuatan drat ulir.

Kata Kunci: Beton, Bertulang, Sambungan, Lewatan, Sambungan, Mekanis

Abstract

In SNI 2052:2017, it is explained that the length of concrete reinforcement is set at a maximum length of 12 m. The standard size of the maximum length of reinforcing bar is determined with the aim of ease of transportation and storage. With the determination of the length limit of reinforcing bar, the need for the proper length of reinforcing bar in construction projects is sometimes not fulfilled. In overcoming this problem, it is necessary to splice the rebars with an effective mechanism to successfully transmit the load or stress from one rebar to another. Based on the existing problems, the author is interested in examining the comparison between the two types of splice currently available, namely the lap splice and mechanical splice coupler type. In this study, the estimation of the the total lapped length followed SNI 2847:2019 as a reference. This study compares the performance of the two splicing method in terms of the nominal moment aspects of their flexural strength testing, their maximum deflection, and the costs that need to be incurred in their use. This research showed the nominal bending moment values of lap splice and mechanical splice were 33,546 kNm and 24,246 kNm, respectively; the maximum deflection measured were 69,37 mm and 8,689 mm respectively. Based on the results of the study, it can be concluded that the performance of the lap splice is better than the mechanical splice coupler type, both in the nominal aspect of the flexural strength test and the maximum deflection. The reason is the section area of rebar was deducted subjected to the splicing process.

Keywords: RC Beam, Lap, Splice, Mechanical, Splice

PENDAHULUAN

Beton atau *concrete* merupakan sebuah kombinasi yang tercipta dari campuran semen hidrolis seperti *portland cement* ataupun *hydraulic cement* lain, agregat yang mencakup agregat kasar (batu split dan halus (pasir), air, dan ataupun tidak dengan bahan tambahan yang selanjutnya dibentuk menjadi sebuah masa padat [1]. Lalu, baja tulangan

yang digunakan untuk beton ialah sebuah baja yang terpadu dari karbon atau baja campuran lain yang umumnya memiliki bentuk batangan dengan penampang melingkar serta memiliki permukaan polos untuk BjTP dan ulir untuk BjTS [2].

Panjang tulangan beton ditetapkan dengan panjang maksimal 12 m [2]. Ukuran standar panjang maksimal baja tulangan ini ditetapkan dengan tujuan kemudahan transportasi dan

penyimpanannya [3], [4]. Dengan adanya ketetapan batas panjang baja tulangan, membuat kebutuhan akan panjang baja tulangan yang tepat di proyek-proyek konstruksi terkadang tidak tercukupi. Dalam mengatasi masalah ini, diperlukan sambungan tulangan dengan jenis penyambungan yang efektif serta dengan panjang penyambungan yang bisa menyalurkan beban atau tegangan yang dialami oleh satu tulangan ke tulangan yang lain.

Terdapat tiga cara dalam pekerjaan sambungan tulangan yang dapat dilakukan, yaitu sambungan tulangan yang disambungkan dengan lewatan (*lap splice*), sambungan tulangan yang disambung dengan las (*welded splice*), dan sambungan tulangan yang disambung dengan sambungan mekanis (*mechanical splice*) [5], [6]. Ketiga metode penyambungan tersebut tentu memiliki perbedaan, seperti performa sambungan, dan biaya yang harus dikeluarkan yang tergantung kepada metode yang digunakan. Perbedaan di antara metode sambungan dapat mempengaruhi performa dari struktur yang akan dibangun, dan biaya/harga yang harus dikeluarkan. Maka dari itu, diperlukan sebuah referensi atau acuan dalam pemilihan salah satu atau semua metode sambungan dalam suatu proyek konstruksi agar proyek bisa berjalan dengan baik.

Sambungan lewatan adalah cara penyambungan yang dilakukan dengan memberikan lewatan (*overlapping*) batang tulangan yang sejajar dengan panjang tertentu [7]. Sambungan lewatan adalah jenis sambungan yang paling sederhana. Namun demikian, ada beberapa kekurangan dari sambungan tipe ini yaitu (i) terjadinya penumpukan jumlah tulangan di area yang disambung, (ii) mengurangi kapasitas kekuatan dan *displacement* ketika ada sambungan di area yang memungkinkan terjadinya deformasi *inelastik* [8]. Tipe sambungan yang berikutnya adalah sambungan mekanis. Dalam sambungan mekanis, tulangan disatukan dengan menggunakan elemen penyambung (*coupler*). Salah satu jenis sambungan mekanis yang dapat digunakan adalah sambungan mekanis tipe *coupler*.

Setidaknya terdapat tiga tipe dasar dari sambungan mekanis, yaitu: 1). Sambungan tegangan tekan; 2). Sambungan tegangan tarik; 3). Sambungan tegangan tekan-tarik [9]. Perbedaan dari ketiga tipe dasar sambungan mekanis tersebut berada pada fungsinya. Sambungan mekanis tegangan tekan didesain dengan fungsi menahan tegangan tekan, sambungan mekanis tegangan tarik didesain dengan fungsi menahan tegangan tarik, dan sambungan mekanis tegangan tekan-tarik didesain dengan fungsi menahan tegangan tekan

dan tarik. Sambungan mekanis yang diimplementasikan dalam penelitian ini adalah sambungan mekanis tegangan tekan-tarik. Salah satu tipe dari sambungan mekanis tegangan tekan-tarik ini adalah *threaded rebar coupler*. *Coupler* merupakan sebuah alat yang memiliki pola ulir di bagian dalamnya, digunakan untuk menyambungkan satu tulangan dengan tulangan lain yang bertujuan untuk menyalurkan beban antar tulangan [9]. *Threaded rebar coupler* ini digunakan pada penelitian sebelumnya [10].

