

ANALISIS PERILAKU KUNCI GESER FERRO CAST DUCTILE TANPA PEREKAT UNTUK PENGGABUNGAN SEGMENT PRACETAK PADA STRUKTUR JEMBATAN BETON PRATEKAN DENGAN MENERAPKAN VARIASI MUTU FERRO CAST DUCTILE

ANALYSIS OF FERRO CAST DUCTILE SHEAR KEY WITHOUT EPOXY TO CONNECT THE PRECAST SEGMENT IN PRESTRESSED BRIDGE STRUCTURE BY APPLYING VARIATION OF FERRO CAST DUCTILE QUALITY

Rosi Nursani*¹, Heru Purnomo²

*Email: rosinursani@unper.ac.id

¹Universitas Perjuangan Tasikmalaya

²Universitas Indonesia

Abstrak— Sambungan kunci geser pada jembatan pracetak segmental berfungsi mendistribusikan gaya geser dari satu segmen ke segmen lainnya dan menyatukan antar segmen pracetak sehingga menjadi satu kesatuan struktur yang utuh. Penelitian yang dilakukan merupakan penelitian yang bersifat numerikal dan eksperimental terhadap sambungan kunci geser tanpa perekat. Kunci geser yang digunakan merupakan kunci geser dengan material *ferro cast ductile* yang memiliki tipe *male-female shear key*. Penelitian ini dilakukan dengan simulasi numerik dengan program ANSYS dengan analisis non linear. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan sambungan kunci geser dari material *ferro cast ductile* dengan menerapkan variasi mutu *ferro cast ductile* yang digunakan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi mutu *ferro cast ductile* yang digunakan maka semakin besar pula nilai tegangan geser maksimum sambungan kunci geser *ferro cast ductile*. Kegagalan pertama terjadi bukan pada bagian blok beton melainkan pada *male shear key*. Selain itu, Analisis eksperimental dan analisis numerik memberikan hasil nilai tegangan geser maksimum yang tidak jauh berbeda. Grafik hubungan tegangan geser dan perpindahan vertikal pada hasil eksperimen dan analisis numerik memiliki pola yang hampir sama.

Kata kunci — Kunci Geser; *Ferro Cast Ductile*; Gaya Prategang; Tegangan Geser; Perpindahan Vertikal

Abstract— Shear key connection in the precast segmental bridge has the function to distribute shear force from one segment to another segment and to connect the precast segments of concrete become a complete structure of bridge. This study is numerical and experimental research which discusses about the shear key connection without epoxy. The material of shear key is ferro cast ductile and the type of shear key is male-female shear key. This study is implemented by numerical simulation using ANSYS program with non linear analysis. The purpose of this study is to know the strength of ferro cast ductile shear key connection by applying variation of ferro cast ductile quality. The results of this study show that the highest maximum shear stress of ferro cast ductile shear key connection is resulted by the shear key connection which has the highest tensile strength. Experimental analysis and numerical analysis produce the maximum shear stress which have similar value. The graph of shear stress and vertical displacement which are resulted by experiment and numerical analysis have similar plot.

Keywords — Shear Key; Ferro Cast Ductile; Prestressing Force; Shear Stress; Vertical Displacement

I. PENDAHULUAN

Material beton merupakan material yang banyak digunakan sebagai material bangunan salah satunya jembatan.

Jembatan merupakan sarana yang penting bagi kehidupan manusia karena berfungsi menghubungkan dua daerah yang terhalang oleh berbagai jenis rintangan seperti sungai, jurang dan lain-lain.

Material beton memiliki banyak keuntungan di antaranya memiliki kuat tekan yang tinggi, akan tetapi memiliki kuat tarik yang rendah. Oleh karena itu, berkembanglah teknologi beton prategang untuk mengatasi tegangan tarik yang terjadi pada beton akibat beban yang bekerja. Seiring dengan berkembangnya teknologi, berkembang pula teknologi jembatan yang digunakan seperti sistem jembatan pracetak segmental.

Beton pracetak berkembang sebagai solusi dari berbagai permasalahan beton konvensional yang terjadi. Beton pracetak memiliki beberapa keuntungan yaitu pengerjaan proyek menjadi lebih singkat, jaminan mutu yang baik, keandalan dan keamanan yang terjamin. Sedangkan beton pracetak segmental banyak digunakan karena adanya keterbatasan dari sisi produksi dan transportasi. Oleh karena itu, beton pracetak tersedia dalam bentuk segmen-segmen komponen yang dapat di sambung menjadi suatu sistem struktur yang utuh.

Sambungan merupakan bagian struktur yang sangat penting karena selain berfungsi menyatukan antar segmen beton pracetak sehingga menjadi satu kesatuan struktur yang utuh, sambungan juga berfungsi untuk menyalurkan gaya-gaya geser akibat beban-beban yang bekerja. Oleh karena itu, sambungan pada jembatan pracetak segmental sering disebut dengan kunci geser (*Shear Key*).

Kunci geser yang biasa digunakan untuk menggabungkan segmen-segmen beton pracetak pada jembatan adalah kunci geser material beton yang memiliki bentuk gerigi. Akan tetapi, seiring dengan perkembangan teknologi, selain kunci geser beton mulai dikembangkan pula *metal shear key* atau kunci geser dengan menggunakan material metal salah satunya besi tuang nodular atau *Ferro Cast Ductile* (FCD). *Ferro Cast Ductile* (FCD) merupakan material besi yang memiliki sifat mekanis mendekati sifat mekanis baja. *Ferro cast ductile* merupakan salah satu jenis besi tuang memiliki grafit berbentuk nodular sehingga memiliki

keuletan lebih tinggi dari pada jenis besi tuang lainnya.

