

## KEKUATAN SISTEM SAMBUNGAN ANCHOR DENGAN BAUT PADA BALOK BETON PRACETAK DALAM MENERIMA BEBAN LENTUR

Putu Deskarta<sup>1,\*</sup> dan Ida Bagus Rai Widiarsa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Jl. Kampus Bukit Jimbaran, Denpasar

\*Email: [pdeskarta@yahoo.com](mailto:pdeskarta@yahoo.com)

**ABSTRAK:** Penelitian kekuatan sistem sambungan *anchor* dengan baut pada balok beton pracetak dalam menerima beban lentur telah dilakukan untuk mendapatkan informasi kekuatan sambungan jika diterapkan pada struktur dinding beton pracetak. Sample yang diuji berupa balok pracetak yang disambung menggunakan sistem anchor dan baut, yang terbuat dari pasangan beton bertulang dengan ukuran 15x15x65 cm. Penelitian menggunakan empat jenis sample balok pracetak yang disambung dan satu jenis sample balok utuh, tanpa sambungan. Setiap jenis sample dibuat tiga kali ulangan. Terdapat dua jenis anchor yang dipakai yaitu anchor yang dibuat dari sepasang besi tulangan dia. 10 mm yang ditebuk berbentuk U serta sepasang pelat berlubang ukuran 50x8 mm. Masing-masing dari anchor tersebut dibuat dalam dua posisi yaitu vertikal dan horisontal. Setiap pasang dari anchor tersebut disatukan menggunakan sebuah baut dia. 14 mm. Balok beton semuanya menggunakan tulangan tarik 2 dia. 10 mm, atau ratio tulangan tarik 0,87 %, serta tulangan geser berbentuk sengkang tertutup dia. 6 mm jarak 75 mm. Hasil dari penelitian mendapatkan, bahwa balok pracetak yang disambung mampu menerima beban lentur bervariasi mulai dari 20 % lebih rendah sampai 4 % lebih tinggi dari beban lentur balok tanpa sambungan. Selanjutnya, semua balok yang disambung menunjukkan kekakuan yang lebih kecil dibandingkan dengan yang balok tanpa sambungan. Kurva beban-deformasi, yang merupakan representasi dari kekakuan, menunjukkan semua balok yang disambung, kecuali SUV, posisinya berdekatan dengan yang balok tanpa sambungan namun lebih rendah. Sambungan yang menggunakan anchor baut dengan pelat horisontal memberikan kekuatan dan kekakuan yang setara dengan balok utuh sehingga baik dipakai untuk sambungan dinding pracetak.

**Kata Kunci:** sambungan balok pracetak, baut, anchor

### THE STRENGTH OF ANCHORED AND BOLTED CONNECTION ON PRECAST CONCRETE BEAMS UNDER FLEXURAL LOADS

**ABSTRACT:** *Research on the strength of anchored and bolted connection on precast concrete beams under flexural loads has been carried out to determine the feasibility of these connection for used in precast concrete wall construction. The test specimens are beams made of two precast concrete beams with a size of 15x15x65 cm connected using an anchor and bolt. Four types of precast connected beams and one type of continuous beam were examined. Each type of test object consists of three replications. Two types of anchors were used; anchors made from a pair of  $\phi$  10 mm reinforcing steel bent in a U shape and anchors from a pair of perforated plates measuring 50x8 mm. Each of these anchors was placed in two positions, namely vertical and horizontal. Each pair of anchors is held together using a  $\phi$  14mm bolt. All beams using flexural reinforcement 2  $\phi$  10 mm with a reinforcement ratio of 0.87% and closed stirrup shear reinforcement diameter 6 mm every 75 mm. The test results show that the precast connected beams can resist flexural load 20% lower to 4% higher than that of the continuous beams. Meanwhile, in terms of stiffness, all precast connected beams give lower value, compared to that of the continuous beams. The load-deformation curves, as a representation of the stiffness, of all the connected beams, except the SUV, show results close to those of the continuous beams even though their position is lower. Connection using anchored bolt with horizontal plate provide strength and stiffness equivalent to that of the continuous beams so they can be used for precast wall joints.*

**Keywords:** *precast concrete connection, bolt, anchor*

## I. PENDAHULUAN

Pada struktur yang menggunakan beton pracetak, selain elemen batangnya, sambungan juga merupakan faktor yang sangat menentukan kekuatan dari struktur tersebut. Sambungan pada beton pracetak secara garis besar dapat dikelompokkan dalam jenis sambungan kering dan sambungan basah. Sambungan kering adalah sambungan yang pada pelaksanaannya tidak melibatkan pekerjaan pengecoran atau grouting, sedang sambungan basah memerlukan pengecoran beton atau grouting. Sehingga, sambungan basah memerlukan waktu pengerjaan dilapangan yang lebih lama dari sambungan kering. Hal ini bertentangan dengan filosopy penggunaan beton pracetak yaitu meminimalkan waktu dan aktifitas pelaksanaan konstruksi dilapangan dengan memindahkannya ke workshop. Sambungan kering, menyerupai metoda penyambungan pada kostruksi baja, lebih mudah dan cepat pengerjaannya, sehingga lebih tepat diterapkan pada konstruksi beton pracetak. Permasalahan yang perlu diperhatikan pada penggunaan sambungan kering adalah pengankeran komponen sambungan pada beton, stress konsentrasi pada bagian tekan beton, serta berkurangnya penampang beton pada daerah sambungan.