Penyambungan tulangan memainkan peran penting dalam respons elemen dan struktur beton bertulang untuk mentransfer tegangan dari satu batang ke batang tulangan lainnya dalam beton bertulang [7]. Tegangan yang ditransfer dari satu tulangan ke tulangan lain bisa berupa tegangan tarik maupun tekan. Saat melakukan penyambungan tulangan, tentunya diharapkan performa elemen struktur dapat menyamai performa elemen yang tidak memiliki sambungan. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini akan melakukan pengujian beton bertulang yang menggunakan sambungan dengan penyambungan lewatan dan penyambungan mekanis tegangan tarik dengan tipe *threaded rebar coupler*. Penelitian ini berfokus kepada efektivitas dari kedua sambungan tersebut yang dari aspek performa lentur. Penelitian ini dilaksanakan dengan harapan dapat menjadi referensi atau acuan bagi para perancang serta kontraktor dalam menerapkan sambungan tulangan di suatu struktur.

METODOLOGI

Material

Material yang dipakai dalam penelitian bisa dilihat antara lain :

1. Material Beton Bertulang:
 - a. *Portland cement* tipe 1.
 - b. Agregat kasar dan halus yang berasal dari Sungai Progo.
 - c. Air yang berasal dari Laboratorium Teknologi dan Bahan Konstruksi Universitas Islam Indonesia.
 - d. Baja tulangan utama berprofil ulir dengan diameter D13 berjumlah dua (2D13) dan baja tulangan pokok berprofil polos dengan diameter P10 berjumlah dua (2P10), serta tulangan sengkang berdiameter P18 dengan spasi 150 mm (P8-150).
2. Sambungan mekanis berjenis *rebar coupler*.

Alat yang digunakan

Peralatan yang dipakai dalam penelitian diperoleh dari Laboratorium Teknologi dan Bahan

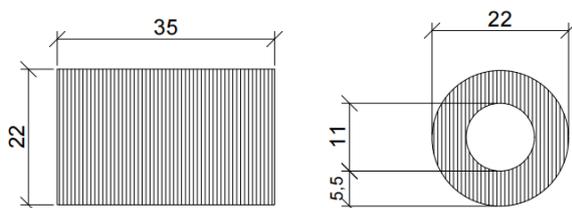
Perbandingan Efektivitas Antara Sambungan Lewatan dan Sambungan Mekanis Tipe Coupler Pada Balok Beton Bertulang (Nugraha dan Jafar)

Konstruksi Universitas Islam Indonesia. Alat-alat yang dipakai antara lain:

1. Mixer atau pengaduk beton.
2. Bekisting berdimensi 150 x 300 x 2000 mm berbahan multiplex.
3. Neraca berkapasitas 20 kg.
4. Vibrator saringan dan saringan.
5. Alat pencetak benda uji silinder berdimensi 150 mm dan tinggi 300 mm.
6. Alat uji tekan (*Compression Testing Machine*).
7. Crane yang digunakan untuk mempermudah perpindahan benda uji balok.
8. Load cell digunakan untuk pembacaan beban yang terjadi pada beton.
9. Data logger yaitu alat yang dipakai untuk membaca sekaligus memperlihatkan data dari hasil pengujian.
10. Wadah, ember, kuas, oli, cangkul, sekop, oven, alat uji slump, palu, dan alat pembantu lainnya.
11. Linear Variable Differential Transformer (LVDT) atau sensor LVDT.
12. Strain Gauge.

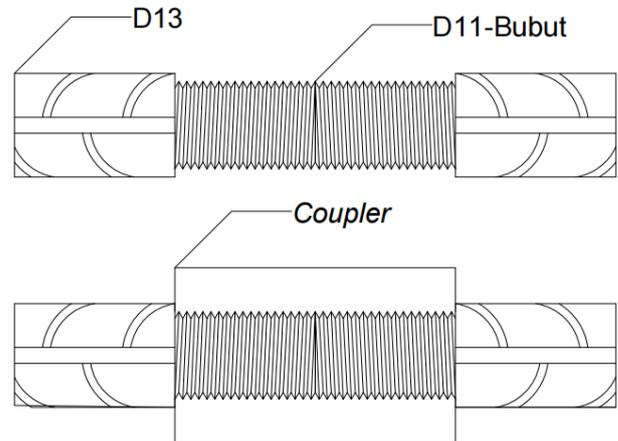
Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen. Data-data yang dibutuhkan didapatkan dari serangkaian pengujian yang dilakukan di laboratorium teknologi bahan konstruksi Universitas Islam Indonesia. Bahan-bahan serta peralatan yang digunakan merupakan bahan dan peralatan yang umum digunakan dalam pembuatan balok beton bertulang dengan tambahan bahan damdex untuk mempersingkat umur kuat beton. Tahapan penelitian ini meliputi pengujian agregat kasar dan halus, pengujian material penyusun beton, persiapan desain balok beton bertulang, dan pengujian balok beton bertulang. Pengujian agregat kasar dan halus berpedoman pada SNI 03-2834-2000 yang meliputi pengujian berat jenis dan penyerapan, Modulus Halus Butir (MHB), kandungan lumpur, dan berat volume. Lalu pengujian material penyusun beton meliputi pengujian baja tulangan normal, baja tulangan yang disambung dengan sambungan mekanis *coupler*, dan pengujian kuat tekan beton. Gambar 1 dan 2 yang menunjukkan desain sambungan mekanis *coupler* dan baja tulangan yang disambung dengan sambungan mekanis *coupler*.