Oleh karena itu, penulis melakukan penelitian yang bersifat numerik dengan menggunakan software ANSYS *student version* terhadap kunci geser *Ferro Cast Ductile* (FCD) untuk mengetahui apakah sambungan geser dengan material *Ferro Cast Ductile* (FCD) tersebut memiliki kapasitas geser yang baik agar dapat digunakan pada sebuah struktur jembatan. Analisis numerik dilakukan dengan menerapkan berbagai variasi mutu material *Ferro Cast Ductile* (FCD) agar dapat diketahui mutu FCD terbaik yang dapat digunakan sebagai mutu material kunci geser. Selain bersifat numerikal, penelitian ini juga dilakukan secara eksperimental sebagai validasi dari hasil analisis numerik yang dilakukan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

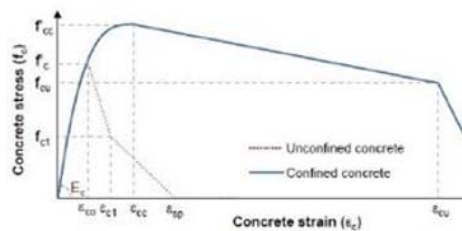
A. Kontruksi Beton Pracetak Segmental dengan Teknologi Beton Prategang

Konstruksi beton pracetak segmental sering digunakan dengan teknologi beton prategang. Semua manfaat dari beton pracetak, beton prategang dan konstruksi segmental didapatkan secara bersama-sama dalam konstruksi pracetak segmental dengan teknologi beton prategang yang sering digunakan untuk konstruksi jembatan (Cruzado, 1998). Beton pracetak merupakan beton yang dicor di fabrikasi atau tempat khusus di permukaan tanah yang kemudian dibawa ke lokasi proyek untuk proses ereksi atau penyusunan menjadi suatu struktur yang utuh. Sistem beton pracetak pada umumnya digunakan dengan sistem segmental. Sistem beton pracetak segmental banyak digunakan untuk bangunan sipil karena adanya keterbatasan dalam transportasi. Beton pracetak akan sangat sulit dikirimkan secara utuh ke lokasi proyek terlebih lagi apabila proyek yang dikerjakan merupakan proyek yang berskala besar. Dengan sistem segmental, beton pracetak dapat dengan

mudah dikirim ke lokasi proyek karena kapasitas transportasi yang terjangkau.

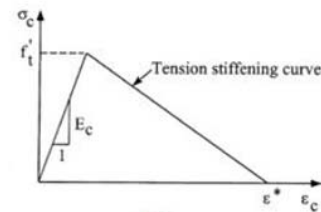
Pada beton prategang, gaya prategang mengendalikan terjadinya retak dan defleksi. Tulangan berfungsi melawan tegangan tarik yang tidak dapat dipikul lagi oleh beton. Beton prategang adalah beton yang telah diberikan tegangan internal awal dan distribusikan sehingga dapat mengimbangi tegangan yang dihasilkan dari beban eksternal (ACI dalam Cruzado, 1998)

Beton merupakan material yang memiliki kuat tekan yang baik tetapi memiliki kuat tarik yang rendah saat diberikan beban luar. Berikut merupakan hubungan tegangan dan regangan tekan untuk beton terkekang dan beton tidak terkekang



Gambar 1. Grafik Hubungan Tegangan dan Regangan Tekan Beton
Sumber : (Reddiar, 2009)

Pada kurva di atas, garis putus-putus berwarna merah menunjukkan beton tidak terkekang sedangkan garis penuh berwarna biru menunjukkan beton terkekang. Beton terkekang (*confined concrete*) merupakan beton yang daerah luasannya dibatasi oleh tulangan. Beton terkekang mampu menahan regangan lebih tinggi dan mengalami kehilangan tegangan yang lebih sedikit dari pada beton tidak terkekang karena keberadaan tulangan dapat membatasi deformasi beton ketika menerima beban yang bekerja. Sedangkan hubungan tegangan dan regangan tarik beton dapat dilihat dari grafik berikut



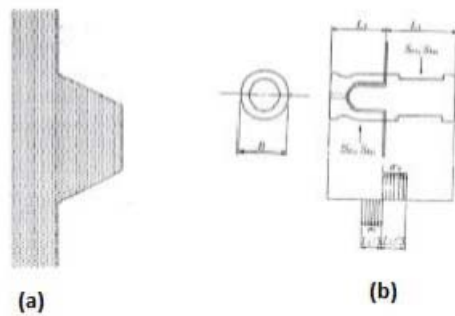
Gambar 2. Grafik Hubungan Tegangan dan Regangan Tarik Beton
Sumber : (Hu, Lin, & Jan, 2004)

B. Kunci Geser pada Jembatan Segmental

Kunci geser (*Shear Key*) digunakan dalam sambungan jembatan pracetak segmental untuk menggabungkan antar segmen pracetak sehingga menjadi satu kesatuan struktur yang utuh dan mendistribusikan gaya-gaya geser akibat beban-beban yang bekerja. Zhou. et.al (2005) menjelaskan bahwa kunci geser memiliki tahanan geser yang relatif tinggi.

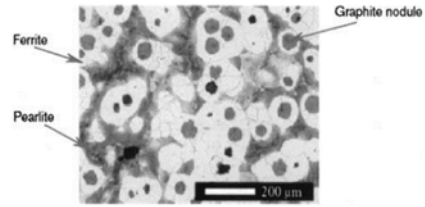
Choong Pak Lim (2011) menjelaskan bahwa dalam menggabungkan kekuatan beton, harus dibuat permukaan geser yang saling mengunci agar memberikan tahanan terhadap gaya horizontal yang diterapkan oleh segmen beton yang kuat. Penggunaan kunci geser pada konstruksi beton pracetak dapat mengurangi waktu konstruksi, karena lubang kunci dirancang terlebih dahulu yang nantinya akan digunakan sebagai panduan untuk penempatan segmen beton. Sehingga segmen dapat ditempatkan ke posisi yang telah ditentukan dengan mudah. Akan tetapi desain harus dilakukan secara rinci untuk memastikan tidak ada terjadi kegagalan atau salah penempatan kunci dan lubang kunci karena apabila terjadi kesalahan maka akan menyebabkan kegagalan konstruksi dan harus dilakukan proses rekonstruksi. Sementara itu, Sullivan (2003) menjelaskan bahwa terdapat dua jenis kegagalan yang dapat terjadi pada *shear key* yaitu kegagalan geser dan kegagalan gelincir.