Alat berat, khususnya untuk mengangkat dan memindahkan objek, sangat diperlukan dalam konstruksi menggunakan beton pracetak. Semakin besar ukuran objek yang dipindahkan, semakin besar kapasitas alat yang diperlukan, ini hanya bisa dilaksanakan oleh kontraktor besar saja. Sehingga untuk penggunaan beton pracetak secara meluas dimasyarakat sulit dilakukan. Ukuran elemen pracetak yang lebih kecil, lebih mudah pelaksanaannya. Namun perlu lebih banyak alat sambung untuk menyatukannya. Alat sambung yang sekarang dipakai umumnya merupakan produk paten dari luar negeri, sehingga tidak mudah dikerjakan tukang secara umum. Agar bisa konstruksi pracetak lebih memasyarakat maka ukuran elemen pracetak harus dibuat dalam bagian-bagian yang lebih kecil, sehingga tidak memerlukan alat berat yang khusus, serta sambungannya harus dapat dibuat sendiri. Sambungan seperti itu dapat berupa pelat atau

tulangan anchor yang disatukan dengan baut atau las. Anchor bisa dibuat sendiri dari besi tulangan atau pelat baja yang tersedia dipasaran. Penggunaan sambungan seperti ini tidak memerlukan peralatan yang khusus dan skill yang tinggi sehingga pekerja biasa dapat mengerjakannya. Sambungan dari anchor tulangan berbentuk U sudah umum dipakai pada konstruksi dinding beton pracetak.

Peikiko. (2020), menjelaskan bahwa pemakaian baut pada sambungan komponen beton pracetak memiliki keunggulan berupa; proses perencanaan yang mudah, kekuatan dan kekakuan yang memadai, reliabel, pelaksanaan yang cepat, murah, dan dapat diterapkan untuk struktur penahan gempa. Hasi penelitian Pul dan Senturk (2017), tentang hubungan balok kolom menggunakan sambungan baut mutu tinggi menunjukkan bahwa sambungan baut mutu tinggi memberikan kekuatan lebih 20% dari sambungan monolit. Tentang kapasitas lentur dan duktilitas sambungan balok pracetak, hasil penelitian menunjukkan bahwa sambungan menggunakan baut memberikan sifat lebih *ductile* dibandingkan dengan sambungan cor ditempat, (Hanor dan Aroyo, 1998, Pul dan Senturk, 2017, Kang dan Lee, 2013). Ertas et. al. (2006), dalam penelitian sambungan penahan momen pada rangka beton pracetak, mendapatkan bahwa penggunaan sambungan baut pada pertemuan balok kolom pracetak dapat menahan *story drift* sampai 3,5 %, sehingga cukup *ductile* menerima beban gempa. Hasil penelitiannya juga menunjukkan bahwa *damping ratio* dari sambungan baut setara dengan yang diberikan oleh sambungan monolit. Pada beban *cyclic*, pemakaian pelat baja pada sambungan baut dapat mengurangi kerusakan beton pada bagian tekan yang mengalami konsentrasi tegangan, karena pelat baja menyebarkan tegangan pada beton di daerah tersebut. Pul dan Senturk, (2017) pada penelitian tentang sambungan balok-kolom pracetak menggunakan baut terhadap beban *cyclic* mendapatkan hasil bahwa sistem sambungan tersebut dapat dipergunakan pada struktur rangka yang menahan momen akibat beban *cyclic*, dan sistem sambungan tersebut dapat meminimalisasi kerusakan yang terjadi pada beton.

Salah satu masalah utama pada sambungan beton pracetak memakai sistem anchor adalah keruntuhan yang diakibatkan oleh jarak antara ancor atau jarak ancor ketepi beton yang kurang memadai (Allan et.al. , 2012). Selain itu keruntuhan bisa pula disebabkan oleh deformasi alat sambung yang terlalu besar, sehingga menyebabkan deformasi balok menjadi besar. Ini terjadi pada alat sambung yang menggunakan sistem pelat sepatu dan baut, dimana kelangsingan pelat sepatunya besar. Keruntuhan akibat kurangnya jarak anchor dapat dihindari dengan memberikan tambahan tulangan geser pada beton disekitar keruntuhan tersebut, sedangkan keruntuhan akibat deformasi alat sambung dapat atasi dengan memperkaku alat sambung seperti mempertebal pelat. Hal inilah yang membuat kenapa sistem sambungan yang memakai kombinasi pelat dan baut umumnya memakai pelat yang sangat tebal dan baut mutu tinggi. Demi untuk mendapatkan suatu metoda membuat sistem sambungan elemen beton pracetak yang lebih mudah dikerjakan dan komponennya mudah didapatkan maka penelitian ini dilakukan. Sehingga dipilih penelitian suatu model sambungan dengan komponen penyambung nya berupa anchor, terbuat dari tulangan atau pelat yang ditanamkan pada setiap ujung yang disambung, kemudian disatukan dengan baut. Setiap sambungan memerlukan sepasang anchor yang masing-masing ditanamkan pada setiap ujung elemen yang disambung. Selanjutnya sebuah baut dipasang menggabungkan anchor tersebut. Sebagai bagian dari penelitian ini dibuat juga yang sebaliknya yaitu model sambungan dimana sepasang bautnya sebagai anchor, ditanam pada setiap ujung elemen disisi bawah, seperti dowel, selanjutnya disatukan dengan pelat dari luar yang dikencangkan oleh mur dari baut. Kekuatan sambungan diteliti dengan memberi beban lentur pada balok sampai runtuh. Hasilnya kemudian dibandingkan dengan, dengan hasil pengujian balok yang tanpa sambungan.