Gambar 1. Desain Sambungan Mekanis Coupler

Gambar 1 menunjukkan sketsa *threaded coupler* yang digunakan dalam penelitian ini. *Coupler* ini berbentuk silinder berongga dengan ukuran diameter luar sebesar 22 mm dan diameter dalam sebesar 11 mm. Panjang *coupler* adalah 35 mm. Tulangan yang dapat disambung dengan menggunakan *coupler* ini adalah tulangan dengan diameter 13 mm.



Gambar 2. Desain Baja Tulangan yang disambung dengan Sambungan Mekanis Coupler

Gambar 2 menunjukkan sketsa besi tulangan yang disambung dengan menggunakan *coupler*. Untuk dapat disambung, diameter besi tulangan perlu dikurangi dengan cara dibubut untuk keperluan pembuatan drat ulir. Setelah drat ulir tersedia, tulangan-tulangan yang akan disambung dapat dirangkai dengan menggunakan *coupler*. Diameter tulangan setelah dibubut adalah 11 mm, menyesuaikan dengan diameter dalam *threaded coupler*.

Selanjutnya pada pengujian kuat tekan beton, sampel uji kuat tekan merupakan silinder dengan dimensi 150 x 300 mm. Diuji menggunakan alat uji tekan.

Penelitian ini menghendaki bahwa baja tulangan harus terlebih dahulu mencapai kelelahan sebelum beton mengalami keruntuhan. Hal ini bertujuan untuk dapat mengetahui performa leleh dari baja tulangan yang tertanam di dalam beton. Oleh karena itu, balok beton bertulang didesain dengan tipe *under-reinforced concrete* dengan dimensi balok 150 x 300 mm, mutu beton rencana tidak lebih dari 25 MPa, tulangan tarik 2D-13, tulangan tekan 2P-10, dan tulangan geser P8-150. Untuk perhitungan sambungan lewatan yang tertanam di dalam balok beton, penulis menggunakan SNI 2847-2019 sebagai pedoman perhitungan.

Kinerja sambungan lewatan sangat dipengaruhi oleh beberapa parameter yakni selimut beton, panjang lewatan, proporsi tulangan yang disambungkan, diameter tulangan, adanya tulangan transversal di area yang disambung, propertis

beton yang digunakan serta posisi pengecoran [4], [11], [12].

Dalam SNI 2847:2019 terdapat ketentuan yang mengatur tentang penyaluran (ℓd) batang ulir. Dalam peraturan tersebut dikatakan panjang ℓd untuk batang ulir dan kawat ulir dalam kondisi tarik harus yang terbesar dari (a) dan (b):

- a) Panjang yang dihitung sesuai dengan persamaan (1) dengan menggunakan faktor modifikasi yang berlaku pada Tabel 1.
- b) 300 mm

$$\ell d = \left(\frac{f_y}{1,1 \lambda \sqrt{f'_c}} \frac{\Psi_t \Psi_e \Psi_s}{\left(\frac{C_b + K_{tr}}{d_b} \right)} \right) d_b \quad (1)$$

Keterangan:

- f_y = nilai tegangan leleh tulangan (MPa)
- f'_c = nilai tegangan desak beton (MPa)
- Ψ_t = faktor untuk posisi pengecoran
- Ψ_e = faktor untuk pelapis epoksi
- Ψ_s = faktor ukuran tulangan
- λ = faktor untuk jenis beton
- d_b = diameter tulangan (mm)
- C_b = jarak dari tepi ke tengah tulangan (mm)
- K_{tr} = faktor kontribusi tulangan pengaku

Tabel 1. Faktor Modifikasi untuk Panjang Penyaluran Batang Ulir dalam Kondisi Tarik

Faktor Modifikasi	Kondisi	Faktor
Beton ringan	Beton ringan	0,75
	Beton Normal	1,0
Epoksi, Ψ_e	Tulangan dengan pelapis epoksi atau seng dan pelapis ganda epoksi dengan selimut bersih kurang dari 3db atau spasi kurang dari 6db	1,5
	Tulangan dengan pelapis epoksi atau seng dan pelapis ganda epoksi dengan kondisi lainnya	1,2
	Tulangan tanpa pelapis atau pelapis seng (galvanis)	1,0
Ukuran, Ψ_s	$D_b \geq 22$ mm	1,0
	$D_b \leq 19$ mm	0,8
Posisi Pengecoran, Ψ_t	Lebih dari 30 mm beton segar diletakkan di bawah tulangan horizontal	1,3
	Lainnya	1,0

Berikut merupakan perhitungan desain sambungan lewatan.

1. Panjang penyaluran (ℓd)

Panjang penyaluran dihitung berdasarkan persamaan (1). Dalam persamaan tersebut terdapat beberapa variabel yang harus ditentukan terlebih dahulu berdasarkan Tabel 1 sebagai berikut.

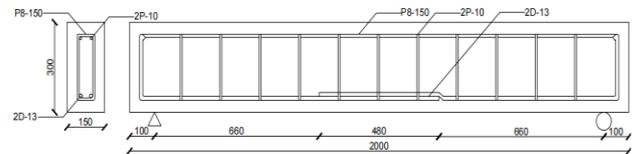
- f_y = 476,263 MPa
- f'_c = 25 MPa

- d_b = 13 mm
- λ = 1 (Beton Normal)
- Ψ_e = 1 (Tanpa Epoksi)
- Ψ_t = 1 (Posisi Pengecoran Lain)
- Ψ_s = 0,8 ($D < 19$ mm)
- C_b = 54 mm
- K_{tr} = 0 (sesuai izin SNI 2847:2019)
- $(C_b + K_{tr})/d_b \leq 2,5$ (sesuai SNI 2847:2019)

$$\begin{aligned} \ell d &= \left(\frac{476,263}{1,1 \times 1 \times \sqrt{25}} \frac{1 \times 1 \times 0,8}{\left(\frac{54 + 0}{13} \right)} \right) \times 13 \\ &= \left(\frac{476,263}{1,1 \times 1 \times \sqrt{25}} \frac{1 \times 1 \times 0,8}{(2,5)} \right) \times 13 \\ &= 360,228 \text{ mm} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan diatas didapatkan nilai ℓd sebesar 360,228. Nilai ini lebih besar dari 300 mm sehingga nilai ini dipilih sebagai nilai ℓd .