Berdasarkan bentuknya, *shear key* yang biasa ditemukan pada konstruksi sipil terdiri dari *shear key* beton dan *metal shear key*.



Gambar 3. (a) *shear key* beton, (b) *metal shear key*
 Sumber: (Japan Society of Civil Engineers Standard Specifications for Concrete Structure-2002)

Sedangkan *pearlite* merupakan campuran sementit dan *ferrite* dimana *ferrite* bersifat lunak dan ulet.



Gambar 4. Gambaran Struktur Mikro *Ferro Cast Ductile*
 Sumber : (P. Minnebo et.al, 2006)

C. Ferro Cast Ductile (FCD)

Besi tuang merupakan salah satu jenis paduan berbahan utama besi dan karbon hasil proses pengecoran. Besi tuang diklasifikasikan berdasarkan struktur mikro dan sifat-sifatnya menjadi beberapa jenis yaitu besi tuang kelabu (*grey cast iron*) besi tuang ulet atau nodular (*ductile or nodular cast iron*) atau disebut dengan *Ferro Cast Ductile* (FCD), besi tuang putih (*white cast iron*) dan besi tuang mampu tempa (*malleable cast iron*).

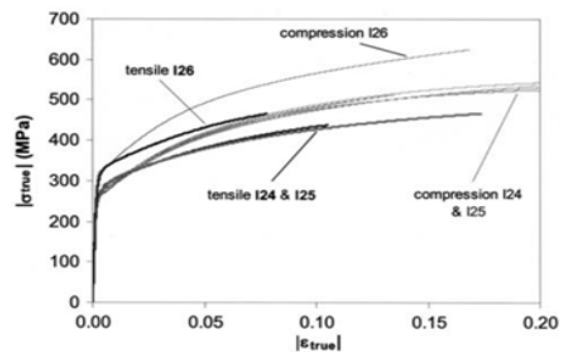
Hukum konstitutif material *Ferro Cast Ductile* (FCD) yang digunakan dalam memodelkan sambungan kunci geser dalam penelitian ini didapatkan dari penelitian yang telah dilakukan oleh P. Minnebo, K.-F. Nilsson dan D. Blagoeva yang ditulis dalam jurnal penelitian yang berjudul *Tensile, Compression and Fracture Properties of Thick-Walled Ductile Cast Iron Components* pada tahun 2006. Penelitian tersebut bersifat eksperimen dan menghasilkan properti mekanik besi tuang nodular baik itu tarik maupun tekan. Percobaan dilakukan pada tiga tipe besi tuang nodular *canister inserts* yaitu I24, I25 dan I26.

Tabel-1. Komposisi Kimia *Ferro Cast Ductile* (FCD)

Type	Composition, %									
	TC(a)	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S	C
Gray iron	3.25-3.50	0.50-0.90	1.80-2.30	0.05-0.45	0.05-0.20	0.05-0.10	0.15-0.40	0.12 max	0.15 max	...
Malleable iron	2.45-2.55	0.35-0.55	1.40-1.50	0.04-0.07	0.05-0.30	0.03-0.10	0.03-0.40	0.03 max	0.05-0.07	...
Ductile iron	3.60-3.80	0.15-1.00	1.80-2.80	0.03-0.07	0.05-0.20	0.01-0.10	0.15-1.00	0.03 max	0.002 max	0.005-0.025 (b)

Sumber : (ASM Handbook, Volume 1, 2005)

Besi tuang nodular adalah salah satu jenis besi tuang yang dihasilkan dengan menambahkan unsur Mg ataupun Ce kepada cairan besi tuang sesaat sebelum cairan dituang. Dengan adanya penambahan unsur-unsur tersebut, grafit yang dihasilkan berbentuk bulat atau nodular yang mempunyai derajat konsentrasi tegangan yang kecil, sehingga berakibat kekuatan besi tuang menjadi lebih baik. Matriks *ferro cast ductile* terdiri dari *ferrite* dan *pearlite*. *Ferrite* merupakan matriks besi tuang nodular yang berasal dari modifikasi struktur besi murni pada suhu ruang.



Gambar 5. Grafik Hubungan Tegangan dan Regangan FCD I24, FCD I25 dan FCD I26
 Sumber : (P. Minnebo et.al, 2006)

Grafik hubungan tegangan-regangan besi tuang nodular atau *ferro cast ductile* di atas tidak dapat memperlihatkan kondisi leleh dengan jelas. Oleh karena itu, tegangan leleh ditentukan dengan melakukan metode *offset* sebesar 0,2%.

Tabel-2. Tegangan Leleh FCD I24, FCD I25, FCD I26

Insert	Statistical parameter	Compression $R_{p0.2}$, MPa	Tension $R_{p0.2}$, MPa
I24	Average	274	262
	Standard deviation	5	8
I25	Average	265	262
	Standard deviation	2	2
I26	Average	326 ^a	311
	Standard deviation	- ^a	7

^aOnly one test was performed

Sumber : (P. Minnebo et.al, 2006)