## II. METODA DAN PROSEDUR

### A. Sambungan Beton Pracetak

Pemilihan metoda konstruksi memakai beton pracetak utamanya ditujukan guna mempercepat dan meminimalkan penggunaan material dan tenaga kerja dilapangan. Proses konstruksi memakai beton pracetak adalah merangkai elemen-elemen beton pracetak, yang dibuat/dicetak sebelumnya diworkshop, membentuk sebuah struktur menggunakan sambungan kering atau sambungan basah. Sambungan kering dibuat menggunakan alat sambung mekanis yang seperti pemakaian corbel, coupler, kombinasi anchor dengan baut, pelat dengan baut atau las. Sedangkan sambungan basah dilaksanakan dengan pengecoran beton atau grouting pada tempat yang disambung, dilokasi proyek. International Federation for Structural Concrete (2008), menyebutkan bahwa filosofi dari teknologi pracetak selain merubah dari pekerjaan pengecoran dilokasi menjadi pengecoran diworkshop dan perakitan elemen dilokasi, juga harus memanfaatkan kelebihan karakteristik material yang dipakai dan juga kemudahan dalam perencanaan dan pelaksanaan. Efektifitas dari perencanaan dan pelaksanaan metode konstruksi beton pracetak bisa didapatkan dengan memilih alat sambung yang sesuai untuk setiap komponen pracetak yang dipakai. Alat sambung yang dipilih harus dapat memenuhi syarat kekuatan dan kekakuan saat menerima berbagai jenis beban dan cepat dalam pelaksanaannya. Hal utama yang perlu diperhatikan pula adalah, bahwa sambungan bukan hanya menyatukan elemen tetapi juga memastikan terjadinya integritas/kekokohan struktur secara keseluruhan yang dibentuk oleh elemen tersebut.

Perilaku struktur secara keseluruhan akan bergantung pada sistem sambungan dan karakteristik type sambungan yang dipakai. Dalam perencanaan sambungan, harus diperhatikan bagaimana sambungan mampu meneruskan aliran gaya antar elemen yang disambung. Pada sambungan terjadi transfer beban antara elemen pracetak yang disambung, sehingga sambungan harus kuat menerima gaya-gaya atau momen yang disalurkan olehnya. Pada daerah sambungan terjadi interaksi antara alat sambung dengan elemen yang disambung. Oleh sebab itu keduanya harus direncanakan sebagai satu kesatuan sehingga tidak terjadi keruntuhan pada alat sambung atau elemen yang disambung

saat terjadi transfer gaya dari satu elemen ke elemen lainnya. Dalam mendisain sambungan pracetak perlu diperhatikan beberapa hal seperti; system pemikul beban yang diinginkan, metoda ereksi, tampak estetika, proteksi kebakaran, sistem produksi, penyimpanan dan transportasi elemen pracetaknya. Dengan memperhatikan hal tersebut diharapkan dapat dihasilkan disain sambungan yang memenuhi persyaratan kekuatan, kekakuan, duktilitas, dan durabilitas, memiliki estetika, tahan kebakaran, serta kemudahan dan kecepatan dalam pemasangan.

### B. Jenis Sambungan Beton Pracetak

Penentuan alat sambung akan sangat dipengaruhi oleh bentuk elemen yang disambung serta mekanisme gaya yang ditransfer olehnya. Secara umum, berdasarkan jenis elemen yang disambung, sambungan pracetak dapat dikelompokkan dalam kelompok sistem sambungan sebagai berikut;

- (i) Sistem sambungan balok-kolom, yaitu sistem sambungan yang dipakai pada sambungan antara balok dengan kolom, antar balok, antar kolom dan kolom ke pondasi.
- (ii) Sistem sambungan pelat lantai, yaitu sistem sambungan yang dipakai pada sambungan antar pelat lantai dan pelat lantai ke balok tepi.
- (iii) Sistem sambungan dinding, yaitu sistem sambungan yang dipakai pada sambungan antar elemen dinding, atau elemen dinding dengan kolom.
- (iv) Sistem sambungan *shell*, yaitu sistem sambungan yang dipakai pada sambungan elemen pracetak berbentuk shell seperti, *box, tunnel, culvert*.