- 2. Panjang sambungan lewatan kondisi tarik (ℓ_{st})
Panjang sambungan lewatan ℓ_{st} batang ulir dan kawat ulir dalam kondisi tarik harus disesuaikan dengan SNI 2847:2019. Dalam peraturan tersebut untuk semua kelas diambil nilai ℓ_{st} yang terbesar dari 1,3 ℓd dan 300 mm. Oleh sebab itu, sambungan lewatan diambil sebesar 468,2964 mm (1,3 ℓd). Untuk simplifikasi desain, penulis memakai panjang penyaluran tulangan lewatan sebesar 480 mm.



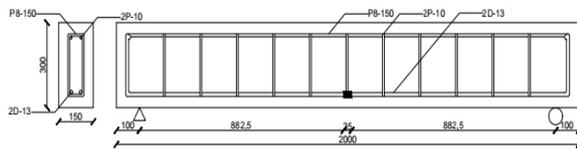
Gambar 3. Desain Balok Beton Bertulang Sambungan Lewatan

Gambar 3 menunjukkan sketsa rancangan balok beton bertulangan dengan sambungan lewatan terpasang di dalamnya. Ukuran balok yang disiapkan adalah 150 x 300 x 2000 mm. Balok yang diuji dalam penelitian ini menggunakan 2 jenis tulangan. Yang pertama adalah tulangan polos dengan diameter 8 mm (P8) sebagai tulangan tekan sebanyak 2 buah. Tulangan tekan diletakkan di sisi atas penampang. Jenis tulangan yang kedua adalah tulangan ulir dengan diameter 13 mm (D-13) sebagai tulangan tarik. Tulangan ini diletakkan di sisi bawah penampang. Karena pengujian ini meninjau performa lentur sambungan tulangan, maka sambungan tulangan dilakukan pada tulangan dengan diameter 13 mm.

Selanjutnya, desain untuk balok beton bertulang sambungan mekanis *coupler* memiliki perbedaan hanya pada sambungannya saja. Pada pemakaian sambungan ini, tidak ada perhitungan yang dilakukan. Tulangan yang akan disambung berada pada tengah bentang balok di daerah tarik. Pada ujung tulangan yang akan disambung dilakukan proses pembubutan agar dapat dipasang

Perbandingan Efektivitas Antara Sambungan Lewatan dan Sambungan Mekanis Tipe Coupler Pada Balok Beton Bertulang (Nugraha dan Jafar)

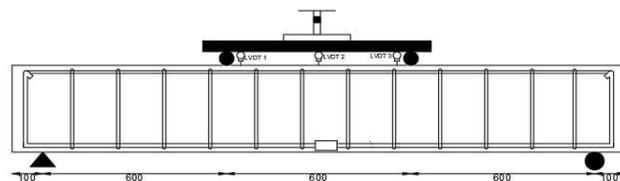
sebuah *threaded coupler* seperti pada Gambar 2. Coupler yang dipasang adalah hasil fabrikasi dengan nilai f_y rencana sebesar 500 MPa serta nilai f_y pengujian sebesar 530 MPa. Nilai f_y rencana serta f_y pengujian tersebut didapat dari sertifikat coupler nya ketika pembelian. Gambar 4 menunjukkan desain balok beton bertulangan sambungan mekanis *coupler*.



Gambar 4. Desain Balok Beton Bertulang Sambungan Mekanis *Coupler*

Gambar 4 menunjukkan sketsa rancangan balok beton bertulang dimana tulangan tariknya disambung dengan menggunakan *threaded coupler*. Ukuran balok sama seperti yang diuraikan pada Gambar 3. Perbedaannya hanya ada pada ilustrasi pemasangan *Coupler* saja.

Dalam pengujian kuat lentur, mekanisme pengujian balok beton bertulang menggunakan prinsip pembebanan dua titik. Kedua titik beban diposisikan di As bentang balok dengan jarak antara ujung titik beban ke ujung titik beban lain sebesar 1/3 bentang bersih balok. Selanjutnya, alat LVDT diletakan di ketiga titik potensial terjadinya lendutan akibat pembebanan, yaitu di dekat titik beban serta di tengah kedua titik beban. Gambar 5 menunjukkan ilustrasi pembebanan dua titik untuk uji lentur.



Gambar 5. Mekanisme Pembebanan Uji Kuat Lentur

Dapat dilihat pada Gambar 5, pembebanan yang digunakan dalam pengujian adalah pembebanan dua titik. Jarak antar titik beban adalah 600 mm. Dari gambar tersebut juga dapat dilihat penempatan 3 buah LVDT sensor. Dalam pengujian lentur, tiga LVDT Sensor ditempatkan pada titik-titik potensial terjadinya lendutan terbesar, yaitu satu tepat pada As sampel uji serta dua tepat di samping titik pembebanan.