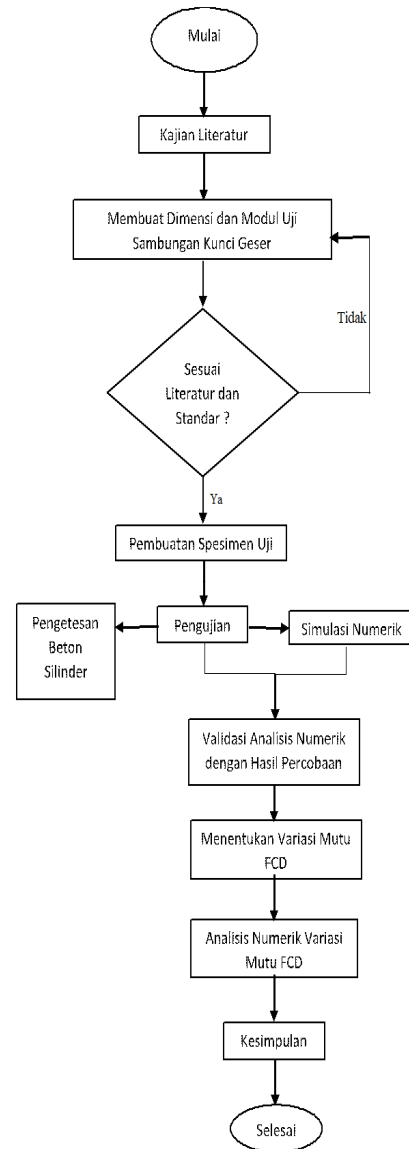
III. METODE

A. Alur Penelitian

Hal pertama yang dilakukan adalah melakukan kajian literatur mengenai hal – hal yang diperlukan untuk penelitian ini di antaranya mengenai sistem jembatan pracetak segmental dengan teknologi beton prategang, kunci geser, hukum konstitutif material dan lain-lain. Kajian literatur dilakukan terhadap standar atau peraturan serta beberapa penelitian terdahulu untuk menentukan dimensi spesimen dan model uji yang akan dilakukan. Spesimen sambungan kunci geser terdiri dari dua material yaitu beton untuk material segmen beton pracetak dan *ferro cast ductile* sebagai material kunci geser. Dimensi kunci geser dan blok beton yang digunakan merupakan dimensi sebenarnya di lapangan. Segmen beton pracetak yang ditinjau dalam penelitian ini merupakan beton prategang sehingga beton yang digunakan merupakan beton mutu tinggi dengan nilai kuat tekan 40 Mpa – 80 Mpa (SNI Pd-T-04-2004-C).

Penelitian ini bersifat eksperimental dan numerikal. Analisis numerikal digunakan dengan menggunakan program ANSYS *student version*. Penelitian eksperimental digunakan sebagai validasi analisis numerikal dimana specimen uji yang digunakan merupakan sambungan kunci geser dengan mutu material FCD

I26. Setelah analisis numerikal menghasilkan hasil yang telah mendekati hasil eksperimen kemudian dilakukan analisis numerik dengan menerapkan variasi mutu *ferro cast ductile* yang digunakan.

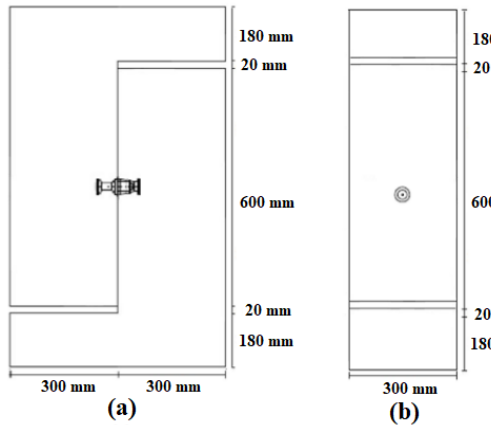


Gambar 6. Alur Penelitian

B. Percobaan Sambungan Kunci Geser *Ferro Cast Ductile*

Penelitian ini tidak dilakukan pada satu gelagar utuh jembatan, akan tetapi disederhanakan menjadi dua segmen yang disambung *shear key*. Sambungan kunci

geser terdiri dari dua bagian geometri utama yaitu sambungan *male shear key* yaitu beton bagian atas yang didalamnya dipasang *male shear key* dan sambungan *female shear key* merupakan beton bagian bawah yang di dalamnya dipasang *female shear key*.



Gambar 7. Dimensi Potongan Geometri Sambungan Kunci Geser (a) Memanjang, (b) Melintang

Sambungan *male shear key* menerima beban vertikal monotonik secara langsung dari atas yang kemudian didistribusikan ke bagian sambungan *female shear key*. Selain menerima langsung beban vertikal, sambungan *male shear key* juga menerima langsung gaya horizontal yang merupakan penyederhanaan gaya pratekan pada kondisi jembatan sebenarnya. Sebelum gaya dari *hydraulic jack* vertikal dan horizontal menekan *load cell* dan spesimen sambungan kunci geser, dipasang pelat ukuran (30 x 30) cm agar beban yang diberikan merupakan beban luasan. Pembebanan horizontal merupakan pembebanan konstan sedangkan pembebanan vertikal merupakan pembebanan *incremental*. Pembebanan yang terjadi selama percobaan berlangsung dapat dibaca dari *load cell* dan tercatat secara otomatis dengan menggunakan *software*.



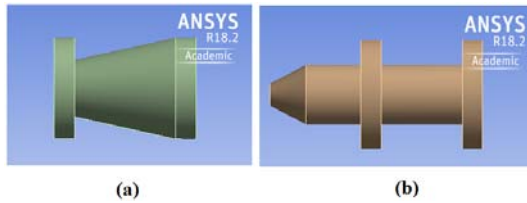
Gambar 8. Setup Percobaan Sambungan Kunci Geser

Setelah spesimen atau benda uji telah dibuat dan semua alat yang akan digunakan telah dipersiapkan dengan baik, spesimen dan semua alat-alat tersebut dirakit pada *frame* kerja berdasarkan model uji yang telah ditentukan. *Hydraulic jack* diletakkan di atas spesimen dengan tujuan memberikan gaya vertikal terhadap spesimen. Selain itu, untuk mengukur *displacement* yang terjadi maka dipasang *dial gauge* di beberapa titik yang ditentukan. Satu buah *dial gauge* di pasang pada setiap *gap* untuk mengukur perpindahan vertikal sehingga total *dial gauge* yang digunakan adalah empat buah *dial* yang dipasang pada setiap *gap* untuk bagian depan dan bagian belakang spesimen. Sedangkan untuk mengukur perpindahan horizontal digunakan sebuah *dial gauge* yang dipasang di bagian kiri atas spesimen.