Selanjutnya sistem alat sambung yang umum dipakai pada penyambungan elemen-elemen pracetak adalah sistem alat sambung berikut;

- (i) Kombinasi tulangan anker dan pengecoran beton dilokasi. Disebut sebagai sambungan basah, sambungan ini digunakan pada penyambungan elemen-elemen pracetak-sebagian, seperti penyambungan pelat, balok, dan kolom pracetak-sebagian secara bersama sama pada suatu lantai dengan beton basah.
- (ii) Kombinasi tulangan anker, *sleeve* dan grouting. Sambungan ini dibuat dengan menanamkan tulangan dan sleeve masing-

masing pada salah satu ujung elemen yang akan disambung. Penyambungan dilakukan dengan memasukan tulangan anker kedalam sleeve lalu digrouting.

- (iii) Kombinasi baut anker dengan pelat, yaitu sambungan yang dibuat dengan menanamkan pelat dan baut anker masing-masing pada ujung setiap elemen yang disambung, selanjutnya disatukan dengan pengencangan mur baut.
- (iv) Kombinasi anker dari tulangan atau pelat dengan pengelasan, yaitu sambungan yang dibuat dengan menanam tulangan atau pelat yang diangker pada setiap ujung elemen yang disambung, selanjutnya disatukan dengan pengelasan.
- (v) Sistem *korbel*, yaitu sambungan yang menggunakan tumpuan dari baja atau beton yang ditanam pada sisi kolom untuk menempatkan ujung elemen yang disambung di atasnya.

### C. Perencanaan Sambungan Pracetak

Perencanaan sambungan pracetak diperlukan untuk menjamin kekuatan sambungan dapat menerima beban yang terjadi padanya. Sehingga setiap komponen yang terlibat dalam sambungan harus didisain agar mampu memikul gaya yang bekerja pada nya, kemudian meneruskan ke komponen berikutnya. Untuk mendapatkan sambungan yang mampu memikul beban yang bekerja padanya, European Commission, (2012) memberikan panduan dalam merencanakan komponen yang terlibat pada sambungan. Beberapa diantaranya adalah sebagai berikut;

- 1) Untuk merencanakan komponen baut yang mengalami tarik.

$$F_{R \min} \geq \gamma_R \cdot A_s \cdot f_y \quad (1)$$

dengan;

$$F_{R \min} = \text{kuat tarik baut minimum}$$

$$\gamma_R = \text{faktor kuat lebih} = 1,2$$

$$A_s = \text{luas tulangan yang digantikan}$$

$$f_y = \text{tegangan leleh dari tulangan}$$

- 2) Untuk merencanakan anker baut berkepala yang ditanam dalam beton

Kapasitas gaya cabut yang diberikan beton

$$R_d \geq \gamma_R \cdot F_u \quad (2)$$

dengan;

$$R_d = \frac{k}{\gamma_c} \sqrt{f_c h^3} \quad (3)$$

$$k = 7$$

- $\gamma_c = 1,5 =$  faktor reduksi beton
- $f'_c =$  kuat tekan cylinder beton
- $h =$  panjang baut yang tertanam
- $F_u =$  minimum dari  $A_s * f_y$  dan  $F_{R \max}$

3) Merencanakan kekuatan geser sambungan.

Kapasitas geser sambungan

$$V_{Rd} \geq V_{dd} + V_{fd} \tag{4}$$

dengan;

$$V_{dd} = 1,3 A_d \sqrt{f_{cd}} * f_{yd} \tag{5}$$

$$V_{fd} = 0,25 b * f_{cd}$$

$f_{yd} =$  tegangan leleh baut

$f_{cd} =$  kuat tekan beton

4) Merencanakan tebal pelat yang diangker.

Tebal pelat minimum

$$t_{min} = \sqrt{\frac{4M}{\phi_y b f_y}} \tag{6}$$

dengan;

$M =$  momen rencana pelat

$b =$  lebar pelat

$f_y =$  tegangan leleh pelat

$\phi_y = 0,9 =$  faktor reduksi

5) Merencanakan kekuatan las pada pelat atau tulangan anker.

Kuat nominal las

$$\phi R_{nw} \geq \gamma_R A_{sa} * f_{ya} \tag{7}$$

dengan;

