

# Analisis Desain Tulangan Penghubung *Bored Pile* ke *Pile Cap* untuk Menahan Gaya Geser Dasar

*Analysis of Reinforcement Design of Bored Pile-to-Pile Cap Connections to Resist Base Shear Force*

**Ayatullah Muntazhiri, Yoga Aprianto Harsoyo**

*Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta*

**Abstrak.** Kerusakan yang terjadi pada fondasi akibat bencana gempa bumi dapat memberikan dampak yang fatal pada bangunan di atasnya. Gaya geser dasar yang terjadi pada fondasi bangunan dapat mengakibatkan hubungan antara *bored pile* dan *pile cap* mengalami kerusakan. Oleh sebab itu, diperlukan desain tulangan penghubung yang lebih kuat dalam menahan gaya geser dasar saat gempa bumi terjadi. Penelitian ini menganalisis lima macam desain tulangan penghubung *bored pile* ke *pile cap* dengan melakukan permodelan di *software* ABAQUS CAE 6.14. Kelima desain tersebut terdiri dari Model A dengan desain tulangan penghubung yang dibengkokkan 45°, Model B dengan desain tulangan penghubung yang dibengkokkan 60°, Model C dengan desain tulangan penghubung lurus, Model D dengan desain tulangan penghubung lurus dan tambahan sengkang P12-100, dan Model E dengan desain tulangan penghubung lurus dan tambahan sengkang P12-50. Fondasi *bored pile* yang dianalisis merupakan tiang tunggal, dan pembebanan yang diberikan pada model merupakan beban titik statis dengan arah lateral. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain tulangan penghubung yang dibengkokkan memiliki kekuatan yang lebih kecil dibandingkan dengan tulangan penghubung lurus. Namun penambahan sengkang dan pengurangan jarak sengkang pada tulangan penghubung lurus tidak menunjukkan pengaruh terhadap kekuatan tulangan penghubung tersebut. Selain itu, *displacement* yang terjadi pada masing-masing model tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan.

Kata-kata kunci: Tulangan Penghubung, Gaya Geser Dasar, Hubungan *Bored Pile* ke *Pile Cap*

**Abstract.** *Damage that occurs in the foundation due to earthquake can have a fatal impact on the building above it. The base shear force that occur on the building foundation can cause bored pile and pile cap connections damaged. Therefore, it is necessary to design connecting reinforcement that is stronger in resist the base shear force when an earthquake occurs. This study analyzes five types of bored pile to pile cap connecting reinforcement designs by modeling in ABAQUS CAE 6.14 software. The five designs consist of Model A with 45° bent connecting reinforcement design, Model B with 60° bent connecting reinforcement design, Model C with straight connecting reinforcement design, Model D with straight connecting reinforcement design and additional P12-100 stirrups, and Model E with straight connecting reinforcement design and additional P12-50 stirrups. The analyzed bored pile foundation is a single pile, and the loading given to the model is a static concentrated load in the lateral direction. The results showed that the design of the bent connecting reinforcement had less strength than the straight connecting reinforcement. However, the addition of stirrups and reduction of stirrups distance on straight connecting reinforcement do not show an influence on the strength of the connecting reinforcement. In addition, the displacement that occurred in each model did not show a significant difference.*

*Keywords: Connecting Reinforcement, Base Shear Force, Bored Pile-to-Pile Cap Connections*

## 1. Pendahuluan

Fondasi tidak hanya menahan beban vertikal saat gempa bumi terjadi, tetapi juga menahan beban lateral seperti gaya geser dasar. Maka dari itu, fondasi bangunan juga harus

dirancang untuk kuat menahan beban lateral, terutama pada bagian kritis yang berpotensi mengalami kerusakan seperti hubungan antara *bored pile* dengan *pile cap*. Tulangan utama *bored pile* biasanya dibuat menerus masuk ke

dalam *pile cap* yang digunakan sebagai tulangan penghubung (angkur) antara *bored pile* dengan *pile cap*. Desain tulangan penghubung *bored pile* ke *pile cap* biasanya berbeda-beda dalam pelaksanaan di lapangan. Tidak ada acuan yang secara jelas mengatur bagaimana desain tulangan pada hubungan *bored pile* dengan *pile cap*. Selain itu, penelitian mengenai hubungan *bored pile* dengan *pile cap* juga masih sangat jarang dilakukan. Beberapa penelitian terdahulu seperti yang dilakukan Wang dkk. (2014) meneliti mengenai perbandingan kekuatan tulangan penghubung PHC *pile* dan *pile cap* terhadap beban seismik. Kemudian Guo dkk. (2017) juga melakukan penelitian serupa dengan perbedaan jumlah benda uji dan beban yang digunakan. Penelitian mengenai jenis tiang yang berbeda juga dilakukan Kappes dkk. (2016), penelitian dilakukan untuk menganalisis kekuatan tulangan penghubung tiang baja ke *pile cap* terhadap beban seismik pada struktur bawah jembatan. Penelitian mengenai hubungan fondasi tiang baja juga dilakukan Iekel dkk. (2018), penelitian dilakukan untuk membandingkan variasi desain tulangan penghubung fondasi tiang baja dan *pile cap* untuk menahan gaya angkat (*uplift*). Selain jenis tulangan penghubung baja konvensional, beberapa peneliti juga mulai mengembangkan jenis baja penghubung lain seperti *perfobond*. Kim dkk. (2016) melakukan penelitian untuk membandingkan kekuatan tulangan penghubung baja konvensional dengan *perfobond* dalam menahan beban lateral. Kemudian Kim dkk. (2016a) melakukan penelitian lanjutan dengan menguji beberapa variasi desain *perfobond* untuk menahan gaya cabut. Penelitian mengenai tulangan penghubung menggunakan *perfobond* juga dilakukan Rhim dkk. (2018), penelitian dilakukan untuk menganalisis kekuatan tulangan penghubung tiang baja ke *pile cap* untuk menahan gaya tekan aksial. Karena kurangnya penelitian mengenai hubungan *bored pile* ke *pile cap* tersebut, peneliti tertarik untuk menganalisis beberapa variasi desain tulangan penghubung *bored pile* ke *pile cap*.