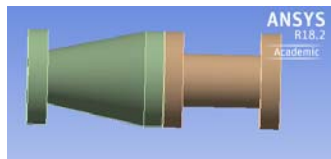
C. Analisis Numerik Sambungan Kunci Geser *Ferro Cast Ductile*

Sambungan kunci geser *ferro cast ductile* dimodelkan dengan menggunakan program ANSYS *student version*. Hal pertama yang harus ditentukan dalam memodelkan sambungan kunci geser *ferro cast ductile* adalah menentukan *engineering data* dan geometri sambungan kunci geser itu sendiri. pemodelan sambungan kunci geser dalam penelitian ini menggunakan

dua jenis material yaitu beton dan *ferro cast ductile*.

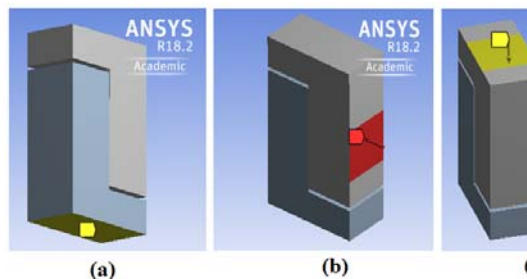


Gambar 8. (a) *Female Shear Key* ; (b) *Male Shear Key*



Gambar 9. Gabungan *Female Shear Key* dan *Male Shear Key*

Penelitian ini tidak dilakukan pada satu gelagar utuh jembatan, akan tetapi hanya dilakukan pada dua segmen yang disambung *shear key* sehingga perlu ditentukan beberapa kondisi batas agar tetap mempresentasikan kondisi sebenarnya. Kondisi batas yang diberikan pada penelitian ini antara lain dengan membatasi pergerakan translasi pada bagian bawah segmen dengan memberikan perletakan sendi yang dapat didefinisikan dengan memilih *displacement* sebagai tipe *support* dalam program ANSYS.

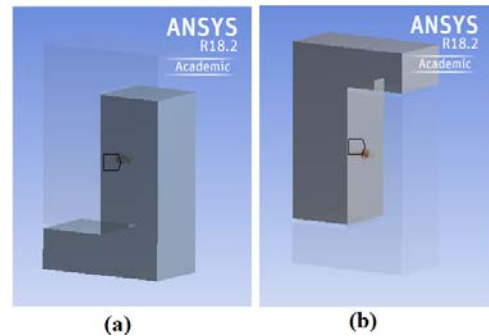


Gambar 10. (a) Perletakan ; (b) Beban Horizontal ; (c) Beban Vertikal

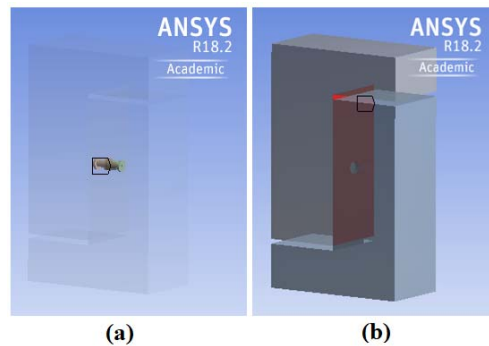
Beban yang bekerja pada sambungan kunci geser pada penelitian ini merupakan beban luasan yang bekerja pada luasan permukaan atas yaitu beban vertikal yang besarnya terus meningkat hingga mencapai beban maksimum sebelum mengalami kegagalan. Selain itu, untuk mempresentasikan gaya prategang

diberikan pembebanan pada permukaan sebelah kiri dan kanan.

Selain itu, sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya bahwa geometri sambungan kunci geser pada penelitian ini terdiri dari beberapa komponen geometri sehingga dalam penggabungan komponen-komponen tersebut, kontak antar komponen harus didefinisikan dengan baik.



Gambar 11. (a) Kontak antara *Female Shear Key* dengan Blok Beton Bagian Bawah ; (b) Kontak antara *Male Shear Key* dengan Blok Beton Bagian Atas



Gambar 12. (a) Kontak antara *Male Shear Key* dengan *Female Shear Key*; (b) Kontak antara Blok Beton Bagian Atas dengan Blok Beton Bagian Bawah

Model kontak didefinisikan terlebih dahulu dengan menentukan permukaan asal dan target. Permukaan kontak dan target ditentukan berdasarkan kondisi geometri dan pembebanan yang diberikan pada pemodelan, permukaan kontak akan mendistribusikan beban sedangkan permukaan target akan menerima beban dari elemen kontak. Sifat kontak yang digunakan pada semua model kontak adalah *bonded* kecuali pada model

kontak beton-beton menggunakan sifat kontak *frictional*.

D. Variasi Analisis Numerik

Penelitian dilakukan dengan percobaan dan analisis numerik. Dari percobaan yang dilakukan didapatkan hasil bahwa kegagalan pertama bukan terjadi pada beton melainkan pada *ferro cast ductile*. Oleh karena itu, variasi pemodelan yang akan digunakan dalam analisis numerik adalah variasi mutu *Ferro Cast Ductile* (FCD) sebagai material kunci geser yang digunakan dalam sambungan. Berikut merupakan variasi mutu FCD yang digunakan.

Tabel-3. Variasi Mutu FCD untuk Analisis Numerik

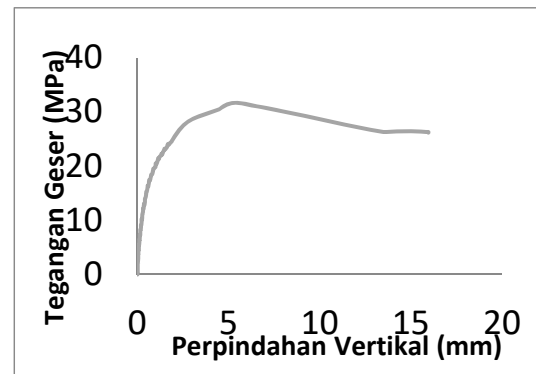
Variasi Mutu FCD	Tegangan Leleh Tarik FCD (MPa)	Tegangan Leleh Tekan FCD (MPa)
I24	262	274
I25	262	265
I26	311	326