$$R_{nw} = 0,6 f_{uw} t_w l_w \tag{8}$$

$\gamma_R A_{sa} * f_{ya} =$  kuat putus elemen

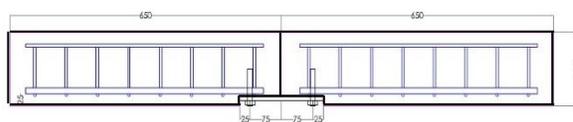
$f_{uw} =$  kuat putus bahan las

$l_w$  dan  $t_w =$  panjang dan tebal las

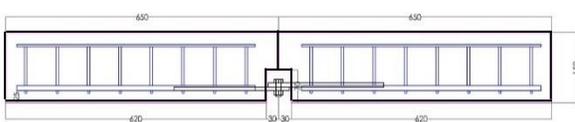
$\phi = 0,75$

D. Prosedur Penelitian

Dibuat empat jenis balok pracetak dengan sambungan yang diuji kekuatan dan kekakuan lenturnya kemudian hasilnya dibandingkan dengan balok tanpa sambungan. Sambungan yang dipakai adalah sambungan berupa pasangan anchor dari besi tulangan berbentuk U dan dari pelat baja yang disatukan menggunakan baut. Terdapat dua jenis posisi dari anchor tulangan U, yaitu horisontal dan vertikal, sedangkan untuk anchor dari pelat hanya dipasang horisontal. Pada anchor U horisontal, bautnya dipasang vertikal sedangkan pada anchor U vertikal bautnya



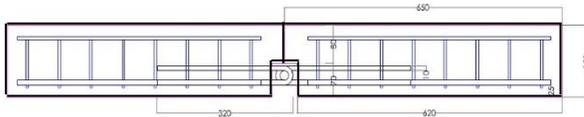
Gambar 1. Sambungan pelat luar SPL



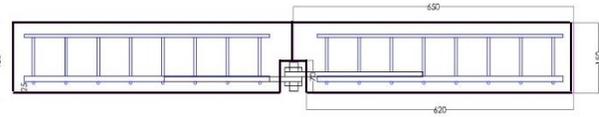
Gambar 2. Sambungan pelat dalam SPD

dipasang horisontal dan terakhir ini lebih mudah dilakukan. Terdapat dua jenis sambungan menggunakan pelat yaitu pelat yang ditanam sebagai anchor kemudian disatukan dengan baut, dan baut yang ditanam, seperti dowel, kemudian disatukan dengan pelat yang dikencangkan oleh mur dari baut. Sambungan ini jenis terakhir ini diteliti karena proses penyambungannya yang paling mudah dikerjakan. Setiap benda uji berbentuk sebuah balok beton tersambung yang dibuat dari sepasang balok beton pracetak yang disambung menggunakan salah satu dari empat jenis sambungan yang diteliti. Balok beton pracetak semuanya memiliki dimensi yang sama yaitu; panjang 65cm, dan lebar x tinggi =15cm x15cm. Setiap balok memiliki 2 tulangan tarik BJTP dia. 10 mm, dan 2 tulangan tekan BJTP dia. 8 mm. Tulangan geser dia. 6 mm dipasang setiap 75 mm. Dalam proses pembuatannya, balok dibuat berpasangan dalam satu cetakan dengan sambungan sudah dalam keadaan terpasang. Hal ini dilakukan untuk memudahkan proses penyambungan nantinya. Agar setiap balok dalam keadaan terputus pada sambungan, dibuat perbedaan waktu pengecoran satu hari antar balok yang disambung. Diameter anchor dan baut yang dipakai didasarkan atas perhitungan kekuatannya, agar minimal sama atau lebih besar dari kuat tarik tulangan balok. Dari perhitungan didapatkan anchor tulangan U memerlukan besi BJTP dia. 10 mm dan panjang kakinya 350 mm, anchor dari pelat memerlukan baja mutu BJ. 37 tebal 8mm, lebar 50mm, dan panjang 300 mm, dan baut mutu BJ. 41 dia. 14 mm.

Selanjutnya dibuat juga satu jenis balok utuh tanpa sambungan dengan penampang dan tulangan yang sama dan panjang 130 cm, sebagai pembanding dari balok tersambung tersebut. Sehingga total terdapat lima jenis benda uji yaitu; empat jenis balok dengan sambungan dan satu jenis balok tanpa sambungan. Dibuat tiga kali pengulangan untuk setiap jenis benda uji sehingga totalnya ada 15 buah balok yang diteliti. Gambar 1 sampai dengan 4 memperlihatkan tampak samping dari benda uji, dan tabel 1 menunjukkan rincian dari benda uji.



Gambar 3. Sambungan U baut horisontal SUH



Gambar 4. Sambungan U baut vertikal SUV

TABEL 1. RINCIAN BENDA UJI

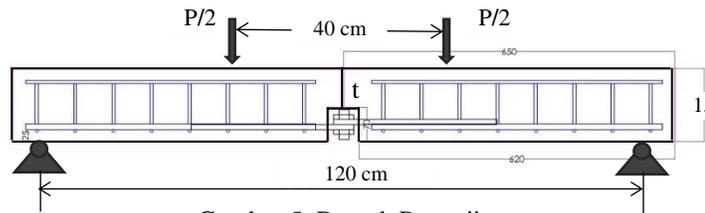
Benda Uji	Penampang	Bentang	d	t	Keterangan
SK	15x15 cm	120 Cm	11,5 cm	-	Balok kontrol
SUH	15x15 cm	120 Cm	11,0 cm	8 cm	Anchor U Horisontal
SUV	15x15 cm	120 Cm	10,5 cm	8 cm	Anchor U Vertikal
SPD	15x15 cm	120 Cm	11,5 cm	10 cm	Pelat di dalam beton
SPL	15x15 cm	120 Cm	12,5 cm	12 cm	Pelat di luar beton