Gaya geser dasar adalah gaya lateral total yang terjadi pada tingkat dasar (SNI 1726:2012 Pasal 3.15). Gaya lateral yang terjadi pada kelompok tiang dapat mengakibatkan gerakan rotasi dan translasi. Gerakan rotasi pada kelompok tiang adalah perubahan posisi tiang dalam bentuk perputaran kelompok tiang akibat kekakuan tiang yang sangat besar, sedangkan gerakan translasi adalah perubahan posisi pada kepala kelompok tiang searah dengan datangnya beban lateral (Hanifah, 2018).

Tulangan penghubung adalah tulangan yang disalurkan dan ditanam dari satu bagian struktur ke bagian struktur lainnya dengan panjang tertentu. Panjang penanaman merupakan panjang tulangan tertanam yang disediakan melebihi panjang kritis (SNI 2847:2013 Pasal 2.2). Pada hubungan *bored pile* ke *pile cap*, tulangan penghubung tersebut diperlukan untuk menghindari adanya kerusakan pada hubungan saat menerima beban vertikal maupun horizontal. Selain itu, tulangan penghubung juga dapat mengurangi *bending moment* yang terjadi pada kepala tiang (Xu dan Ma, 2017).

Penelitian ini menganalisis lima variasi desain tulangan penghubung. Kelima variasi desain tersebut dibandingkan untuk mendapatkan desain tulangan penghubung yang paling kuat untuk menahan gaya geser dasar, sehingga dapat dijadikan referensi untuk perancangan bangunan tahan gempa kedepannya.

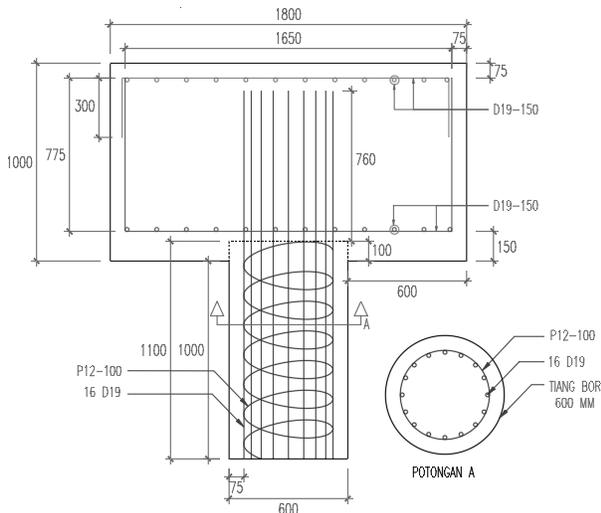
## 2. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan dengan membuat permodelan desain tulangan penghubung *bored pile* ke *pile cap* menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software* ABAQUS CAE 6.14. Hasil permodelan dengan *software* ABAQUS dianggap cukup akurat/sesuai dibandingkan dengan hasil pengujian di laboratorium dari segi kekuatan dan kekakuan model hubungan fondasi tiang-*pile cap* (Wang dkk., 2014). Selain itu, menurut Guo dkk. (2017), jenis kerusakan yang terjadi pada hubungan fondasi tiang-*pile*

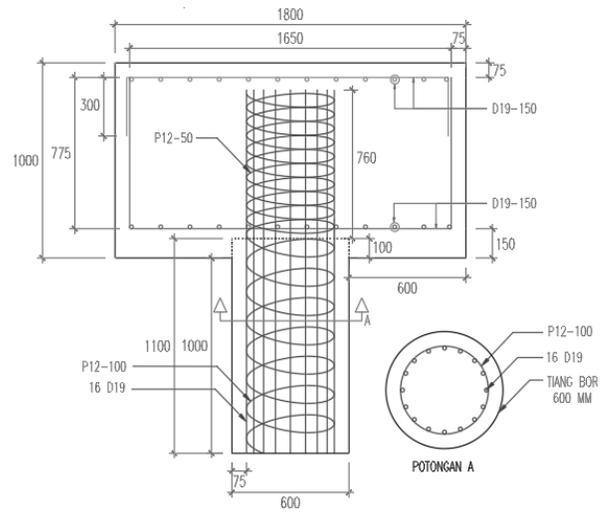


Tabel 1. Detail tulangan penghubung *bored pile* ke *pile cap*

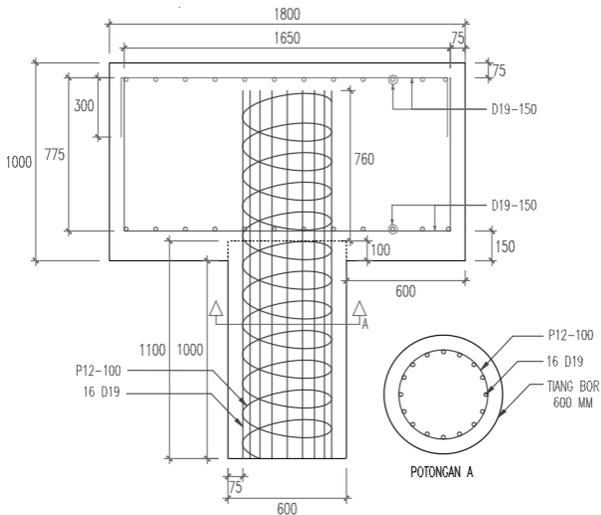
No.	Model	Diameter Bored pile (mm)	Tinggi Bored pile (mm)	Panjang Tulangan Penghubung (mm)	Sudut Bengkokan Tulangan Penghubung (°)	Senggang Tulangan Penghubung
1	A	600	1100	760	45	-
2	B	600	1100	760	60	-
3	C	600	1100	760	-	-
4	D	600	1100	760	-	P12-100
5	E	600	1100	760	-	P12-50



Gambar 4. Detail desain Model C

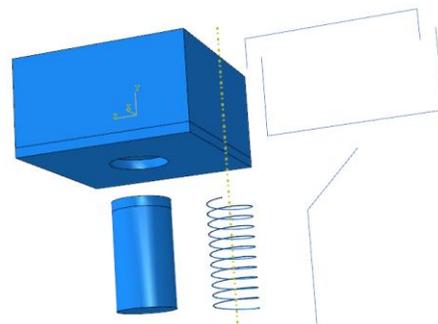


Gambar 6. Detail desain Model E



Gambar 5. Detail desain Model D

Permodelan pada *software* ABAQUS CAE 6.14 dimulai dengan pembuatan *part* atau bagian-bagian model yang akan dianalisis, *part* yang dibuat antara lain *pile cap*, *bored pile*, tulangan atas *pile cap*, tulangan bawah *pile cap*, tulangan utama *bored pile*, dan sengkang *bored pile*. Masing-masing *Part* yang dibuat pada permodelan ABAQUS CAE 6.14 ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. *Part* yang dibuat pada permodelan ABAQUS