Ketiga variasi mutu tersebut dilakukan dengan menggunakan mutu beton yang sama yaitu $f_c' 50$ MPa selain itu, gaya horizontal yang digunakan sebagai penyederhanaan dari gaya prategang yang diberikan pada ketiga variasi juga memiliki besar yang sama yaitu 0,69 MPa.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Validasi Analisis Numerik dengan Menggunakan Hasil Percobaan

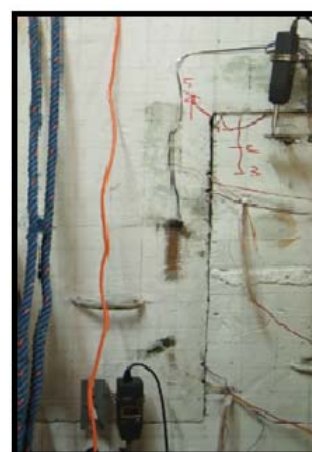
Percobaan yang dilakukan merupakan percobaan sambungan kunci geser dengan material kunci geser yang digunakan adalah FCD I26. Percobaan dilakukan dengan memberikan beban vertikal monotonik sampai mencapai nilai beban maksimum yaitu sampai sambungan kunci geser mengalami kegagalan dan gap telah dalam kondisi tertutup sepenuhnya.



Gambar 13. Grafik Hubungan Tegangan Geser dan Perpindahan Vertikal Hasil Percobaan

Grafik di atas merupakan grafik hubungan tegangan geser dan perpindahan vertikal hasil percobaan sambungan kunci geser *ferro cast ductile* yaitu FCD I26. Pada awal pembebanan, tegangan geser dan perpindahan vertikal terus meningkat. Tegangan geser kemudian mengalami penurunan pada nilai perpindahan vertikal 5 mm dan terus menurun sampai akhirnya kunci geser mengalami kegagalan.

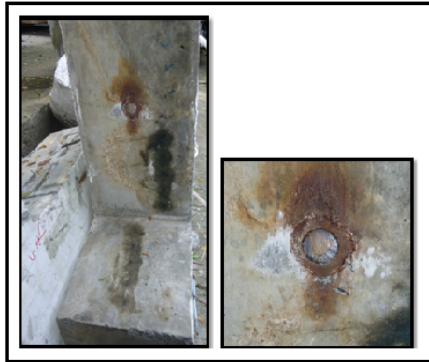
Kegagalan terjadi pada bagian *male shear key* dimana bagian pangkal *male shear key* mengalami putus total. Kunci geser putus pada saat pembebanan maksimum yaitu sebesar 186,4 KN. Hal ini terjadi karena *ferro cast ductile* merupakan material yang getas dan tidak memiliki keuletan yang baik seperti material baja.



Gambar 14. Pola Retak Beton setelah Percobaan Dilakukan

Gambar 14. merupakan kondisi sambungan kunci geser setelah pengujian

selesai yaitu ketika kondisi gap telah tertutup sepenuhnya. Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa beton tidak mengalami kerusakan yang berat, akan tetapi hanya mengalami retak rambut saja. Hal tersebut terjadi karena kegagalan pertama terjadi pada kunci geser sehingga kondisi beton setelah percobaan dilakukan relatif masih baik.



Gambar 15. Kondisi *Female Shear Key* setelah Percobaan Dilakukan

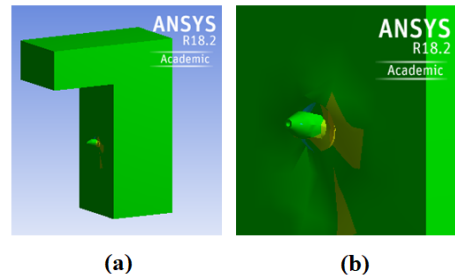


Gambar 16. Kondisi *Male Shear Key* setelah Percobaan Dilakukan

Gambar 16. menunjukkan bagian *male shear key* yang masuk ke dalam *female shear key* dalam kondisi putus total. Sedangkan kondisi beton pada daerah kontak spesimen tidak terjadi retak sama sekali. Hal ini menjadi alasan mengapa terdapat lonjakan nilai perpindahan vertikal dari pembacaan *dial gauge* ketika percobaan berlangsung dan membuktikan bahwa kegagalan pertama tidak terjadi pada beton melainkan terjadi pada bagian kunci geser.

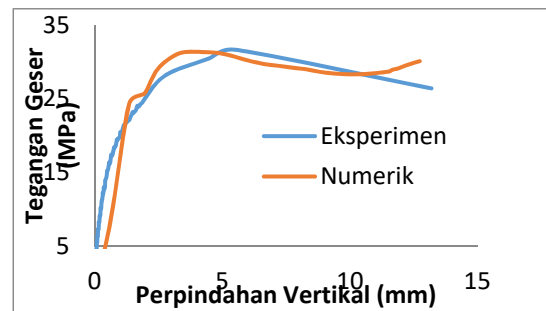
Seperti telah dijelaskan sebelumnya, selain bersifat eksperimental penelitian ini juga dilakukan secara numerik. Tegangan geser yang didapatkan dari pemodelan ANSYS merupakan tegangan geser maksimum pada daerah *male shear key*

yang didapatkan dengan mem-*probe* daerah dimana tegangan geser memiliki nilai maksimum seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 17. Daerah Terjadinya Tegangan Geser Maksimum pada Analisis Numerik

Perbedaan nilai tegangan geser maksimum dapat dilihat dengan perbedaan kontour warna pada sambungan kunci geser. Kontour warna kuning menunjukkan nilai tegangan geser lebih besar dari pada kontour warna hijau. Nilai tegangan maksimum terjadi pada daerah bawah bagian *male shear key*. Tegangan geser tersebut kemudian diplot ke dalam sebuah grafik hubungan tegangan geser dengan perpindahan vertikal sambungan kunci geser.