Keterangan: SK = benda uji utuh, balok kontrol  
 SPD = sambungan pelat didalam  
 SUV = sambungan U baut vertikal  
 t = tebal beton sambungan

SPL = sambungan pelat diluar,  
 SUH = sambungan U baut horisontal  
 d = jarak anchor ke tepi atas beton

Dilakukan pengujian empat titik beban yang dibuat dengan mendudukkan balok diatas dua sederhana, tumpuan sendi-roll, membentuk bentang dengan jarak 120 cm. Dua beban terpusat dikerjakan pada titik 1/3 bentang dari kiri dan 1/3

bentang dari kanan. Beban tekan dikerjakan secara perlahan dengan penambahan bertahap sampai balok runtuh yang diikuti oleh deformasi nya yang besar. Gambar 5. Memberikan ilustrasi pengujian dan bentuk pembebanan.



Gambar 5. Bentuk Pengujian

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Hasil Pengujian

Dari hasil pengujian tekan rata-rata tiga benda uji beton cylinder didapatkan hasil kuat tekan beton yaitu sebesar 20,4 Mpa. Sedangkan pengujian tarik untuk satu buah benda uji tulangan BJTP dia. 10 mm mendapatkan hasil 245 Mpa. dan 390 Mpa untuk tegangan leleh dan putus. Pelat dan baut mutunya didapatkan dari spesifikasi material yang diberikan oleh suppliernya yaitu mutu pelat BJ 37 dan mutu baut BJ41. Hasil yang didapatkan dari pengujian semua benda uji adalah berupa data beban dan deformasi pada setiap tahapan beban mulai dari awal pembebanan sampai beban ultimit saat balok runtuh, serta data hasil pengamatan pola keruntuhannya. Data dari hasil pengujian setiap jenis benda uji ditampilkan dalam bentuk kurva beban-deformasi gambar 6 dan 7, dan nilai beban

ultimit dan deformasi rata-ratanya ditunjukkan pada tabel 2. Kekuatan dan kekakuan lentur balok dapat diketahui dari bentuk kurva hubungan antara beban dan deformasi. Setiap ulangan pada setiap jenis benda uji memberikan hasil yang sama sehingga hanya ditampilkan satu kurva yang mewakili tiap jenis benda uji. Gambar 6 menampilkan kurva hubungan beban dan deformasi dari semua jenis benda uji dan gambar 7 menampilkan kurva yang sama tapi tanpa benda uji SUV.

Semua benda uji kecuali benda uji sambungan pelat luar (SPL) keruntuhan benda uji ditunjukkan dengan terjadinya retak yang semakin bertambah besar saat tulangan anchor mengalami slip. Retak yang semakin lebar membuat tebal blok tekan beton semakin mengecil sehingga mengakibatkan kekuatan lentur balok berkurang yang ditunjukkan oleh penurunan beban seiring dengan bertambahnya lendutan. Balok

dinyatakan runtuh dan dihentikan pengujiannya saat bebannya mulai berkurang dan lendutannya sudah melebihi 1/200 bentang. Pada benda uji SPL keruntuhan diakibatkan oleh hancurnya beton pada bagian tekan akibat tebal blok beton yang semakin berkurang akan tetapi tulangan anchor belum mencapai leleh. Benda uji ini memberikan kuat ultimit yang bahkan lebih besar dari balok kontrolnya diakibatkan oleh jarak tulangan anchor ketepi atas beton (d) yang lebih besar dari yang lainnya. Perilaku yang berbeda ditunjukkan oleh benda uji dengan tulangan anchor vertikal (SUV). Benda uji ini paling lemah dan

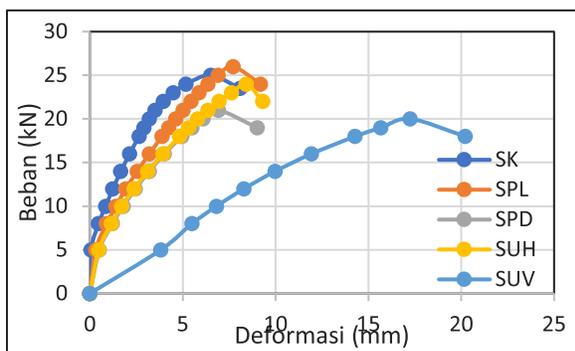
menunjukkan kekakuan yang paling kecil dari yang lainnya. Beban ultimitnya terjadi pada deformasi yang sangat besar, 2 kali lipat dari deformasi balok lainnya. Pada semua benda uji balok tersambung, kecuali benda uji SPL, keruntuhan juga disebabkan oleh baut yang menyatukan tulangan anchor berrotasi saat menerima beban. Rotasi ini terjadi karena baut dalam keadaan geser tunggal sehingga timbul momen yang membuat baut berrotasi. Rotasi ini dapat dihindarkan jika menggunakan anchor ganda pada salah satu ujung sehingga baut mengalami geser ganda dan simetri.