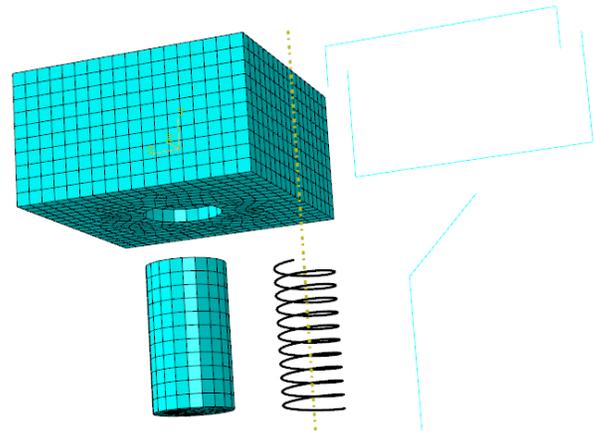
Permodelan dilanjutkan dengan pembuatan jenis dan mutu material yang digunakan. Material yang dibuat terdiri dari beton 30 MPa, tulangan ulir diameter 19 mm, dan tulangan polos diameter 12 mm. Mutu material yang dimasukkan pada *software* ABAQUS CAE antara lain berat volume beton dan tulangan, kuat tekan beton, kuat tarik beton, dan kuat tarik baja. Kemudian dilanjutkan dengan penggabungan setiap *part*. Penggabungan setiap *part* atau *assembly* dilakukan sedemikian rupa agar posisi masing-masing *part* sesuai dengan model yang direncanakan.

Tahapan selanjutnya adalah pembuatan *step* atau langkah-langkah analisis yang akan dilakukan, tipe *step* yang digunakan adalah *static general* dengan mengasumsikan bahwa beban yang diberikan pada permodelan merupakan beban statik. Kemudian dilanjutkan dengan pembuatan penghubung antar *part*. Untuk penghubung *pile cap* dengan *bored pile* menggunakan tipe *tie (surface to surface)*, dan penghubung antara tulangan dengan beton menggunakan tipe *embedded region*, sedangkan penghubung antara beban dengan permukaan *pile cap* menggunakan tipe *kinematic coupling*, karena *pile cap* dianggap cukup kaku sehingga tidak mengizinkan terjadinya perubahan bentuk saat diberikan beban. Beban pada permodelan dibuat dengan tipe *concentrated force* searah sumbu Z (CF3).

Tumpuan yang digunakan pada permodelan ada dua macam, yaitu tumpuan rol dan jepit. Tumpuan rol diberikan pada permukaan bagian bawah *pile cap* untuk mengabaikan tahanan gesek antara bagian bawah *pile cap* dengan tanah, karena menurut Hardiyatmo (2008), dalam perancangan sebaiknya tahanan gesek yang timbul akibat gesekan plat penutup tiang (*pile cap*) dengan permukaan tanah diabaikan, karena tanah di

bawah *pile cap* tersebut akan mengalami penurunan yang menyebabkan terjadinya rongga diantara *pile cap* dan permukaan tanah. Kemudian tumpuan jepit diberikan pada permukaan bagian bawah *bored pile* agar tidak terjadi pergeseran pada model.

Permodelan dilanjutkan dengan pembuatan *mesh* atau pembagian model menjadi bagian-bagian yang lebih kecil untuk dianalisis. Sebelum menentukan ukuran *mesh*, perlu dilakukan uji konvergensi untuk mendapatkan ukuran *mesh* yang efektif dengan hasil yang stabil dalam pengujian. *Mesh* untuk bagian beton *pile cap* dan *bored pile* dibuat sebesar 100 mm, untuk tulangan *pile cap* dibuat sebesar 50 mm, tulangan *bored pile* dibuat sebesar 1 mm dan sengkang dibuat sebesar 10 mm. *Mesh* masing-masing *part* ditunjukkan pada Gambar 8.



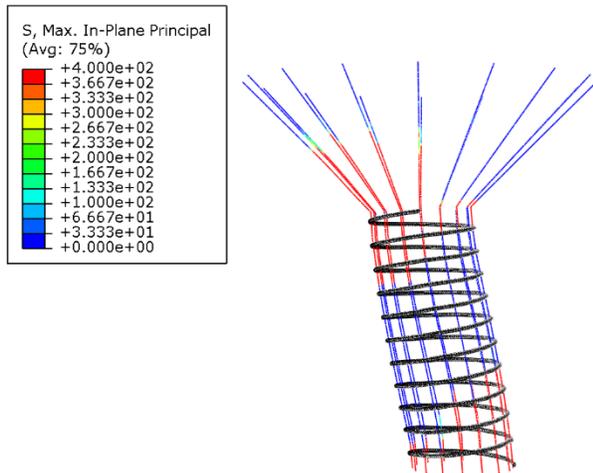
Gambar 8. *Mesh* masing-masing *part*

### 3. Hasil dan Pembahasan

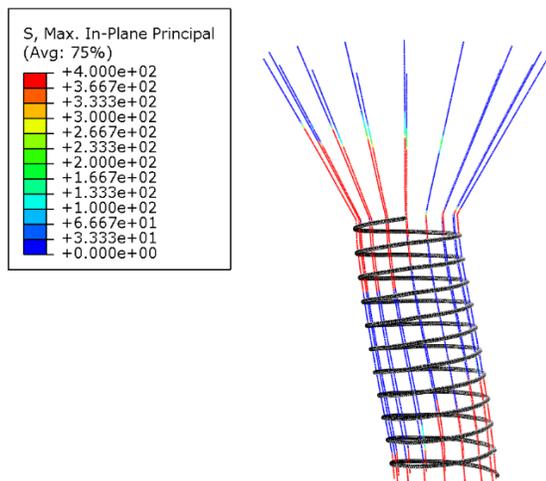
#### ***Kerusakan yang Terjadi pada Tulangan Penghubung***

Tegangan leleh ( $f_y$ ) tulangan *bored pile* yang digunakan dalam penelitian ini sebesar 400 MPa. Apabila tegangan yang terjadi pada tulangan mencapai tegangan lelehnya, maka tulangan tersebut akan mengalami leleh/kerusakan. Leleh adalah keadaan batas deformasi inelastis yang terjadi sesudah tegangan leleh tercapai (SNI 1729:2015). Tegangan yang terjadi pada masing-masing

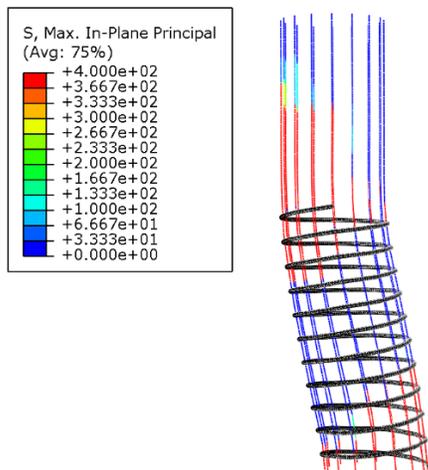
tulangan penghubung dari hasil permodelan menggunakan *software* ABAQUS CAE 6.14 ditunjukkan pada Gambar 9. Sampai Gambar 13.