HASIL DAN DISKUSI

Pengujian agregat

Pengujian ini adalah serangkaian pengujian pada agregat halus dan kasar yang digunakan dalam campuran beton. Pengujian ini dilaksanakan untuk memperoleh karakteristik material. Karakteristik tersebut kemudian dibandingkan dengan syarat campuran beton yang terdapat pada SNI 03-2834-

2000. Pengujian yang dilakukan meliputi uji modulus halus butir (MHB), uji berat jenis, penyerapan air, dan uji berat volume. Tabel 2 berikut merupakan hasil yang didapatkan. Dari hasil tersebut, agregat yang dipakai dalam penelitian ini telah sesuai dengan syarat yang ditetapkan oleh SNI 03-2843-2000.

Tabel 2. Hasil Pengujian propertis agregat

No	Pengujian	Agregat	Hasil
1	Berat Jenis	Kasar	2,6738
		Halus	2,6316
2	Penyerapan Air	Kasar	1%
		Halus	5%
3	MHB	Kasar	6,6505
		Halus	2,2622
4	Berat Isi Gembur (gram/cm ³)	Kasar	1,4909
		Halus	1,5291
5	Berat Isi Padat (gram/cm ³)	Kasar	1,5694
		Halus	1,5850
6	Kadar Lumpur	Halus	3,2%

Dari Tabel 2 di atas, nilai berat jenis agregat pada kondisi jenuh kering permukaan (SSD) adalah sebesar 2,6738 dan 2,6316 berturut-turut untuk agregat kasar dan halus. Dengan demikian, agregat yang digunakan masuk dalam kategori agregat normal. Nilai ini lebih lanjut digunakan dalam perencanaan proporsi campuran (mix design) untuk beton normal.

Untuk berat isi gembur dan padat, dapat dilihat pada tabel 2 bahwa seluruh nilai yang didapatkan berada pada rentang 1,2 – 1,7 gram/m³ seperti yang disyaratkan dalam SNI-03-4804-1998. Untuk kandungan lumpur, pada agregat halus persentase kandunagn lumpurnya adalah sebesar 3,2%. Nilai ini masih dibawah batas maksimum yakni sebesar 5%. Artinya material ini bisa digunakan untuk campuran beton.

Pengujian Baja Tulangan

Pengujian tarik baja tulangan dilakukan untuk mengetahui nilai propertis mekanik baja tulangan yang digunakan dalam beton bertulang. Propertis mekanik yang dimaksud adalah nilai tegangan leleh (f_y) dan nilai tegangan ultimit (f_u). Untuk mendapatkan nilai-nilai tersebut serangkaian pengujian dilakukan di laboratorium. Berdasarkan hasil pengujian laboratorium dan olah data yang dilakukan didapatkan nilai f_y dan f_u sebesar 476,26 MPa dan 627,27 MPa untuk tulangan yang tidak disambung (tulangan utuh). Adapun untuk tulangan yang disambung dengan *coupler* didapatkan nilai f_y dan f_u sebesar 464,27 MPa dan 557,43 MPa. Berikut merupakan Tabel 3 yang menunjukkan rekapitulasi pengujian material baja tulangan.

Tabel 3. Rekapitulasi Pengujian Baja Tulangan

No	Pengujian	Baja	Hasil	Satuan
1	Beban Leleh (Py)	Normal	60332	N
		Coupler	44145	N

No	Pengujian	Baja	Hasil	Satuan
2	Beban Ultimit (Pu)	Normal	79461	N
		Coupler	52974	N
3	Diameter	Normal	12,7	mm
		Coupler	11	mm
4	Luas Penampang Baja (A)	Normal	126,67	mm ²
		Coupler	95,03	mm ²
5	Teg. Leleh (fy)	Normal	476,26	MPa
		Coupler	464,52	MPa
6	Teg. Ultimit (fu)	Normal	627,27	MPa
		Coupler	557,43	MPa

Kelas baja tulangan yang digunakan sebagai tulanga tarik dalam penelitian ini adalah BJTS420B. Berdasarkan SNI 2052:2017, baja tulangan dengan kelas ini harus memiliki nilai kuat luluh minimum 420 MPa dan kuat tarik ultimit minimum 525 MPa. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan seperti ditunjukkan dalam Tabel 3, nilai kuat leleh minimum (476,26 MPa dan 464,52 MPa) dan kuat tarik ultimit minimum (627,27 MPa dan 557,43 MPa) baja tulangan yang digunakan dalam penelitian telah sesuai dengan persyaratan.

Pengujian Sampel Uji Kuat Tekan

Pada setiap sampel balok beton bertulang yang dibuat, disediakan 3 beton silinder untuk keperluan uji desak. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan nilai kuat desak beton silinder (f_c) pada masing-masing balok beton bertulang. Detil perhitungan nilai f_c dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi Pengujian Sampel Uji Tekan Beton Silinder

Sampel Uji	Luas mm ²	P Max N	Mutu MPa	Avg MPa
Lewatan 1	18110	460000	25,40	21,43
Lewatan 2	18027	380000	21,08	
Lewatan 3	17980	320000	17,80	21,65
Coupler 1	18027	420000	23,30	
Coupler 2	18122	310000	17,11	
Coupler 3	17932	440000	24,54	

Dari hasil pengujian desak silinder seperti ditunjukkan dalam Tabel 4, didapatkan nilai f_c rerata untuk sampel balok beton bertulang dengan sambungan lewatan dan sambungan mekanis tipe coupler sebesar 21,43 MPa dan 21,65 MPa. Nilai f_c yang direncanakan adalah 25 MPa sebagaimana diuraikan dalam metode penelitian. Realisasinya nilai f_c yang didapatkan tidak mencapai 25 MPa. Nilai ini pada akhirnya yang digunakan dalam analisis selanjutnya seperti untuk menghitung momen nominal yang mampu dikerahkan oleh balok beton bertulang.