TABEL 2. BEBAN ULTIMIT DENGAN LENDUTANNYA

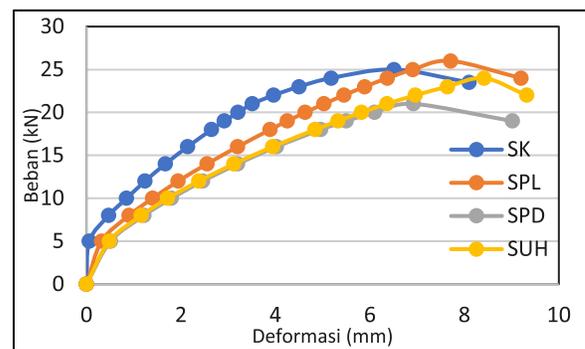
Benda Uji	Beban Ultimit (kN)	Lendutan (mm)	Mode keruntuhan
SK	25	6,51	Retak lentur merata
SUH	24	8,42	Retak lentur pd sambungan
SUV	20	17,26	Retak lentur pd sambungan
SPD	21	6,92	Retak lentur pd sambungan
SPL	26	7,71	Hancur pada beton tekan

Perilaku lentur balok dapat dilihat dari pola retak yang diberikannya saat keruntuhannya. Balok yang memiliki retak yang banyak dan terdistribusi adalah yang memiliki perilaku lentur yang baik. Sebaliknya yang memiliki retak yang sedikit dan terkonsentrasi berarti perilaku lenturnya kurang baik. Balok tanpa sambungan memberikan retak yang terdistribusi sehingga memiliki perilaku lentur yang baik, Sedangkan balok dengan sambungan memberikan retak yang

sedikit dan terkonsentrasi pada daerah sambungan. Terdapat empat retak pada benda uji SPL dan SUH seperti yang ditunjukkan gambar 8 dan 9, dan hanya satu retak pada benda uji SPD dan SUV yang terkonsentrasi pada daerah sambungan seperti yang ditunjukkan gambar 10 dan 11. Pola retak dari SPL lebih baik dari SUH karena lokasi retaknya tidak pada posisi sambungan dan panjang retak yang lebih kecil.



Gambar 6. Kurva Semua Jenis Benda Uji



Gambar 7. Kurva Tanpa Benda Uji SUV



Gambar 8. Retak Benda Uji SPL



Gambar 9. Retak Benda Uji SUH



Gambar 10. Retak Benda Uji SPD



Gambar 11. Retak Benda Uji SUV

### B. Pembahasan

Dari sisi kekuatan, beban ultimit yang dapat diterima benda uji balok dengan sambungan bervariasi mulai dari 20 % lebih rendah sampai 4 % lebih tinggi dari beban lentur benda uji balok utuh, dan dari sisi kekakuannya, benda uji balok dengan sambungan memberikan lendutan yang lebih tinggi, mulai dari 1,06 s/d 2,65 kali dari yang tanpa sambungan, pada saat runtuh. Kurva hubungan beban dan deformasi menunjukkan bahwa semua balok tersambung memberikan kekakuan yang lebih rendah dari balok tanpa sambungan. Keruntuhan semua balok tersambung, kecuali SPL, diakibatkan oleh retak beton yang lebar dan terpusat hanya pada daerah sambungan. Retak yang besar tersebut membuat kapasitas lentur penampang menjadi berkurang dan tidak dapat menyamai balok tanpa sambungan. Retak pada lokasi sambungan tersebut diakibatkan oleh berkurangnya luas penampang akibat alat sambung mencapai 35-45%. Moda keruntuhan ini tidak dijumpai pada benda uji SPL karena luas penampang beton tidak terlalu banyak berkurang akibat pelat yang dipasang diluar. Benda uji SPL bahkan dapat memberikan beban ultimit sedikit lebih besar dari balok utuh yang disebabkan oleh kekuatan tarik pelat penyambungannya lebih besar dari kekuatan tulangan tarik balok utuh. Selain itu jarak anchor ke tepi beton ( $d$ ) yang juga lebih besar dari  $d$  balok utuh. Akibat luas anchor yang besar menyebabkan terjadi keruntuhan over reinforced yang ditandai oleh kehancuran beton pada tepi atas daerah sambungan akibat tegangan tekan. Kehancuran beton pada daerah tersebut juga disebabkan karena tidak terdistribusinya tegangan tekan seperti yang terjadi pada penampang yang kontinyu. Pada komponen sambungan tidak dijumpai terjadinya kerusakan sehingga kuat menerima beban sesuai dengan rencana. Deformasi yang besar pada awal pembebanan dijumpai pada semua benda uji balok dengan sambungan. Hal ini disebabkan

karena terdapat space antara baut dengan lubangnya, dimana baut harus menumpu pada lubangnya terlebih dahulu sebelum memberikan tahanan. Deformasi ini dapat dikurangi dengan memperkecil selisih diameter lubang dan baut.