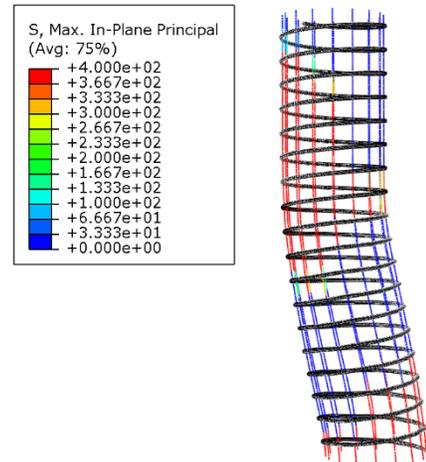
Gambar 9. Tegangan pada tulangan Model A



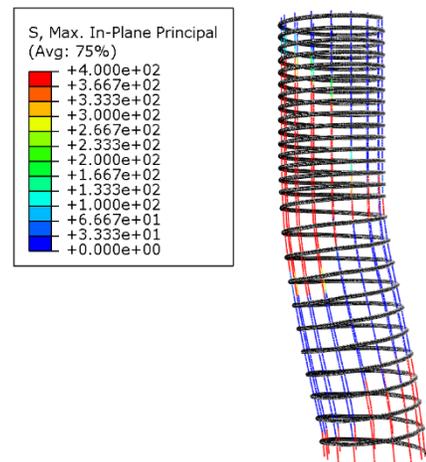
Gambar 10. Tegangan pada tulangan Model B



Gambar 11. Tegangan pada tulangan Model C



Gambar 12. Tegangan pada tulangan Model D



Gambar 13. Tegangan pada tulangan Model E

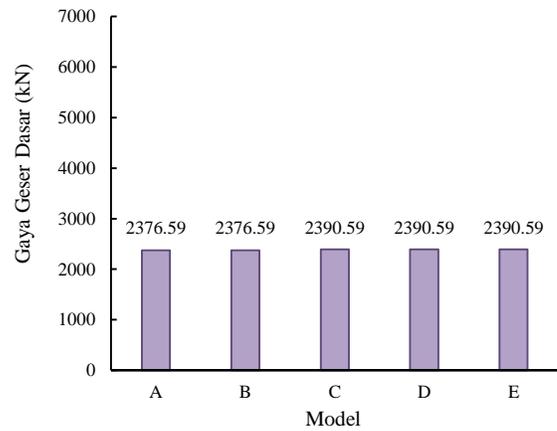
Tegangan yang terjadi pada tulangan penghubung masing-masing model seperti yang ditunjukkan Gambar 9. sampai Gambar 13. menggambarkan kerusakan tulangan terjadi pada bagian hubungan *bored pile* ke *pile cap* dan bagian bawah tiang bor. Pelelehan/kerusakan tulangan penghubung paling besar atau bagian paling kritis berada pada sisi yang berlawanan dari arah datangnya beban. Besarnya area tulangan penghubung yang mengalami leleh/kerusakan pada masing-masing model berbeda-beda. Model A dengan desain tulangan penghubung yang dibengkokkan  $45^\circ$  menunjukkan area kerusakan yang paling sedikit dibandingkan model yang lainnya, dan Model B dengan desain bengkokan tulangan penghubung yang lebih tegak menunjukkan area kerusakan tulangan penghubung yang sedikit lebih luas dari pada

Model A, sedangkan pada Model C dengan desain tulangan penghubung lurus menunjukkan area kerusakan tulangan yang paling besar dibandingkan dengan Model A dan Model B. Selain itu, Model D dengan desain tulangan penghubung yang menggunakan sengkang, area kerusakan yang terjadi lebih luas dibandingkan dengan desain tulangan penghubung tanpa sengkang, sedangkan Model E dengan penggunaan sengkang yang lebih rapat menunjukkan area kerusakan yang paling luas diantara model lainnya.

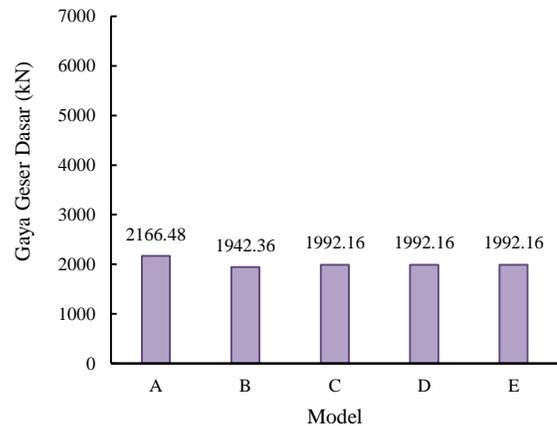
Paragraf di atas menunjukkan bahwa besarnya sudut bengkokan tulangan penghubung berpengaruh terhadap luasnya area tulangan penghubung yang mengalami kerusakan, semakin tegak tulangan penghubung, maka area tulangan yang mengalami kerusakan juga semakin luas. Selain itu, penggunaan sengkang pada tulangan penghubung juga memberikan pengaruh, tulangan penghubung dengan tambahan sengkang mengalami kerusakan yang lebih luas dibandingkan dengan tulangan penghubung tanpa sengkang. Pengurangan jarak sengkang juga memperluas area kerusakan yang terjadi pada tulangan penghubung.