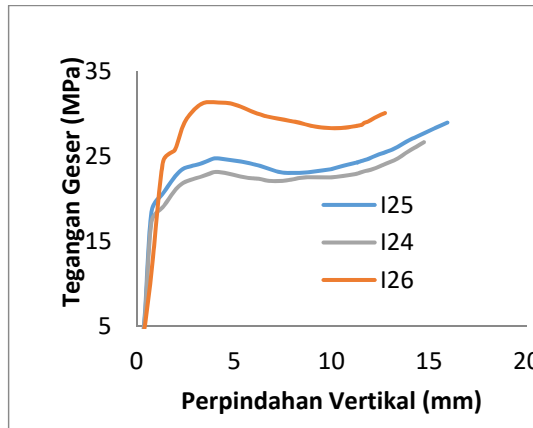


Gambar 18. Perbandingan Grafik Hubungan Tegangan Geser dan Perpindahan Vertikal Hasil Percobaan dan Hasil Analisis Numerik

Gambar 18. merupakan perbandingan grafik hubungan tegangan geser dan perpindahan vertikal sambungan kunci geser hasil percobaan dan analisis numerik dengan menggunakan program ANSYS. Dari grafik tersebut dapat terlihat bahwa hasil percobaan dan hasil analisis numerik tidak memiliki hasil yang persis sama. Akan tetapi kedua hasil tersebut menunjukkan pola yang hampir sama dan memiliki nilai tegangan geser maksimum yang sama. Dari

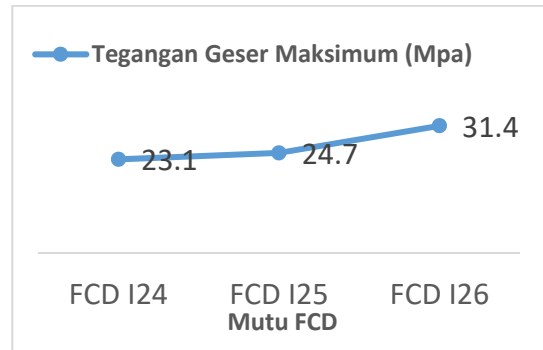
grafik di atas, dapat dilihat bahwa nilai tegangan geser maksimum hasil percobaan adalah 31,66 MPa sedangkan nilai tegangan geser maksimum hasil pemodelan dengan *software* ANSYS adalah 31,40 MPa.

B. Analisis Numerik dengan Menerapkan Variasi Mutu Ferro Cast Ductile



Gambar 19. Perbandingan Grafik Hubungan Tegangan Geser dan Perpindahan Vertikal Hasil Analisis Numerik untuk Semua Variasi Mutu FCD

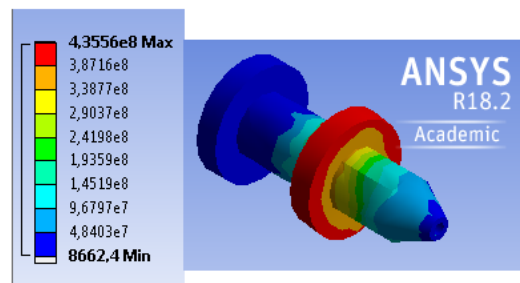
Gambar di atas merupakan perbandingan grafik hubungan tegangan geser dan perpindahan vertikal sambungan kunci geser dari ketiga variasi mutu material *ferro cast ductile* yang digunakan. Analisis numerik yang dilakukan dengan menggunakan ketiga variasi mutu *ferro cast ductile* tersebut menghasilkan pola sesuai dengan hukum konstitutif dari masing-masing mutu yang digunakan. Mutu FCD I26 menghasilkan tegangan geser yang paling besar, akan tetapi paling getas di mana perpindahan vertikal yang dihasilkan memiliki nilai paling kecil. Sedangkan untuk mutu FCD I24 dan FCD I25 menghasilkan nilai tegangan geser maksimum yang tidak jauh berbeda. Kedua mutu ini lebih ulet dari pada mutu I26. Akan tetapi, mutu FCD yang paling ulet adalah mutu FCD I25. Hal tersebut menyebabkan nilai tegangan maksimumnya sedikit lebih tinggi dari pada FCD I24.



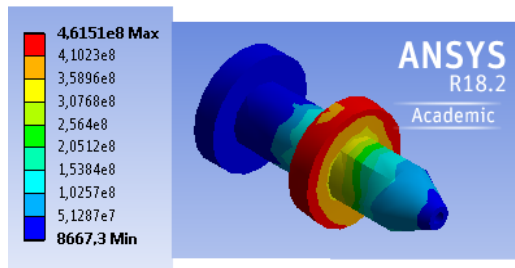
Gambar 20. Grafik Perbandingan Tegangan Geser Maksimum untuk Semua Variasi Mutu FCD

Kunci geser dengan material FCD I26 memiliki nilai tegangan geser maksimum paling besar. Mutu FCD I26 memiliki nilai tegangan leleh dan tegangan ultimate yang hampir sama dengan mutu FCD 450 di pasaran. FCD 450 merupakan *ferro cast ductile* yang digunakan *Standard Specifications for Concrete Structures-2002*.

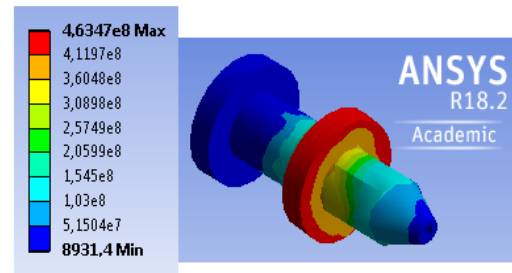
Dari percobaan yang telah dilakukan dengan menggunakan mutu I26 didapatkan hasil bahwa kegagalan pertama tidak terjadi pada beton melainkan terjadi pada kunci geser. Kunci geser bagian *male shear key* putus total. Hal tersebut sesuai dengan hasil analisis numerik yang dilakukan. Tegangan Ekuivalen Von Mises pada pangkal *male shear key* telah melebihi nilai tegangan leleh untuk masing-masing mutu material *ferro cast ductile* yang menjadi variasi pemodelan dalam analisis numerik yang dilakukan.