Diantara semua benda uji balok dengan sambungan, kemampuan lentur yang paling jelek diberikan oleh benda uji SUV. Benda uji ini memberikan deformasi yang paling besar dengan beban ultimit yang paling rendah dibandingkan yang lainnya. Hal ini disebabkan karena baut mengalami satu bidang geser, sehingga berotasi dan mengakibatkan slip yang besar antara tulangan anchornya. Akan tetapi slip ini berkurang pada anchor dari pelat karena pengencangan mur memberikan gesekan yang lebih besar. Benda uji SUV walaupun mengalami satu bidang geser juga, tidak memberikan perilaku tersebut karena ring dari bautnya memberikan friksi yang besar pada tulangan akibat dikencangkan oleh mur sehingga tidak terjadi rotasi yang besar pada baut. Maka dari itu harus diusahakan agar sambungan menggunakan baut dengan bidang geser lebih dari satu. Dari semua balok dengan sambungan, perilaku lentur yang paling baik diberikan oleh benda uji SPL. Kekuatan lentur balok SPL bahkan sedikit melampaui balok kontrol nya. Ini di sebabkan karena luas pelat anchor yang lebih besar dari luas tulangan balok kontrol. Grafik hubungan beban dan deformasi dari balok SPL ini posisinya juga dekat dengan yang diberikan balok tanpa sambungan. Sambungan dari balok SPL paling mudah dikerjakan dibandingkan sambungan balok lainnya. Dengan hanya dengan menanam baut ke beton anchor kebeton saat pencetakan kemudian disatukan dengan pelat dari luar saat penyambungan. Pelat penyambung yang menempel di luar membuat pengencangan mur menjadi lebih mudah. Selain itu, penampang beton tidak banyak berkurang dan jarak titik berat anchor ke serat tekan beton dapat dimaksimalkan untuk meningkatkan kuat lenturnya.

#### IV. KESIMPULAN

Sambungan yang menggunakan sistem kombinasi anchor dan baut mampu menahan beban lentur bervariasi mulai dari 20 % lebih rendah sampai 4 % lebih tinggi dari beban lentur benda uji tanpa sambungan. Kemampuan menahan beban tertinggi dimiliki oleh balok yang menggunakan sambungan kombinasi baut anchor dengan pelat diluar.

Kurva beban-deformasi untuk semua balok tersambung, kecuali SUV, memperlihatkan posisi yang hampir berdekatan dengan kurva beban-deformasi balok utuh. Kurva yang paling mendekati diberikan oleh benda uji menggunakan sambungan baut anchor dengan pelat diluar.

Semua balok tersambung kecuali SPL mengalami keruntuhan tarik dengan terjadinya retak pada beton sisi bawah pada daerah sambungan. Sedangkan untuk balok SPL memberikan keruntuhan tekan dengan hancurnya beton pada sisi atas daerah sambungan. Terjadinya bidang geser tunggal pada baut membuat baut berotasi yang mengakibatkan sambungan mengalami deformasi yang lebih besar.

Perilaku lentur benda uji balok tersambung yang paling baik diberikan oleh benda uji yang memakai sambungan kombinasi baut anchor dengan pelat diluar. Kekuatannya bahkan mampu melebihi kekuatan balok tanpa sambungan. Dengan kemudahan pemasangan dan kekuatannya, jenis sambungan ini paling tepat dipergunakan pada sambungan balok pracetak.

#### DAFTAR PUSTAKA

Allan, B.F. Chen, S.K. Henry, R.S. Ingham, J.M. (2012). 'Experimentl testing of precast

- concrete panel connections,' *The New Zealand Concrete Industry Confrence*, Claudelands, Hamilton 11-13 October 2012
- European Commission, (2012). *Design Guidelines for Connections of Precast Structures under Seismic Actions*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012, pp. 62.
- Ertas O., Ozden S., Ozturan T. (2006). "Ductile connection in precast concrete moment resesting frames," *PCI Journal*, May-June 2006. [Online]. Available: <https://www.academia.edu/14940806/>.
- Hanor, A. , Arroyo, A.B. (1998). 'Prestressed bolting in precast concrete beam-column connection,' *Institution of Civil Enggineers - Structures and Buildings*, vol. 128, May 1998, pp. 144-153.
- International Federation for Structural Concrete (*fib*), (2008). *Structural connections for precast concrete buildings*. Stuttgart: Sprint-Digital-Druck, 2008, pp. 1-2.
- Kang, T.H.K. Lee, D.J. (2013). 'Special precst beam-column connection using dry cast method,' *The 2013 World Congress on Advances in Structural Enggineering and Mechanics (ASEM13)*, Jeju, Korea, 8-12 September 2013 pp. 1779-1788.
- Peikiko. (2020). *Bolted column connection for ease of design, speed of errection, and safty*. [Online]. Available: <https://www.peikko.com/products/bolted-column-connections/overview/>.
- Pul, S., Senturk, M. (2017). 'A bolted moment connection model for column-beam joint,' *Proceedings of the 2nd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'17)*, Barcelona, Spain 2-4 April, 2017.