### ***Kekuatan Masing-Masing Tulangan Penghubung***

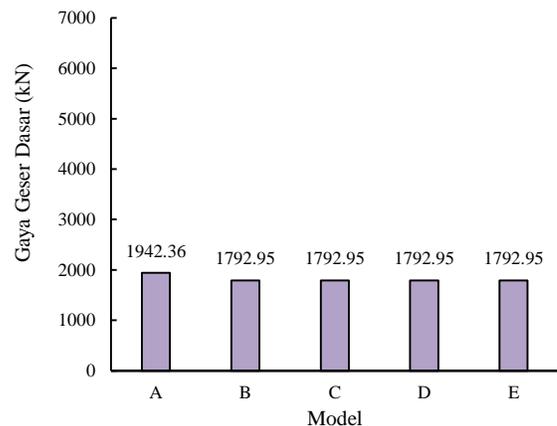
Kerusakan yang diakibatkan oleh gaya geser dasar pada setiap tulangan penghubung berbeda-beda, maka dari itu kekuatan tulangan penghubung perlu dicek satu-persatu untuk mengetahui seberapa besar gaya geser dasar yang dapat ditahan tulangan tersebut sampai mengalami leleh/kerusakan. Besarnya gaya geser dasar yang dapat ditahan masing-masing tulangan penghubung ditunjukkan pada Gambar 14. sampai Gambar 29.



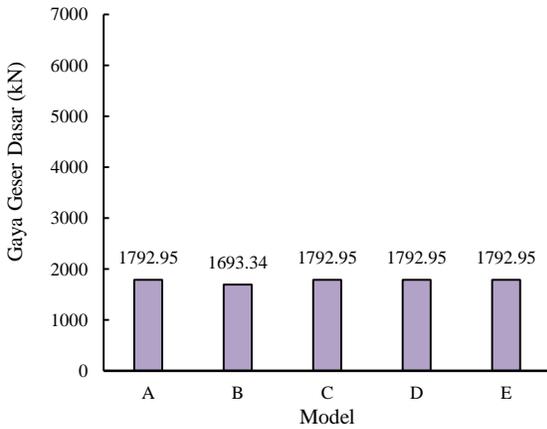
Gambar 14. Gaya geser dasar yang dapat ditahan Tulangan 1



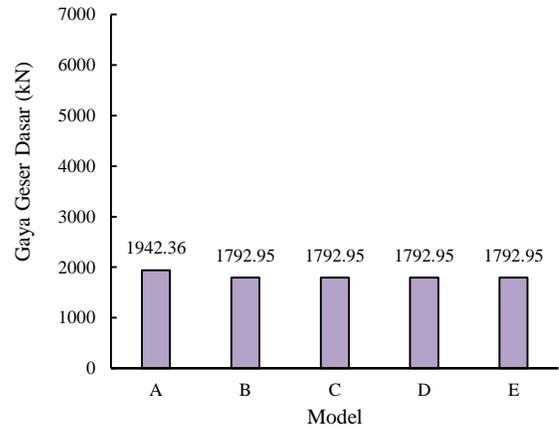
Gambar 15. Gaya geser dasar yang dapat ditahan Tulangan 2



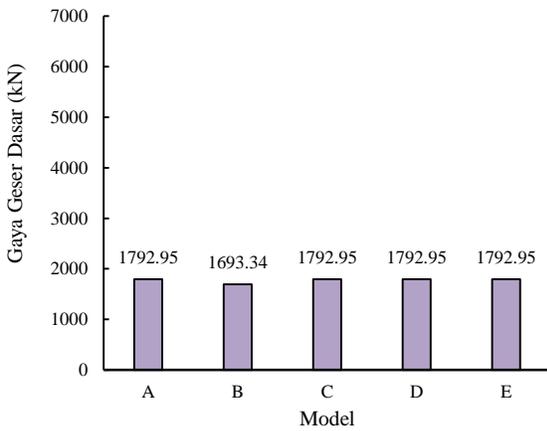
Gambar 16. Gaya geser dasar yang dapat ditahan Tulangan 3



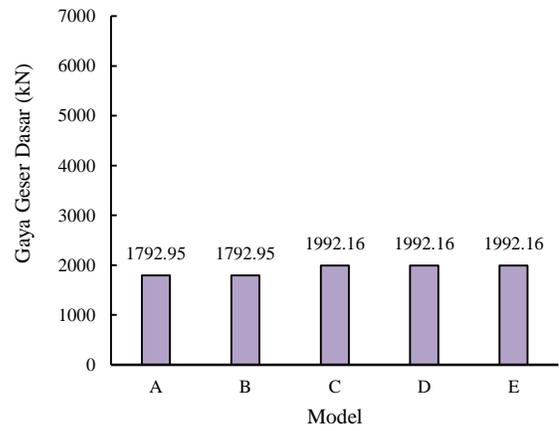
Gambar 17. Gaya geser dasar yang dapat ditahan Tulangan 4



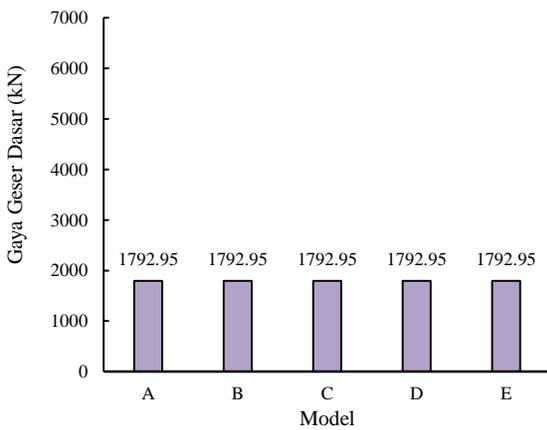
Gambar 20. Gaya geser dasar yang dapat ditahan Tulangan 7



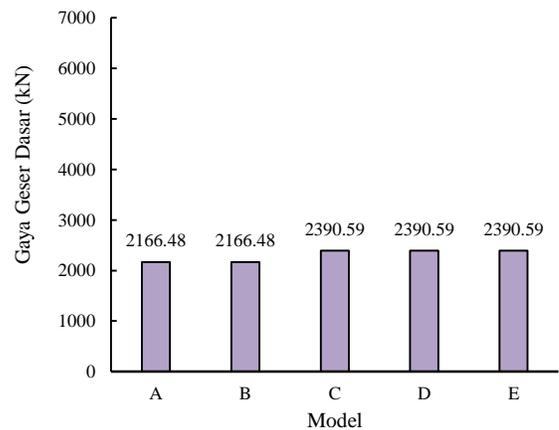
Gambar 18. Gaya geser dasar yang dapat ditahan Tulangan 5