Perhitungan Momen Nominal Teoretis

Dari pengujian beton silinder dan tarik baja tulangan yang telah dilakukan, didapatkan informasi mengenai propertis mekanik material yang digunakan dalam balok beton bertulang. Berdasarkan informasi tersebut, dilakukan

perhitungan momen nominal teoritis yang mampu dikerahkan oleh sampel balok beton bertulang. Langkah perhitungan momen lentur nominal maksimum dapat dilihat pada uraian di bawah ini.

Diketahui:

- Lebar penampang, B = 150 mm
- Tinggi penampang, H = 300 mm
- Selimit Beton, S_b = 40 mm
- Mutu Beton, f_c = 21,43 MPa
- Mutu Baja, f_y = 476,26 MPa
- Modulus, E_s = 200000 MPa

Titik Berat Tulangan Tarik

$$ds = sb + \phi s + (0,5 \times \phi p) = 54,5 \text{ mm}$$

$$d = h - ds = 245,5 \text{ mm}$$

Titik Berat Tulangan Tekan

$$ds' = sb + \phi s + (0,5 \times \phi p) = 53 \text{ mm}$$

Luasan tulangan Tekan (As) dan Tarik (As')

$$As' = 2 \times \frac{1}{4} \times \pi \times \phi P' = 157,079 \text{ mm}^2$$

$$As = 2 \times \frac{1}{4} \times \pi \times \phi P = 265,464 \text{ mm}^2$$

Jarak tepi balok daerah desak ke garis netral berdasarkan prinsip keseimbangan (diasumsikan desak belum leleh).

$$\Sigma H = 0$$

$$Ts = Cs + Cc$$

$$As \times fy = (0,85 \times f'c \times a \times b) + (As' \times fs)$$

$$As \times fy = (0,85 \times f'c \times (\beta \times c) \times b) + (As' \times (\frac{E_c}{E_s} \times (c - ds') \times Es))$$

$$2322,043 c^2 - 32183,281 c - 4995112,2 = 0$$

$$c = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$c_1 = 53,826 \text{ mm}$$

$$c_2 = -39,965 \text{ mm}$$

c pakai = 53,826 mm

$$a = \beta \times c = 0,85 \times 53,826 = 45,752 \text{ mm}$$

Regangan tarik baja

$$\epsilon_{sr} = (\frac{c - ds'}{c}) \times \epsilon_c = 0,00004604 < 0,00238$$

= Belum Leleh

$$fs = \epsilon_{sr} \times Es = 9,208 \text{ Mpa}$$

Kapasitas Momen Tulangan

$$Mn = Mn1 + Mn2$$

$$Mn1 = Cc \times Z1 = (0,85 \times f'c \times a \times b) \times (d - a/2) = 27,825 \text{ kNm}$$

$$Mn2 = Cs \times Z2 = (As' \times Fs) \times (d - ds')$$

Perbandingan Efektivitas Antara Sambungan Lewatan dan Sambungan Mekanis Tipe Coupler Pada Balok Beton Bertulang (Nugraha dan Jafar)

$$M_n = 0,2784 \text{ kNm}$$

$$M_n = 27,825 + 0,2784$$

$$= 28,103 \text{ kNm}$$

Rekapitulasi perhitungan momen teoretis seluruh sampel balok beton bertulang dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. M_n Teoretis Sampel Balok Beton Bertulang

Kode Sampel	Jenis Sambungan Tulangan Tarik	M_n Teoretis (kNm)
BL	Lewatan	28,103
BM	Coupler	20,079

Berdasarkan Tabel 5, diketahui bahwa balok dengan sambungan lewatan secara teoritis memiliki nilai momen nominal (M_n) yang lebih besar (28,103 kNm) dibandingkan dengan balok dengan sambungan coupler (20,079 kNm). Perbedaan nilai momen nominal ini disebabkan oleh perbedaan ukuran baja tulangan. Pada balok dengan sambungan lewatan, diameter penampang baja tulangan adalah 12,7 mm (ukuran awal). Adapun pada balok dengan sambungan coupler, dimensi penampang mengalami reduksi untuk keperluan pembuatan drat ulir (dibubut) sehingga diameternya berkurang menjadi 11 mm.

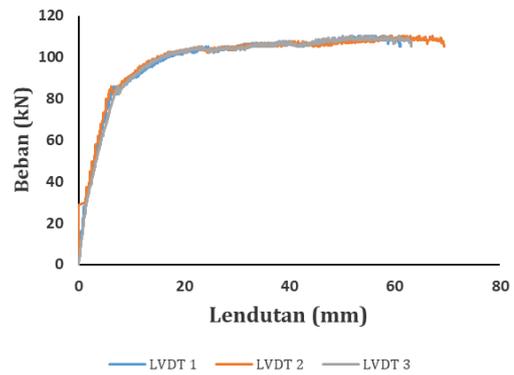
Pengujian Lentur Balok Beton Bertulang

Pengujian kuat lentur dilakukan pada benda uji balok beton bertulang yang berumur 28 hari. Hasil yang diperoleh dari pengujian lentur balok beton bertulang adalah beban maksimum dalam satuan kN serta defleksi dalam satuan mm yang diukur oleh LVDT. Disamping itu, dapat diamati juga pola retak yang terjadi seiring dengan penambahan beban oleh hydraulic jack. Beban maksimum dan lendutan dapat dilihat pada Tabel 6. Grafik hubungan antara beban dan lendutan dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7.