Gambar 21. Kontour Teganagn Ekuivalen Von Mises untuk Variasi FCD I24

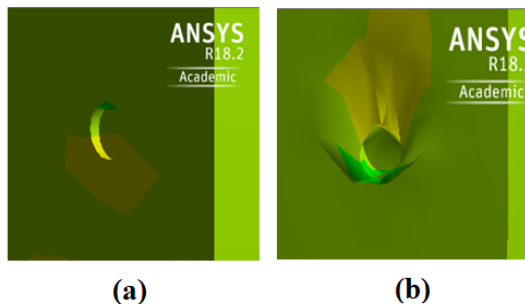


Gambar 22. Kontour Tegagnn Ekivalen Von Mises untuk Variasi FCD I25



Gambar 23. Kontour Tegagnn Ekivalen Von Mises untuk Variasi FCD I26

Gambar di atas merupakan kontour tegangan Von Mises pada *male shear key*. Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa bagian pangkal *male shear key* yang masuk ke bagian *female shear key* telah menghasilkan kontour warna yang menunjukkan tegangan ekivalen von mises yang telah melebihi nilai tegangan leleh dari setiap mutu *ferro cast ductile*. *Ferro cast ductile* tidak memiliki keuletan yang baik seperti baja sehingga ketika tegangan lelehnya terlewati, FCD bias mengalami putus total seperti yang terjadi pada *male shear key* yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 24. Kontour Tegangan Utama pada Beton : (a) Blok Beton Atas (b) Blok Beton Bawah

Sedangkan kondisi beton pada sambungan baik itu blok beton atas maupun blok beton bawah tidak mengalami retak yang dalam hanya mengalami retak rambut saja. Hal ini sesuai dengan hasil analisis numeric yang menunjukkan bahwa nilai tegangan utama maksimum beton belum melebihi nilai tegangan izin beton yang digunakan.

IV. PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan eksperimen dan analisis numerik yang telah dilakukan pada sambungan kunci geser *ferro cast ductile* maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

- Sambungan kunci geser dengan material FCD I26 memiliki tegangan geser paling tinggi akan tetapi menghasilkan perpindahan vertikal paling kecil.
- Sambungan kunci geser dengan material FCD I24 dan FCD 125 memiliki nilai tegangan geser maksimum yang tidak jauh berbeda akan tetapi sambungan kunci geser dengan kunci geser FCD I25 menghasilkan perpindahan vertikal paling besar.
- Tegangan geser hasil analisis numerik untuk variasi mutu FCD I24 adalah 23,1 MPa , FCD I25 adalah 24,7 MPa sedangkan untuk variasi mutu FCD I26 adalah 31,4 MPa.
- Percobaan dan analisis numerik menghasilkan grafik hubungan tegangan geser dan perpindahan vertikal yang memiliki pola yang sama serta memiliki nilai tegangan geser maksimum yang tidak jauh berbeda. Tegangan geser maksimum hasil percobaan adalah 31,66 MPa Sedangkan tegangan geser maksimum hasil analisis numerik adalah 31,40 MPa.

B. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, berikut beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya. Dalam melakukan penelitian yang bersifat eksperimental perlu pengawasan yang sangat baik agar tidak terdapat banyak kesalahan yang dapat mempengaruhi hasil penelitian. Selain itu, memperbanyak variasi dalam melakukan penelitian mengenai sambungan kunci geser seperti penggunaan perekat, variasi dimensi kunci geser dan variasi jumlah kunci geser sehingga dapat diketahui lebih banyak parameter yang dapat mempengaruhi sambungan kunci geser.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ASM Handbook Volume 1. *Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*.
- [2] Buyukozturk, Oral. et.al., Bakhoun, M. M., and Beattie, S. M. (1990). *Shear Behaviour of Joints in Precast Concrete Segmental Bridges*. Journal of structural engineering New York, N.Y.
- [3] Cruzado, Hector J. (1998). *Assessment of a Precast Prestressed Segmental Concrete Rail Transit Guideway Design*.
- [4] ahlberg. Öberg. Faleskog. (2014). *Continuum Modeling Of Nodular Cast Iron Using A Porous Plastic Model With Pressure-Sensitive Matrix-Experiments, Model Calibration & Verification*.
- [5] Hu, H.-T., Lin, F.-M., & Jan, Y.-Y. (2004). *Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete beams strengthened by Fiber-Reinforced Plastics*.
- [6] Issa, Mohsen A. Abdalla, Hiba A. (2007). *Structural Behavior of Single Key Joints in Precast Concrete Segmental Bridges*
- [7] Japan Society of Civel Engineering. (2005). *Standard Specifications for Concrete Structures-2002*.
- [8] Kaneko, Y. et.al. (2004). *Shear Failure of Plain Concrete in Strain Localized Area*.
- [9] Minnebo, P. et.al. (2006). *Tensile, Compression and Fracture Properties of Thick-Walled Ductile Cast Iron Components*.
- [10] Nukman. et.al. (2002). Pengaruh Penambahan Unsur 0,25 % Mo Pada Besi Tuang Nodular yang Diaustenisasi Dan Diaustemper Menjadi Austemper Ductile Iron Terhadap Sifat Mekanisnya
- [11] Lim, Choong Pak. (2011). *Response of Shear Key Connection with Different Shapes*. Malaysia: University Teknologi Malaysia.
- [12] Reddiar, Madhu K.M. (2009). *Stress-Strain Model of Unconfined and Confined Concrete and Striss-Block Parameters*.
- [13] Runesson, Kenneth. (2006). *Constitutive Modeling of Engineering Material-Theory and Computation*.
- [14] Shape, Graeme Peter. (2007). *Reflective Cracking of Shear Keys in Multi-Beam Bridges*.
- [15] Sullivan, S.R. (2003). *Behaviour of Transverse Joints in Precast Deck Panel System*, MSc. Thesis. Ohio University.
- [16] ang, In-Hwan et.al. (2013). *Shear Strength of Dry Joints in Precast Concrete Modules*
- [17] Zhou, Xiangming et.al. (2003). *Shear Strength of Joints in Precast Concrete Segmental Bridges*.