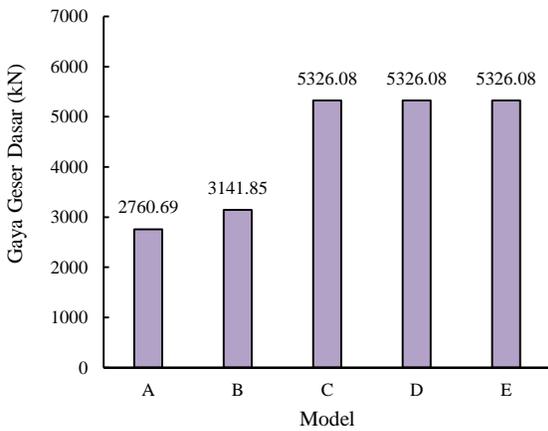
Gambar 21. Gaya geser dasar yang dapat ditahan Tulangan 8



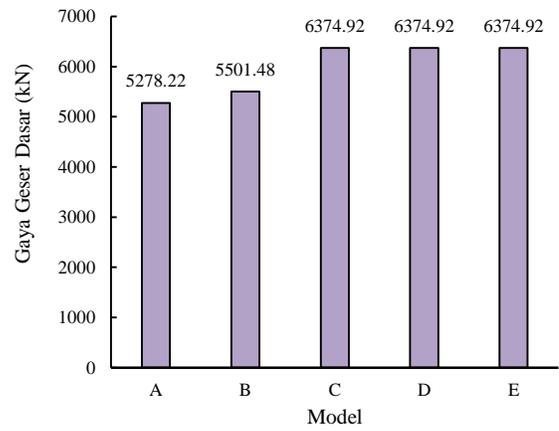
Gambar 19. Gaya geser dasar yang dapat ditahan Tulangan 6



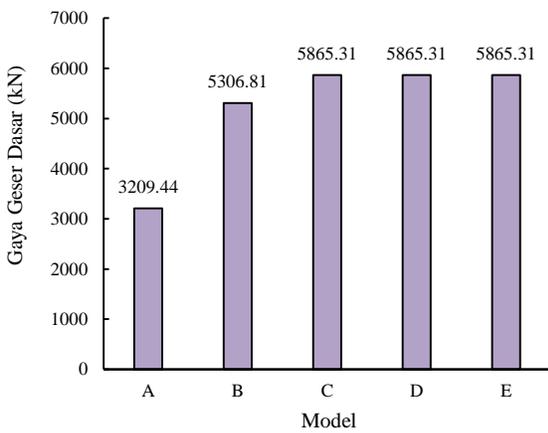
Gambar 22. Gaya geser dasar yang dapat ditahan Tulangan 9



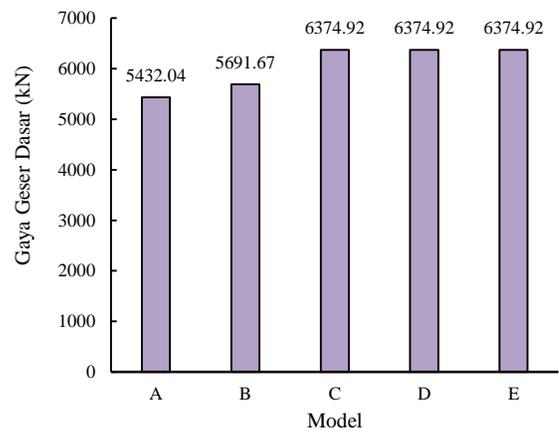
Gambar 23. Gaya geser dasar yang dapat ditahan Tulangan 10



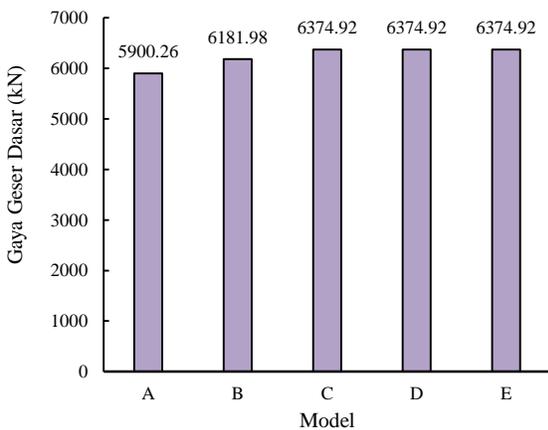
Gambar 26. Gaya geser dasar yang dapat ditahan Tulangan 13



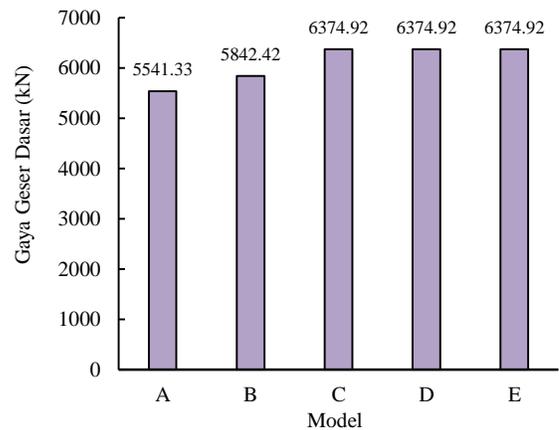
Gambar 24. Gaya geser dasar yang dapat ditahan Tulangan 11



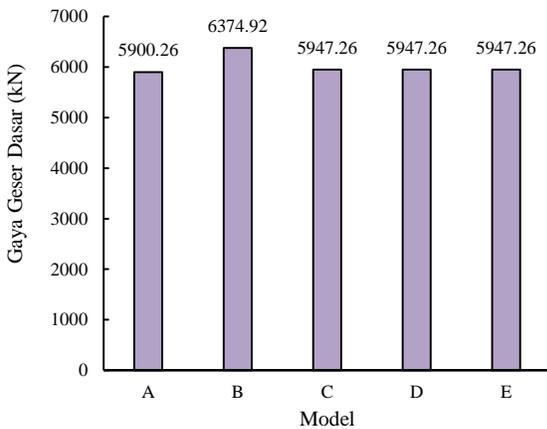
Gambar 27. Gaya geser dasar yang dapat ditahan Tulangan 14