Tabel 6. Nilai Beban Maksimum

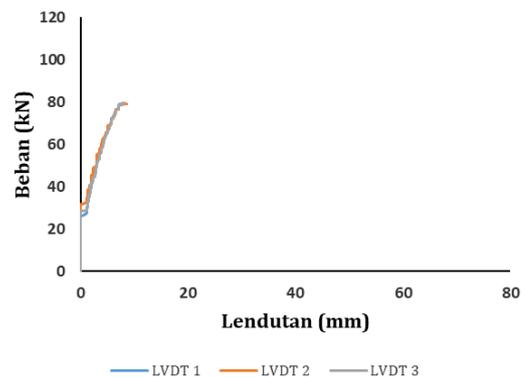
Kode Sampel	Sambungan Tulangan Tarik	Beban Maks. (P_{maks})	Lendutan maks. (mm)
BL	Lewatan	110,38	69,37
BM	Coupler	79,38	8,689

Dari Tabel 6 dapat dilihat bahwa balok beton bertulang dengan sambungan lewatan (BL) memperoleh nilai P_{maks} yang lebih besar dibandingkan balok beton bertulang dengan sambungan mekanis tipe *coupler* (BM), yakni 110,38 kN berbanding 79,38 kN. Hal ini mengindikasikan sambungan lewatan mampu memiliki kapasitas momen lentur yang lebih baik.



Gambar 6. Hasil Pembacaan LVDT pada BL

Pada Gambar 6, dapat dilihat bahwa seiring penambahan beban nilai lendutan semakin meningkat. Saat beban masih di rentang 0 - 87 kN, lendutan yang terjadi masih bersifat elastik karena batas leleh (*yield*) tulangan masih belum tercapai. Setelah mencapai titik leleh, lendutan meningkat secara signifikan. Pada fase ini, lendutan sudah bersifat inelastik. Saat mencapai lendutan maksimum sebesar 69,37 mm pada pembebanan sebesar 110,38 kN, balok beton mengalami kerusakan sehingga pengujian selesai.



Gambar 7. Hasil Pembacaan LVDT pada BM

Gambar 7 menunjukkan hubungan antara beban dan lendutan pada sampel balok dimana tulangannya disambung dengan *threaded coupler*. Sama seperti pada penjelasan pada gambar 6, lendutan yang tercatat meningkat seiring dengan penambahan beban. Yang berbeda adalah saat pembebanan mencapai titik leleh, tidak lama kemudian benda uji mengalami kerusakan sehingga pengujian berhenti. Lendutan maksimum yang tercatat adalah 8,689 mm pada saat beban mencapai 79,38 kN.

Dilihat dari segi besarnya lendutan maksimum yang tercatat sebelum balok beton bertulang mengalami keruntuhan, BL mendapatkan nilai lendutan yang lebih besar dibandingkan dengan BM. Lendutan yang diperoleh dari penelitian ini menunjukkan tren yang sama seperti penelitian yang dilakukan oleh [10] dan [13] dimana lendutan balok dengan sambungan coupler menunjukkan hasil yang lebih kecil dibandingkan

balok dengan sambungan lewatan. Hal ini disebabkan oleh panjang *threaded coupler* yang sangat terbatas. Seperti dapat dilihat pada Gambar 1, panjang coupler hanya 35 mm sehingga kapasitas regangannya sangat terbatas atau kecil. Dalam [13] dikatakan regangan akan terdistribusi dengan lebih baik apabila *coupler* berukuran lebih panjang sehingga deformasi yang terbentuk akan lebih besar. Ini juga merupakan indikasi bahwa BL memiliki performa yang lebih baik dibandingkan BM. Besar kecilnya lendutan pada balok beton bertulang menandakan level daktilitas. Daktilitas merupakan kemampuan elemen struktur untuk mengalami perubahan bentuk (deformasi) yang signifikan namun tidak runtuh secara tiba-tiba [14]. Daktilitas dapat juga dipahami sebagai nilai perbandingan antara deformasi ultimit dan deformasi leleh (*yield*) [15]. Elemen struktur dengan tingkat daktilitas yang baik tidak akan runtuh secara tiba-tiba tetapi akan memberikan peringatan awal (*early warning*) yang dapat diamati oleh pengguna bangunan [16].

Momen Lentur (Mn) Balok Beton Bertulang

Setelah dilakukan serangkaian pengujian laboratorium, didapatkan propertis mekanik bahan dan juga beban maksimum sampel balok beton bertulang. Selanjutnya, dilakukan perhitungan momen lentur balok aktual berdasarkan hasil uji laboratorium.

Langkah-langkah perhitungan momen nominal dari hasil pengujian laboratorium adalah sebagaimana analisis statis tertentu pada balok sederhana (*simple beam*). Sesuai *set-up* pengujian yang telah diuraikan di bagian metodologi penelitian, balok beton bertulang tertumpu sederhana pada kedua ujungnya. Kemudian, beban titik diletakkan di sekitar tengah bentang balok. Dengan pembebanan seperti ini, momen maksimum balok diperkirakan terjadi tepat di tengah bentang balok. Dengan analisa tersebut didapatkan nilai momen nominal hasil laboratorium sebesar 33,546 kNm untuk sampel BL dan 24,246 kNm untuk sampel BM. Balok dengan sambungan tulangan lewatan menghasilkan momen nominal yang lebih besar dibandingkan dengan balok dengan sambungan tulangan menggunakan *coupler*.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa balok BM memiliki nilai Mn yang lebih kecil dibandingkan dengan balok BL. Hal ini salah satunya disebabkan oleh berkurangnya luasan penampang baja tulangan tarik untuk keperluan pemasangan *coupler*. Baja tulangan yang disambung dengan menggunakan *coupler* dibubut kedua ujungnya untuk menyediakan drat ulir supaya bisa dihubungkan satu sama lain. Akibatnya, dimensi bersih dari baja tulangan yang digunakan berkurang. Adapun pada sambungan lewatan, baja tulangan diletakkan secara berdampingan satu sama lain dan tidak ada pengurangan dimensi penampang.