Gambar 25. Gaya geser dasar yang dapat ditahan Tulangan 1.2



Gambar 28. Gaya geser dasar yang dapat ditahan Tulangan 15



Gambar 29. Gaya geser dasar yang dapat ditahan Tulangan 16

Diagram pada Gambar 14. sampai Gambar 29. menunjukkan bahwa kekuatan tulangan penghubung Tulangan 1 sampai Tulangan 9 pada semua model tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan, perbedaan kekuatan masing-masing tulangan penghubung lebih terlihat pada Tulangan 10 sampai Tulangan 16. Kekuatan tulangan penghubung paling besar ditunjukkan oleh Model C, D, dan E dengan besar gaya geser yang sama, sedangkan tulangan penghubung dengan kekuatan paling kecil ditunjukkan oleh Model A. Rata-rata gaya geser dasar yang dapat ditahan tulangan penghubung masing-masing model ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rata-rata kekuatan tulangan penghubung

Model	Rata-Rata Gaya Geser Dasar (kN)
A	3236,77
B	3442,82
C	3773,04
D	3773,04
E	3773,04

Berdasarkan paragraf di atas dan Tabel 2., ditunjukkan bahwa sudut bengkokan berpengaruh terhadap besarnya gaya geser dasar yang dapat ditahan tulangan penghubung

tersebut. Semakin bengkok tulangan penghubung, maka gaya geser dasar yang dapat ditahan juga semakin kecil, dan tulangan penghubung lurus menunjukkan kekuatan yang paling besar. Namun, penambahan sengkang pada tulangan penghubung Model D dan pengurangan jarak sengkang pada Model E tidak menunjukkan pengaruh terhadap besarnya gaya geser dasar yang dapat ditahan model tersebut.

### *Displacement yang Terjadi pada Masing-Masing Model*

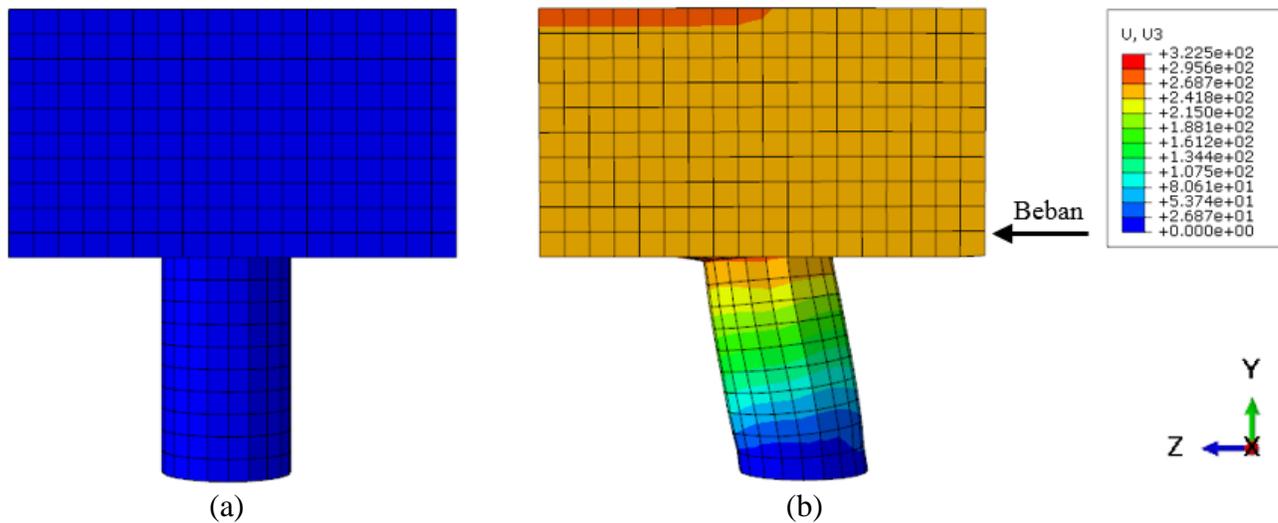
Hasil analisis menggunakan permodelan ABAQUS CAE 6.14 menunjukkan bahwa pembebanan yang dilakukan pada arah lateral mengakibatkan terjadinya *displacement* pada model. *Displacement* yang terjadi searah dengan gaya geser dasar yang bekerja, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 30.

Gerakan yang terjadi pada model merupakan jenis gerakan translasi, yaitu perubahan posisi pada kepala kelompok tiang searah dengan datangnya beban lateral (Hanifah, 2018). Besarnya *displacement* yang terjadi pada masing-masing model dicantumkan pada Tabel 3.

Tabel 3. *Displacement* maksimal pada model

Model	<i>Displacement</i> (mm)
A	287,179
B	287,123
C	287,156
D	287,156
E	287,156

Nilai *displacement* yang ditunjukkan pada Tabel 3. di atas menggambarkan bahwa Model A, B, C, D, dan E mengalami *displacement* dengan besar yang hampir sama. Hal tersebut menunjukkan bahwa perbedaan sudut bengkokan dan penambahan sengkang pada tulangan penghubung tidak memberikan pengaruh yang besar terhadap kekakuan model.



Gambar 30. (a) sebelum diberi beban (b) setelah diberi beban

### Desain Tulangan Penghubung yang Paling Kuat

Penentuan desain tulangan penghubung yang paling kuat ditinjau berdasarkan kekuatan/kapasitas tulangan tersebut dalam menahan gaya geser dasar, dan besarnya *displacement* yang terjadi pada model. Perbandingan kekuatan tulangan penghubung dan *displacement* yang terjadi pada masing-masing model diuraikan dalam Tabel 4.

Tabel 4. menunjukkan bahwa Model A dengan sudut bengkokan tulangan penghubung paling miring memiliki kekuatan yang lebih kecil dibandingkan model yang lain. Sedangkan Model B dengan sudut bengkokan yang lebih tegak menunjukkan kekuatan yang lebih besar dibandingkan dengan Model A. Kemudian pada Model C, D, dan E dengan tulangan penghubung lurus menunjukkan kekuatan yang paling besar dibandingkan dengan model yang lain. Selain itu, *displacement* yang terjadi pada masing-masing model tidak menunjukkan perbedaan yang

signifikan. Sehingga desain tulangan penghubung paling kuat ditunjukkan oleh Model C, D, dan E. Namun dari segi efisiensi penggunaan material, Model C lebih baik dibandingkan dengan Model D dan E karena tulangan penghubung Model C tidak menggunakan sengkang.

### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil permodelan kelima macam desain tulangan penghubung menggunakan *software* ABAQUS CAE 6.14 dapat disimpulkan sebagai berikut ini.

1. Kerusakan tulangan penghubung paling besar yang terjadi pada masing-masing model berada di sisi yang berlawanan dari arah datangnya beban. Tulangan penghubung lurus menunjukkan kerusakan yang lebih besar dibandingkan dengan tulangan penghubung yang dibengkokkan. Selain itu, tulangan penghubung dengan tambahan sengkang mengalami kerusakan

Tabel 4. Perbandingan kekuatan dan *displacement* masing-masing model

No.	Item	Perbandingan				
		Model A	Model B	Model C	Model D	Model E
1	Rata-rata gaya geser dasar yang dapat ditahan tulangan penghubung (kN)	3236,77	3442,82	3773,04	3773,04	3773,04
2	<i>Displacement</i> yang terjadi pada model (mm)	287,19	287,123	287,156	287,156	287,156

yang lebih luas dibandingkan dengan tulangan penghubung tanpa sengkang. Pengurangan jarak sengkang juga memperluas area kerusakan yang terjadi pada tulangan penghubung tersebut.

2. Hasil permodelan menunjukkan bahwa sudut bengkokan berpengaruh terhadap besarnya kekuatan atau gaya geser dasar yang dapat ditahan tulangan penghubung masing-masing model. Semakin bengkok tulangan penghubung, maka gaya geser dasar yang dapat ditahan juga semakin kecil, dan tulangan penghubung lurus menunjukkan kekuatan yang paling besar. Namun, penambahan sengkang pada tulangan penghubung Model D dan pengurangan jarak sengkang pada Model E tidak menunjukkan pengaruh terhadap besarnya gaya geser dasar yang dapat ditahan model tersebut.
3. Hasil permodelan menunjukkan bahwa Model A, B, C, D, dan E mengalami *displacement* dengan besar yang hampir sama. Hal tersebut menunjukkan bahwa perbedaan sudut bengkokan dan penambahan sengkang pada tulangan penghubung tidak memberikan pengaruh yang besar terhadap kekakuan model.
4. Desain tulangan penghubung paling kuat ditunjukkan oleh Model C, D, dan E. Namun dari segi efisiensi penggunaan material, Model C lebih baik dibandingkan dengan Model D dan E karena tulangan penghubung Model C tidak menggunakan sengkang.

### Ucapan Terima Kasih

Terimakasih disampaikan kepada bapak Yoga Aprianto Harsoyo, S.T., M.Eng. yang sudah membimbing dan mengarahkan untuk menyelesaikan penelitian ini. Terimakasih kepada teman-teman Teknik Sipil yang sudah ikut membantu untuk menyelesaikan penelitian ini.

### 5. Daftar Pustaka

- Abbas, S. A., Al-Rekabi, W. S., dan Al-Aboodi, A.H., 2015, Analysis of Laterally Loaded (2×2) square Pile groups Using Finite Element Method, *SEEK Digital Library*, 7-12, <http://doi.org/10.15224/978-1-63248-110-8-27>.
- Afriandini, B., dan Saputro, D. N., 2018, Analisis Gaya Geser Dasar Seismik berdasarkan SNI-03-1726-2002 dan SNI 1726:2012 pada Struktur Gedung Bertingkat, *TECHNO*, 19(2), 95-102, <http://doi.org/10.30595/techno.v19i2.3453>.
- BSN, 2012, SNI 1726:2012: *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2013, SNI 2847:2013: *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2015, SNI 1729:2015: *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- Departemen Pekerjaan Umum, 1971, *Peraturan Beton Bertulang Indonesia N.I.-2*, Departemen Pekerjaan Umum, Bandung.
- Guo, Z., He, W., Bai, X., dan Chen, Y. F., 2017, Seismic Performance of Pile-Cap Connections of Prestressed High-Strength Concrete Pile with Different Details, *Structural Engineering International*, 27(4), 546-557, <http://doi.org/10.2749/222137917X14881937845963>.
- Hanifah, K. M., 2018, *Analisis Faktor Efisiensi dan Perilaku Kelompok Tiang Akibat Beban Lateral Menggunakan Metode Finite Difference dan Metode Elemen Hingga*, Tugas Akhir, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- Hardiyatmo, H. C., 2008, *Teknik Fondasi 2*, Edisi ke-4, Yogyakarta: Beta Offset.
- Iekel, P. P., Brent, P., dan Nop, M., 2018, Performance Investigation and Design of Pile-to-Pile Cap Connections Subject to

- Uplift, *Transportation Research Record*, 2672(52), 278-290, <http://doi.org/10.1177/0361198118796733>.
- Kappes, L., Berry, M., Murray, F., Stephens, J., dan Barnes, K., 2016, Seismic Performance of Concrete-Filled Steel Tube to Concrete Pile-Cap Connections, *Journal of Bridge Engineering*, 21(7), 1-17, [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000901](http://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000901).
- Kim, Y., Kang, J., Kim, S., dan Kim, D., 2016, Structural Performance of Steel Pile Caps Strengthened with Perfobond Shear Connectors under Lateral Loading, *Applied Sciences*, 6(317), 1-11, <http://doi.org/10.3390/app6110317>.
- Kim, Y., Kang, J., Koo, H., dan Kim, D., 2016a, Pull-Out Resistance Capacity of a New Perfobond Shear Connector for Steel Pile Cap Strengthening, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1-12, <http://doi.org/10.1155/2016/1374689>.
- Pamungkas, A., Harianti, E., 2013, *Desain Pondasi Tahan Gempa*, Yogyakarta: ANDI Yogyakarta.
- Rhim, H. C., Kang, J., Kim, Y. H., dan Kim, D., 2018, Push-out Test and Analysis of Steel Pile Caps Strengthened with Perfobond Shear Connectors, *Magazine of Concrete Research*, 0(0), <http://doi.org/10.1680/jmacr.18.00297>.
- Wang, T., Yang, Z., Zhao, H., dan Wang, W., 2014, Seismic Performance of Prestressed High Strength Concrete Pile to Pile Cap Connections, *Advances in Structural Engineering*, 17(9), 1329-1342, <http://doi.org/10.1260/1369-4332.17.9.1329>.
- Xu, J., dan Ma, L., 2017, Study on Bearing Capacity of Prestressed Pipe Pile Foundation Under Horizontal Load, *The Open Construction and Building Technology Journal*, 11(1), 301-312, <http://doi.org/10.2174/1874836801711010301>.