Momen lentur nominal dari uji aboratorium ini kemudian dibandingkan dengan momen lentur nominal dari perhitungan teoretis yang sudah dihitung pada sub bab sebelumnya di atas. (Lihat Tabel 7).

Tabel 7. Rekapitulasi Rasio Mn Teoretis dan Mn Pengujian

Kode Sampel	Mn Teoretis	Mn Pengujian	Rasio
	kNm	kNm	
BL (Lewatan)	28,103	33,546	1,194
BM (Coupler)	20,079	24,246	1,210

Berdasarkan rekapitulasi pada Tabel 7, dapat diketahui bahwa Mn percobaan pada balok BL dan BM menunjukkan nilai yang lebih besar dibandingkan Mn teoretis. Hal ini disebabkan oleh adanya penyederhanaan dalam proses perhitungan analitik Mn teoretis. Salah satu contohnya adalah tidak diperhitungkannya kuat tarik beton dalam analisis. Padahal seperti yang telah umum diketahui, beton juga memiliki kuat tarik meskipun relatif kecil yakni 9-15% dari kuat desaknya [17].

Tipe Kerusakan Balok Beton Bertulang

Gambar 9 merupakan kerusakan pada balok BL yang diamati setelah pengujian laboratorium. Berdasarkan Gambar 9, keruntuhan yang terjadi pada sampel uji ini adalah keruntuhan daktil. Ketika pembebanan dilakukan, balok mampu berdeformasi dengan baik setelah pelelehan pertama di titik beban 85,930 kN tanpa harus mengalami pengurangan kapasitas lentur yang besar.

Jenis kerusakan yang terjadi adalah kerusakan geser lentur dan kerusakan lekat. Kerusakan pertama yang terjadi adalah kerusakan geser lentur dengan retakan pertama terjadi di titik beban 39,82 kN. Kerusakan geser lentur dimulai dari daerah tarik yang seiring dengan bertambahnya pembebanan, kerusakan lentur naik ke daerah tekan. Lalu, kerusakan lekatan terjadi tepat di bawah titik pembebanan pada titik beban 82,15 kN.



Gambar 9. Kerusakan Sampel Uji Balok Lewatan

Kerusakan yang paling besar tidak terjadi di tengah bentang sampel uji balok, melainkan berada di ujung penyaluran *lst* seperti yang terlihat pada

- [7] H. Dabiri, A. Kheyroddin, and A. Dall'Asta, "Splice methods used for reinforcement steel bars: A state-of-the-art review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 320, no. January, p. 126198, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126198.
- [8] D. Tarquini, J. P. de Almeida, and K. Beyer, "Experimental investigation on the deformation capacity of lap splices under cyclic loading," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 17, no. 12, pp. 6645–6670, 2019, doi: 10.1007/s10518-019-00692-3.
- [9] ACI 439.3R-91, "Mechanical Connections of Reinforcing Bars, Standard by American Concrete Institute," *Concr. Int.*, vol. 5, no. 1, pp. 24–35, 1999.
- [10] Z. Ambarwati and Jafar, "Perbandingan Kinerja Lentur Balok Beton Bertulang Dengan Sambungan Lewatan Dan Sambungan Mekanis Tipe Threaded Coupler (The Comparison of Flexural Performance of Reinforced Concrete Beam With Lap Splice and Threaded Coupler-Type Mechanical Splices) Beto," *Reka Buana J. Ilm. Tek. Sipil dan Tek. Kim.*, vol. 7, no. 2, pp. 114–128, 2022.
- [11] H. Al-Quraishi, M. Al-Farttoosi, and R. AbdulKhudhur, "Tension Lap Splice Length of Reinforcing Bars Embedded in Reactive Powder Concrete (RPC)," *Structures*, vol. 19, no. January, pp. 362–368, 2019, doi: 10.1016/j.istruc.2018.12.011.
- [12] C. Goksu, H. Yilmaz, S. R. Chowdhury, K. Orakcal, and A. Ilki, "The Effect of Lap Splice Length on the Cyclic Lateral Load Behavior of RC Members with Low-Strength Concrete and Plain Bars," *Adv. Struct. Eng.*, vol. 17, no. 5, pp. 639–658, May 2014, doi: 10.1260/1369-4332.17.5.639.
- [13] P. K. Dahal and M. Tazarv, "Mechanical bar splices for incorporation in plastic hinge regions of RC members," *Constr. Build. Mater.*, vol. 258, p. 120308, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120308.
- [14] S. W. Shin, H. Kang, J. M. Ahn, and D. W. Kim, "Flexural capacity of singly reinforced beam with 150 MPa ultra high-strength concrete," *Indian J. Eng. Mater. Sci.*, vol. 17, no. 6, pp. 414–426, 2010.
- [15] A. Kheyroddin and H. Dabiri, "Cyclic performance of RC beam-column joints with mechanical or forging (GPW) splices; an experimental study," *Structures*, vol. 28, no. November, pp. 2562–2571, 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.10.071.
- [16] M. Mahalingam, R. P. N. Rao, and S. Kannan, "Ductility behavior fiber reinforced concrete beams strengthened with externally bonded glass fiber reinforced polymer laminates," *Am. J. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 1, pp. 107–111, 2013, doi: 10.3844/ajassp.2013.107.111.
- [17] F. J. Asmara, S. Suhendra, and A. Dwiretnani, "Analisis Perbandingan Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton Yang Menggunakan Pasir Sungai Batang Asai Dan Pasir Sungai Batanghari," *J. Talent. Sipil*, vol. 4, no. 1, p. 1, 2021, doi: 10.33087/talentsipil.v4i1.42.